

Dodatak F

Prenaponska zaštita objekata niskog napona

F.1 Osnovni podaci o analiziranom objektu

Izvršena je analiza višespratnog stambenog objekta koji se napaja kablom do metalne kablovske priključne kutije (KPK).

Skica sistema prikazana je na slici F.1. Dimenzije objekta su $a=15$ m, $b=15$ m i $h=16$ m.

Oznake na slici F.1 imaju sledeće značenje:

G -atmosfersko pražnjenje,

H -gromobranska hvataljka, deo prihvatnog sistema,

SP -spusni provodnik gromobranskog sistema,

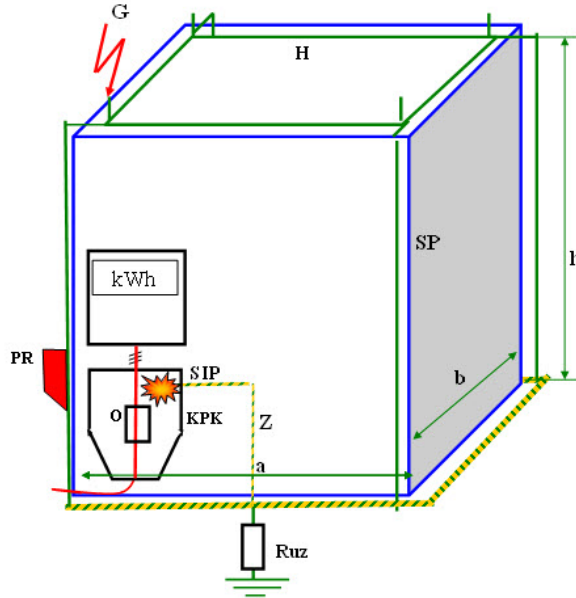
Z -provodnik za vezu sa uzemljivačem,

SIP -šina za izjednačenje potencijala,

KPK -kablovska priključna kutija, koja je izrađena od metala i povezana za uzemljivačem,

O -osigurači u kablovskoj priključnoj kutiji,

PR -prenaponski talas koji se prostire po provodnicima gromobranske instalacije.



Slika F.1: Skica objekta u koji se dogodilo pražnjenje u gromobranski prihvatni sistem (a=15 m, b=15 m i h=16 m)

F.2 Proračun prenapona

Za proraču prenapona važno je poznavanje otpora rasprostiranja uzemljivača zgrade. Uzemljivač zgrade je u obliku kvadrata oko cele zgrade od pocinkovane čelične trake 25×4 mm u zemlji specifičnog otpora $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Za kvadratni uzemljivač od pljosnate trake na dubini od 0.5 m otpornost rasprostiranja se određuje pomoću izraza za određivanje ekvivalentnog prečnika kružnog prstena koji ima istu površinu kao kvadratni prsten prema izrazu 7.63 na strani 222. Kada se izračuna D_{ekv} , dobija se:

$$D_{ekv} = 1.13\sqrt{a \times b} \quad (\text{F.1})$$

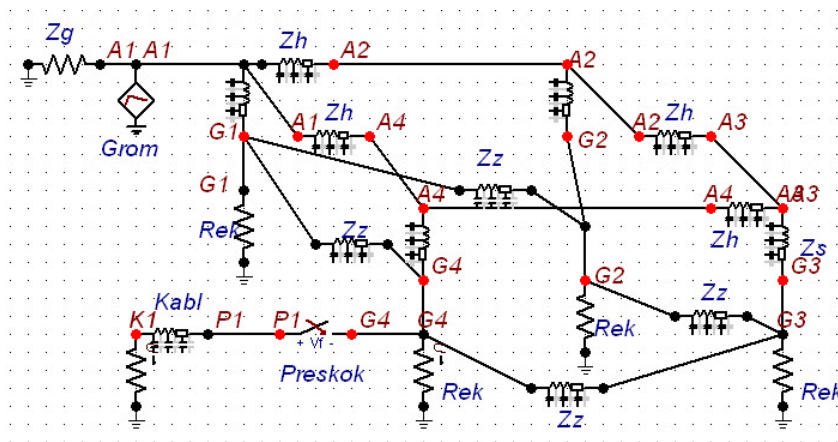
Kada se zamene vrednosti, dobija se $D_{ekv} = 16.95$ m, za $a = 15\text{m}$ i $b = 15\text{m}$. Otpornost prstenastog uzemljivača je prema 7.64:

$$R_{uz} = \frac{2\rho}{3D_{ekv}} = 3.93 \Omega \quad (\text{F.2})$$

Uzemljivačka traka u obliku kvadrata ekvivalentirama je sa 4 koncentrisana otpornika smeštena u uglovima kvadrata koji imaju otpornost $R_{ek} = R_{uz} \times 4$, odnosno $R_{ek} = 15.72 \Omega$.

Proračun prenapona rađen je programom EMTP-atp prema šemi datoj kao ekranski prikaz gromobranske instalacije. Na slici F.2 prikazana je šema sa označenim provodnicima prihvatnog sistema karakteristične impedanse Z_h , spusnih provodnika označenih

preko karakteristične impedanse Z_S , kao i horizontalne trake u zemlji označene preko karakteristične impedanse Z_Z . Karakteristične impedanse elemenata instalacija imaju usvojene vrednosti $Z_h = Z_S = 250 \Omega$ i $Z_Z = 50 \Omega$. Oznaka za karakterističnu impedansu kanala groma je Z_g , a usvojena vrednost je $Z_g = 300 \Omega$. Karakteristična impedansa napojnog kabla $Z_K = 50 \Omega$.



Slika F.2: Šema gromobranske instalacije stambenog objekta u obliku ekranskog prikaza iz programa

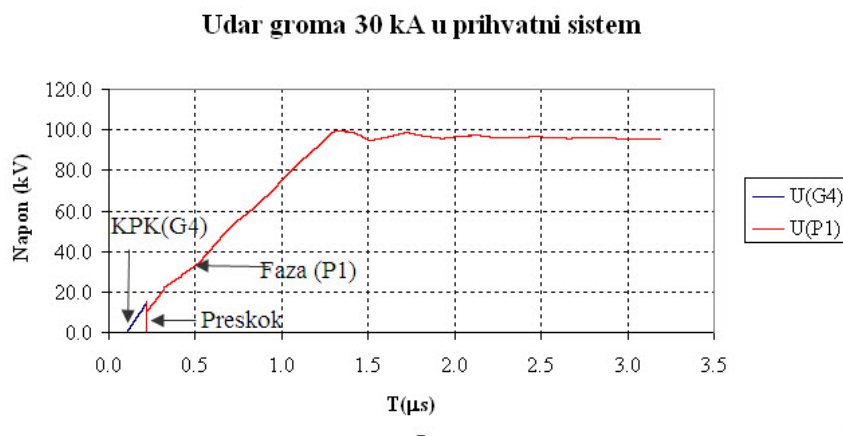
Izvršen je proračun prenapona u KPK ormanu između faznog provodnika za koji je pretpostavljeno da je na potencijalu referentne nule i napona na metalnom kućištu KPK. Proračun je urađen za struju atmosferskog pražnjenja 30 kA i vreme čela struje $1.2 \mu s$. Predpostavljeno je da je preskočni napon između faze i KPK 12 kV. Talasni oblik napona prikazan je na slici F.3. Izabrani talasni oblik predstavlja prvu komponentu negativnog atmosferskog udara, koji se odlikuje manjom amplitudom struje, ali daleko kraćim čelom, koje se u laboratoriji i pri simulacijama predstavlja talasom $1.2/50 \mu s$, gde je prva brojka trajanje čela, a druga trajanje do pada na polovinu vrednosti amplitude.

U trenutku $0.22 \mu s$ dolazi do preskoka i naponi na faznom provodniku i KPK se izjednačavaju.

F.3 Ispitivanje osetljivosti rezultata na parametre šeme

F.3.1 Karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika

Karakteristične impedanse pocinkovanih gvozdениh traka postavljenih na nosačima na relativno malom rastojanju od površine krova ili zidova kod spusnih provodnika se usvajaju.



Slika F.3: Talasni oblik napona na uzemljenom kućištu KPK -kriva $U(G4)$ i na žili kabla -kriva $U(P1)$

Urađeni su primeri kod kojih je varirana vrednost karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika u širokom dijapazonu da bi se utvrdio uticaj na maksimalni prenapon. Rezultati su prikazani u tabeli F.1.

Tabela F.1: Uticaj karakteristične impedanse prihvatnih i spusnih provodnika na maksimalne prenapone

Karakteristična impedansa (Ω)	100	150	200	250	300
Maksimalni prenapon (kV)	99.8	101	100	101	101

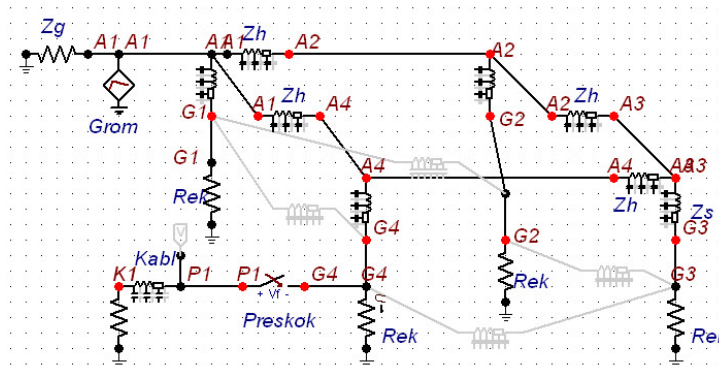
Na osnovu rezultata analize se može videti da karakteristične impedanse provodnika spoljašnje gromobranske instalacije nemaju uticaja na visinu prenapona. Mala kolebanja u rezultatima koja su oko 1% su beznačajna na zaključivanje o efikasnosti gromobranske zaštite.

Analiziran je uticaj horizontalne uzemljivačke trake u obliku kvadrata na visinu prenapona. Traka je isključena iz proračuna kao na slici F.4, za razliku od slike F.2 gde traka postoji.

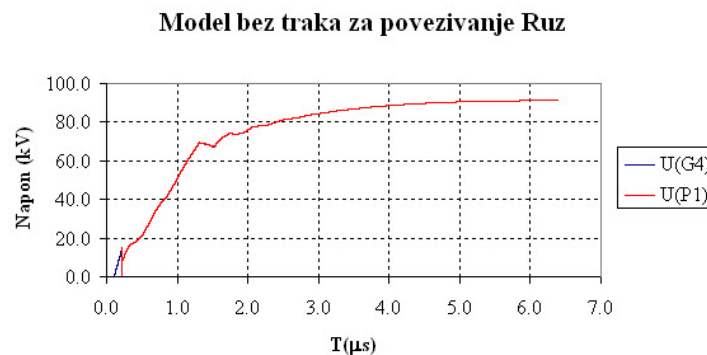
Talasni oblik napona u ovom slučaju prikazan je na slici F.5.

Može se uočiti značajna promena oblika talasa kada se ukinе traka za povezivanje ekvivalentnih otpornika uzemljivača i dobijaju se niže vrednosti prenapona. Razlog promene je što uzemljivačka traka pomaže ravnomernijoj raspodeli struja između koncentrisanih uzemljivača, pa se brže uspostavlja napon na uzemljivačima koji bolje prati oblik struje samog atmosferskog pražnjenja.

Izvršena je analiza osetljivosti rezultata proračuna kada se varira karakteristična impedansa uzemljivačke trake Z_{uz} u širokom intervalu. Rezultati su dati u tabeli F.2.



Slika F.4: Šema gromobranske instalacije stambenog objekta bez uzemljivačke trake, u obliku ekranskog prikaza



Slika F.5: Talasni oblik napona na uzemljenom kućištu KPK -kriva $U(G4)$ i na žili kabla -kriva $U(P1)$ bez povezne trake za uzemljenje

Vidi se da je uticaj usvojene vrednosti arakteristične impedanse uzemljivačke trake mali na rezultate proračuna.

Tabela F.2: Uticaj karakteristična impedansa uzemljivačke trake Z_{uz}

Karakteristična impedansa povezne trake $Z_Z (\Omega)$	10	50	100	200	∞
Maksimalni prenaponi $U_{max} (kV)$	101.3	100	99.03	97	91.2

F.3.2 Uticaj karakterististične impedanse kanala groma

Atmosfersko pražnjenje se pri proračunima prenapona u elektroenergetskom sistemu modeluje preko strujnog talasa koji nailazi po kanalu groma koji se zamenjuje vodom konstantne karakteristične impedanse, kao što je objašnjeno u poglavlju 7.1. Pri proračunima se usvaja karakteristična impedansa kanala groma 300 do 400 Ω . Izvršeno je ispitivanje

osetljivosti modela pražnjenja na maksimalni prenapon na KPK. Rezultati su dati za širi dijapazon vrednosti karakteristične impedanse od 200 do 500 Ω . Rezultati pokazuju

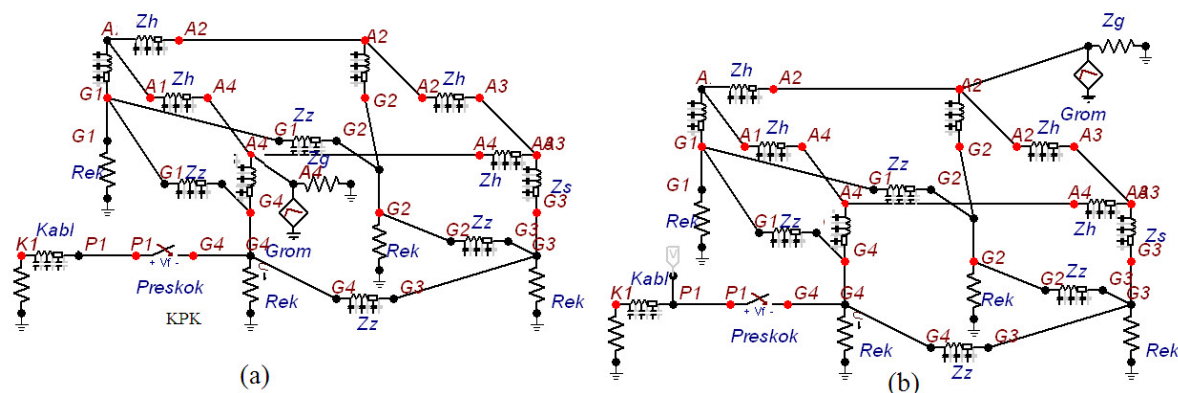
Tabela F.3: Uticaj karakteristične impedanse kanala groma na maksimalan prenapon

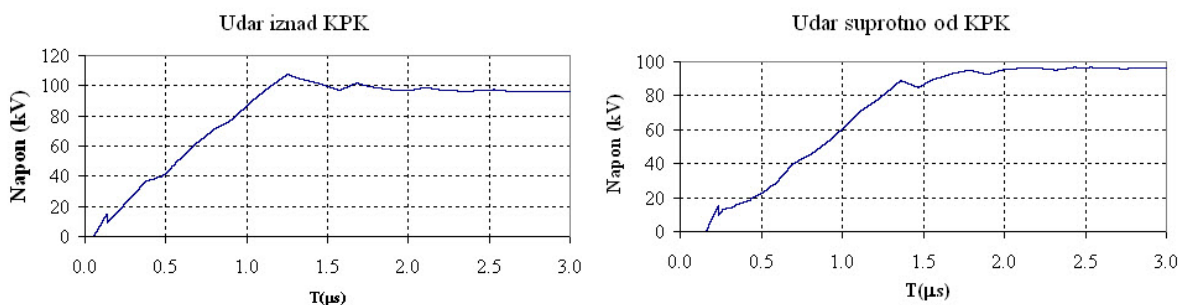
Karakteristična impedansa kanala groma (Ω)	200	300	400	500
Maksimalni prenapon (kV)	98.6	99.2	99.9	100

porast prenapona sa povećanjem vrednosti karakteristične impedanse od 1,4%. Stoga je potpuno opravdano usvojiti bilo koju vrednost karakteristične impedanse u opsegu od 300 do 400 Ω .

F.3.3 Uticaj mesta udara na prihvatnom sistemu

Izvršena je analiza kada je mesto udara atmosferskog pražnjenja najbliže KPK na kome se događa preskok (slika F.6 (a)) i kada je na suprotnoj strani objekta F.6 (b). Amplituda pražnjenja i svi ostali parametri su identični.





Slika F.7: talasni oblici napona kada je udar iznad KPK i kada je na suprotnoj strani

prenapona na KPK, ali da je najveća razlika samo 8.22% u odnosu na najkritičnije mesto udara. U slučaju objekata veće površine, ta razlika bi se povećavala.

Na osnovu izvršenih analiza se može zaključiti da sledeći parametri nemaju uticaj na rezultate proračuna:

- karakteristične impedanse prihvatnog gromobranskog sistema u obliku traka na krovu i spusnih provodnika do uzemljivača,
- karakteristične impedanse uzemljivačkih traka u zemlji između tačaka vezivanja za spusne provodnike ne utiču na rezultate,
- Karakteristična impedansa kanala groma.

Uzemljivačke trake koje se nalaze u zemlji se ne modeluju da odvede struju sa svoje površine, već za odvođenje struje u zemlju služe koncentrisani omski otpornici na krajevima traka na mestima ukrštanja sa spusnim provodnicima. Otpornost koncentrisanih omskih otpornika koji odvede struju u zemlju ima dominantan uticaj na visinu prenapona.

F.3.4 Redukovanje ekvivalentne šeme

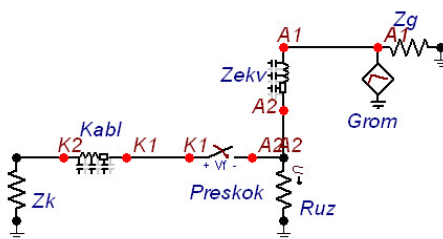
Radi pojednostavljenja šeme sa slike F.6 levo, ispitivana je mogućnost redukovanja šeme na taj način što bi se svi spustevi zamenili jednim ekvivalentnim spustom, a svi horizontalni provodnici na krovu i uzemljenju zanemarili. U tom slučaju bi ekvivalentna

Tabela F.4: Maksimalni prenaponi u različitim lokacijama udara

Mesto udara	Iznad KPK	Suprotno od KPK
U_{max} (kV)	107.6	98.75
U_{max} (%)	100.00%	91.78 %

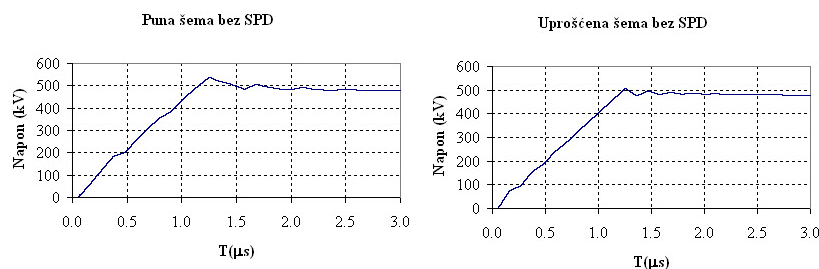
karakteristična impedansa spusnog provodnika bila $Z_{ekv} = Z_S/4$, odnosno $Z_{ekv} = 62.5 \Omega$. Otpornost rasprostiranja uzemljivača je $R_{uz} = R_{ek}/4$, odnosno $R_{uz} = 3.93 \Omega$. Upoređivanje će biti urađeno taladom amplitude 100 kA i oblikom talasa $1.2/50 \mu s$.

Na slici F.8 prikazana je uprošćena ekvivalentna šema sa jednim spustom karakteristične impedanse Z_{ekv} i jednim koncentrisanim otpornikom uzemljivača R_{uz}



Slika F.8: Ekvivalentna šema sa jednim spustom i jednim koncentrisanim otpornikom uzemljivača

Na slici F.9 prikazani su talasni oblici napona na otporniku uzemljenja pri primeni pune i redukovane šeme.



Slika F.9: Upoređenje talasnih oblika primenom pune i redukovane šeme

Pri primeni pune šeme dobija se nešto viši napon nego kod redukovane šeme, jer u slučaju udara neposredno iznad KPK najveći deo struje protiče kroz najbliži spust, dok ostali spustevi odvođe manji deo struje. Uvođenjem korekcionog faktora za struju se ovaj efekat može ispraviti.

U tabeli F.5 izvršeno je upoređivanje maksimalnih napona pri primeni pune U_{maxP} i redukovane šeme U_{maxR} i izračunavanje korekcionog faktora za struju.

Tabela F.5: Upoređivanje maksimalnih napona pri primeni pune i redukovane šeme i izračunavanje korekcionog faktora za struju

U_{maxP} (kV)	U_{maxR} (kV)	Faktor korekcije U_{maxP}/U_{maxR}
537.8	507.6	1.0595

Faktor korekcije zavisi od geometrije analiziranog objekta, kao i od oblika talasa.

Ukoliko se koristi strujni generator amplitude struje 106.9 kA umesto 100 kA, dobijaju se gotovo identične amplitude napona.

Ako bi se primenjivao talasni oblik struje 10/350 μ s, razlika u amplitudama bi bila daleko manja.

F.4 Statistički proračun

Za statistički proračun potrebna su 4 ulazna parametra:

1. prihvatna površina objekta A_D ,
2. godišnja gustina pražnjenja N_G po km^2 ,
3. kritične struje I_k koja izaziva kvar izolacije,
4. verovatnoća $P(I_k)$ prekoračenja kritične struje I_k atmosferskog pražnjenja.

F.4.1 Prihvatna površina objekta

Prema standardu [16] prihvatna površina objekta čija je osnova kvadrat dužine L i visina pravouglog paralelopipeda H se može izračunati primenom sledeće formule, koja je objašnjena detaljnije izrazom B.7 na strani 434:

$$A_D = L^2 + 12 \times H \times L + 9 \times \pi \times H^2 \quad (\text{F.3})$$

Kada se izračuna, dobija se da je prihvatna površina objekta

$$A_D = 10343 \text{ m}^2 \text{ odnosno } A_D = 0.010343 \text{ km}^2$$

F.4.2 Godišnja gustina pražnjenja

Usvojena je godišnja gustina pražnjenja po km^2 od $N_G = 2.8$ udara/god, km^2 .

F.4.3 Kritična struja koja izaziva preskok

Analiziran je slučaj pražnjenja iznad KPK sa amplitudom struje pražnjenja koja je sistematski smanjivana od 15 kA na niže sa korakom 1 kA. Trajanje čela struje dato je izrazom $T = 0.154 \times I_m^{0.624}$. Trajanje čela struje je funkcija amplitude struje prema [13] objašnjeno je izrazom 8.15 na strani 319. Na ovaj način se postiže da imamo samo jednu nezavisnu slučajnu promenljivu.

Primer dela tabele sa rezultatima maksimalnih napona na KPK dat je u tabeli F.6. Proračun je rađen na taj način što je amplituda struje pražnjenja smanjivana za konstantan dekrement i za svaku struju je izračunavan maksimalni napon na KPK. Određena je minimalna struja za koju je napon iznad podnosivog napona, koji je usvojen da je 12 kV.

Tabela F.6: Variranje struje od 10 kA na niže i određivanje minimalne amplitude struje koja izaziva proboj pri naponu od 12 kV

Br.	I_{max} (kA)	U_{max} (kV)
1	10	33.1
2	9	29.9
3	8	26.7
4	7	23.3
5	6	20.2
6	5	17.4
7	4	15.0
8	3	14.1
9	2	11.0
10	1	3.4

Sve struje koje su veće ili jednake $I_{min} = 3$ kA izazivaju preskok u KPK, jer je pri većim strujama napon na izolaciji viši od podnosivog napona izolacije $U_{iz} = 12$ kV.

F.5 Određivanje rizika preskoka u KPK

Na osnovu tabele F.6 određena je amplituda struje od $I_{min} = 3$ kA kao najmanja struja koja izaziva preskok. Svi parametri potrebni za proračun verovatnoće premašenja struje I_{min} dati su u tabeli F.7, uz usvojenu srednju amplitudu struje pražnjenja od $I_{sr} = 30$ kA i srednjeg kvadratnog rasipanja logaritma struje $\sigma_{\ln I} = 0.6$.

Verovatnoća pojave struje koja izaziva kvar izolacije je $P(I_g > I_{min}) \approx 1$. Ukupan očekivani broj kvarova transformatora je:

$$N_k = N_D \times P(I_g > I_{min}) = 0.01034 \times 1 = 0.01034 \text{ kvarova/god} \quad (\text{F.4})$$

Tabela F.7: Tabela sa proračunom verovatnoće pojave struje veće od minimalne struje koja izaziva proboj transformatora

I_g	I_{sr}	$\sigma_{\ln I}$	$X = \frac{\ln(I_g/I_{sr})}{\sqrt{2 \times \sigma_{\ln I}^2}}$	$Z = \text{ERFC}(X)$	$P(I_g) = \frac{1-Z}{2}$
3	30	0.6	-2.72	-0.99988	0.99994

Očekivani broj godina bez kvara MTBF (Mean Time Between Failures) je:

$$MTBF = 96.7 \text{ god} \quad (\text{F.5})$$

Događaj je redak jer je prihvatna površina objekta mala, ali praktično svaki udar u gromobransku instalaciju objekta bi izazvao preskok u KPK i kratak spoj, koji bi trebalo da prekine osigurač u KPK. Ukoliko bi KS bio ispred osigurača, tada bi on trebalo da bude isključen u transformatorskoj stanici.

F.6 Primena zaštitnih mera

F.6.1 Opis zaštitnih mera

Prema ugroženosti objekata od atmosferskih prenapona se vrši podela objekata na 4 nivoa zaštite (skraćeno LPL od engl. lightning protection level). Nivo zaštite se bira u zavisnosti od nivoa opasnosti po život i zdravlje, od ugroženosti od požara, oštećenja ili uništenja imovine, prekida javnih servisa (snabdevanje električnom energijom, prekid telekomunikacija, vodosnabdevanja itd), oštećenja električnih aparata, gubitak kulturnog nasleđa i druge štete. U zavisnosti od rizika i veličine štete bira se amplituda struje atmosferskog pražnjenja sa kojom se proverava efikasnost zaštite. Takođe se bira i način postavljanja spoljašnje gromobranske instalacije. U tabeli F.8 date su amplitude udarne struje pražnjenja u funkciji klase LPS (engl. Lightning Protection System), kao i razmaci provodnika koji čine prihvatni sistem i spusne provodnike. Klasa LPS je jednaka nivou LPL (nivoi I, II, III i IV). Provera adekvatnosti prenaponskog zaštitnog uređaja (SPD od engl. Surge Protective Device) radi se atmosferskim udarnim talasom struje pozitivnog polariteta, oblika talasa $10/350 \mu\text{s}$, koji energetski značajno više opterećuje zaštitni sistem od struja prvih negativnih udara. Pozitivi udari su oko 10 puta ređi od negativnih.

Prenaponska zaštita u električnim instalacijama se sprovodi pomoću SPD uređaja. Objekat se deli na zone zaštite. Spoljašnja gromobranska zaštita štiti ljude i materijalna dobra, ali ne štiti električne i elektronske sisteme u zgradama koji su osetljivi na prolazne prenapone usled atmosferskog pražnjenja, koji mogu biti velike energije.

Danas se postavljaju visoki zahrevi za stalnu dostupnost i pouzdanost električnih

Tabela F.8: Amplituda atmosferskog pražnjenja i dimenzionisanje spoljašnje gromobranske zaštite u obliku mreže u funkciji LPL (klasa LPS)

Klasa LPS	Amplituda struje (kA)	veličina okaca mreže (m×m)	Rastojanje spusteva (m)
I	200	5 × 5	10
II	150	10 × 10	10
III	100	15 × 15	15
IV	75	20 × 20	20

sistema u zgradama. Zaštita električnih i elektronskih sistema u zgradama i objektima od prenapona koji nastaju usled elektromagnetnog impulsa groma (LEMP-engl. - Lightning Electromagnetic Pulse) zasniva se na principu zona zaštite od udara groma (LPZ-Lightning Protection Zone). Prema ovom principu, zgrada ili struktura koja se štiti mora biti podeljena na unutrašnje zone zaštite od groma prema nivou opasnosti koju predstavlja LEMP. Ovo omogućava da se područja sa različitim nivoima rizika od LEMP prilagode po nivou zaštite elektronskog sistema. Ovim konceptom, odgovarajuće LPZ mogu biti definisane prema broju, tipu i osetljivosti elektronskih uređaja ili sistema. U zavisnosti od vrste opasnosti od atmosferskog pražnjenja, definisane su sledeće zone zaštite:

Spoljašnje zone

LPZ 0A - zone koje su ugrožene direktnim udarima groma, bilo od kompletne struje pražnjenja ili od delimičnih strujnih putanja koje se odvajaju od glavne strujne staze,

LPZ 0B -zona zaštićena od direktnih udara groma, ali ugrožena od celog elektromagnetnog polja atmosferskog pražnjenja,

Unutrašnje zone

LPZ 1 - udarne struju su ograničene odvođenjem dela struje u zemlju, smanjeno je elektromagnetno dejstvo tih struja.

LPZ 2 ... n -dodatno je smanjeno dejstvo udarnih struja i ostalih efekata usled dodatnog odvođanja delova struja u zemlju.

Postavljaju se SPD uređaji na granicama zona, tako da se unutar zaštićenih zona smanjuju opasni efekti.

SPD uređaji se prema svojoj efikasnosti dele na klase:

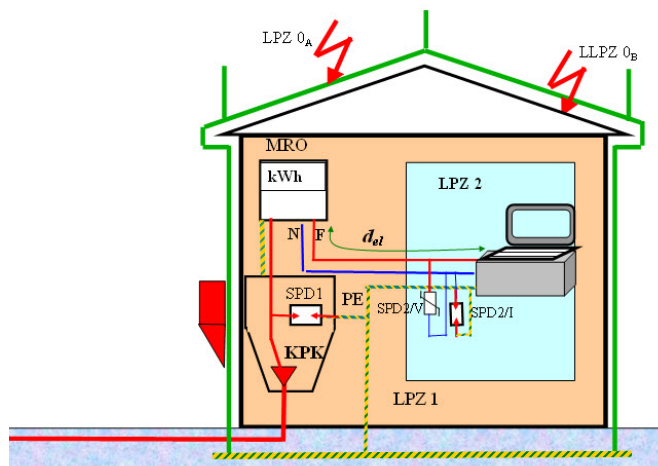
Klasa 1 -Sposobnost odvođenja velike energije (zovu se odvodnici struje), jer mogu da provedu struje čak i do 200 kA. Rade na dva principa:

- Koriste se iskrišta, tako da nakon reagovanja napon pada na nulu, a nastaje kratak spoj u mreži, koji se mora prekinuti. Ukoliko ne gasi sam uređaj luk, mora se predvodeti osigurač ispred SPD koji prekida struju kratkog spoja.
- Koriste se varistori koji su sposobni da podnesu velike udarne struje, koji ne prave kratak spoj, već zadržavaju napon na konstantnom nivou.

Klasa 2 -Ograničavaju napon u mreži (odvodnici prenapona). Koriste se varistori koji ograničavaju napon na preostalu vrednost napona.

Klasa 3 -Imaju manju energetska sposobnost, a veću brzinu delovanja, koriste se ispred jako osetljivih uređaja, a bazirani su na brzim Zener diodama.

Na slici F.10 prikazane su zone zaštite objekta zaštićenog spoljašnjom i unutrašnom zaštitom.

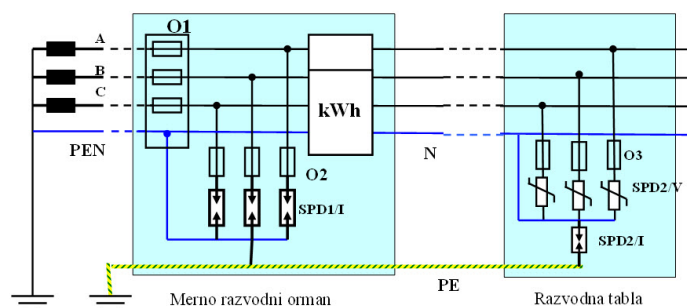


Slika F.10: Crtež analiziranog objekta sa označenim zonama zaštite

Na slici su prikazane zone zaštite LPZ 1 i LPZ 2. Na granici LPZ 0A i LPZ 1 (KPK) postavljen je SPD uređaj klase 1 sa iskrištem, a u prostoru sa računarom koji predstavlja LPZ 2 postavljen je SPD2/V uređaj na bazi varistora između faze i N, a između N i PE postavljen je SPD2/I na bazi iskrišta. Objekat koji se štiti je desktop računar sa metalnim kućištem, koji se napaja direktno iz mreže.

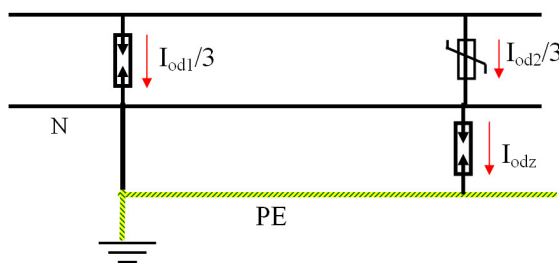
Na slici F.11 prikazana je koordinacija primenjenih SPD na granici LPZ 0 i LPZ 1, odnosno LPZ 1 i LPZ 2 u trofaznoj šemi.

Oznaka SPD1/I označava strujni odvodnik, koji je sposoban da odvede veliku struju prema zemlji, a SPD1/V ili SPD2/V označavaju prenaponske zaštite koje ograničavaju prenapone.



Slika F.11: Koordinacija primenjenih SPD na granici LPZ 0 i LPS 1, odnosno LPZ 1 i LPZ 2

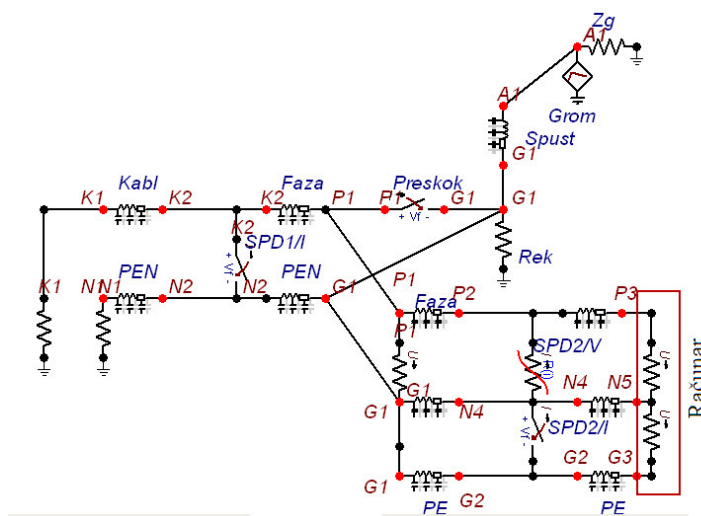
Da bi se proračun pojednostavio, trofazni napojni kabl sa neutralnim provodnikom (četvorožilni kabl TN-C sistema) se u ekvivalentnoj šemi zamenjuje sa faznim i neutralnim provodnikom. U samoj zgradi se primenjuje TN-S sistem, odnosno neutralni provodnik N se odvaja od zaštitne zemlje PE. Zbog toga se u prvom stepenu zaštite na ulazu u objekat (najčešće u KPK ili u MRO ispred brojila primenjuje zaštita između faze i PEN. Kroz SPD protiče trećina struje odvođenja $I_{od1}/3$, jer se struja deli između 3 faze koje su ekvivalentirane jednim provodnikom i teče prema zajedničkom PEN. U drugom stepenu zaštite SPD između faze i N odvodi $I_{od2}/3$, dok SPD između N i PE odvodi punu struju I_{odz} prema zemlji. U proračunima se formira ekvivalentna šema sa ekvivalentnim SPD za 3 faze, kroz koji se izračunava struja, koja se naknadno deli sa 3. Na slici F.12 prikazana je ekvivalentna jednopolna šema trofaznog sistema dvostepene zaštite sa slike F.11.



Slika F.12: Ekvivalentna jednopolna šema trofaznog sistema dvostepene zaštite

Na slici F.13 prikazana je ekranska slika ekvivalentne zamenska šema iz programa ATPdraw sa jednopolno prikazanim trofaznim instalacijama. Kompletna gromobrnska instalacija je ekvivalentirana jednim spustom i jednim otporom rasprostiranja uzemljivača prema poglavlju F.3.4. Na slici su označeni preskok u KPK, trofazni napojni kabl prikazan jednopolno, prenaponski zaštitni uređaji SPD1/I (odvodnik struje), SPD2/V (odvodnik prenapona) i SPD2/I (odvodnik struje) i štice objekat (računar) velike ulazne impedanse usvojene vrednosti 100 kΩ. Predpostavljeno je da se radi o desktop računaru sa metalnim kućištem, zbog čega se napaja sa monofaznim sistemom za PE provodnikom.

Sistem je nulovan do granice LPZ0/LPZ1, tako da se zaštitni uređaji postavljaju



Slika F.13: Ekranski prikaz iz programa ATPDraw kompletne električne šeme sa označnim elementima

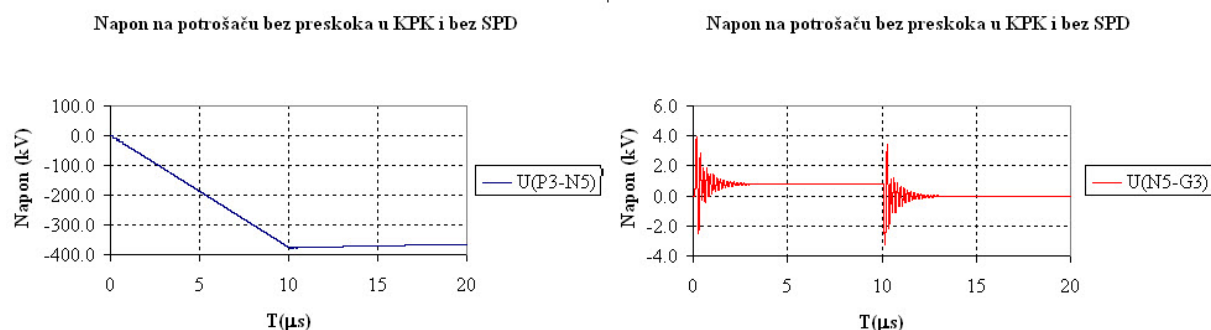
između faze i PEN provodnika (TN-C sistem), a zgradi je TN-S sistem sa razdvojenom nulom i PE. Na granici LPZ1/LPZ2 stavljaaju se SPD2/V na bazi varistora između faze i N i SPD2/I između N i PE. Pri tome veze do potrošača mogu biti monofazne ili trofazne. Struje kroz SPD1/I i SPD2/V koje su dobijene proračunom se dele sa 3, jer su SPD u 3 faze ekvivalentirani jednim uređajem. U tački G1 vrši se razdvajanje PE i N provodnika.

F.6.2 Analiza sistema bez prenaponske zaštite pod pretpostavkom da ne dolaze do preskoka u KPK

Izvršen je proračun sa strujom atmosferskog udara 105.9 kA, što pripada klasi III LPS a u skladu je i sa dimenzijama mreže spoljašnje gromobranske zaštite. Izvršena je korekcija struje pražnjenja od 100 kA zbog ekvivalentiziranja spoljašnje gromobranske instalacije objekta jednim spustom. U prvoj varijanti nije uopšte sprovedena gromobranska zaštita, tako da se prenaponski zaštitni uređaji SPD1/I, SPD2/V i SPD2/I uopšte ne koriste. Takođe je pretpostavljeno da u KPK ne dolazi uopšte do preskoka, odnosno grana P1-G1 je uklonjena na slici F.13.

Talasni oblici napona na potrošaču između faze u N (grana P3-N5) i između N i PE (grana N5-G3) prikazani su na slici F.14.

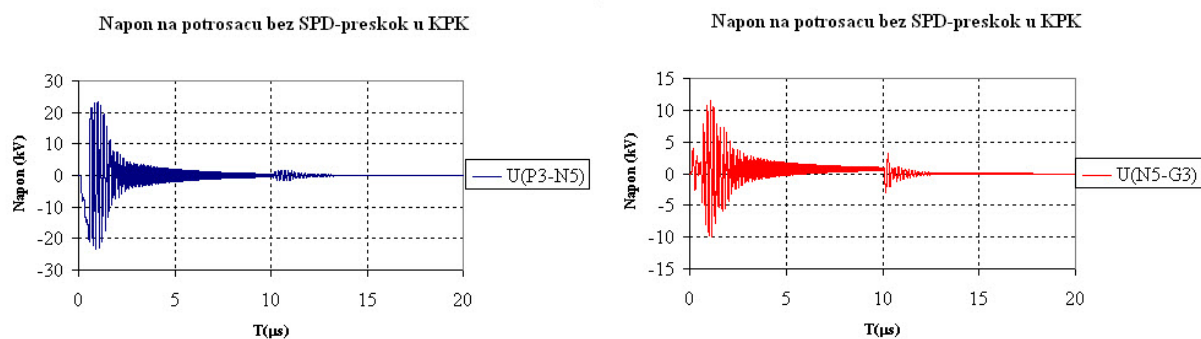
Sa slike se može videti da bi se na objektu analize u grani P3-N5 pojavio napon od skoro 380 kV, što bi sigurno negde ispred potrošača izazvalo proboj. Napon između N i zemlje PE je oko 4 kV. Proračun pokazuje da je prenaponska zaštita neophodna.



Slika F.14: Talasni oblici napona u grani P3-N5 i N5-G3 kada nema preskoka u KPK

F.6.3 Modelovanje sistema sa preskokom u KPK bez prenaponske zaštite

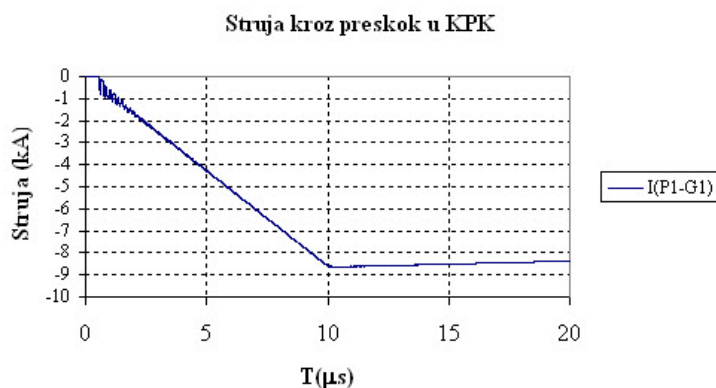
Urađena je simulacija kada se modeluje preskok unutar KPK pri naponu od 12 kV, a ne koriste se prenaponska zaštita. Na slici F.15 prikazan je talasni oblik napona grani P3-N5 između faze i neutralnog provodnika N (levo), kao i napon prema zemlji na grani N5-G3 (desno). U slučaju kada je uređaj koji se štiti u izolacionom kućištu, napajanje se vrši preko pretvarača koji daju nizak jednosmerni napon za napajanje, a sam pretvarač se napaja trožilnim kablom, pa je potrebno vršiti zaštitu faza-N i N-PE, da bi se pretvarački sklop zaštitio. To je slučaj kod laptop računara, televizora i drugih uređaja koji su u izolacionom kućištu. Desktop računari su u metalnom kućištu i napajaju se trožilnim kablom faza-N-PE, pa je potrebno sprovesti i zaštitu između N i PE.



Slika F.15: Talasni oblik napona na objektu P3-N5 (levo) i napon prema zemlji na grani N5-G3 (desno) kada se ne primenjuje zaštita, a postoji preskok u KPK

Na slici F.16 prikazan je talasni oblik struje kroz mesto preskoka u KPK kada ne postoji nijedna prenaponska zaštita u objektu

Sa slike F.16 se vidi da kroz mesto preskoka P1-G1 protiče struja ka izvoru napajanja, amplitude oko 8.7 kA, talasnog oblika koje je veoma sličan talasnom obliku struje



Slika F.16: Struja kroz mesto preskoka u KPK kada ne postoji nijedna prenaponska zaštita u objektu

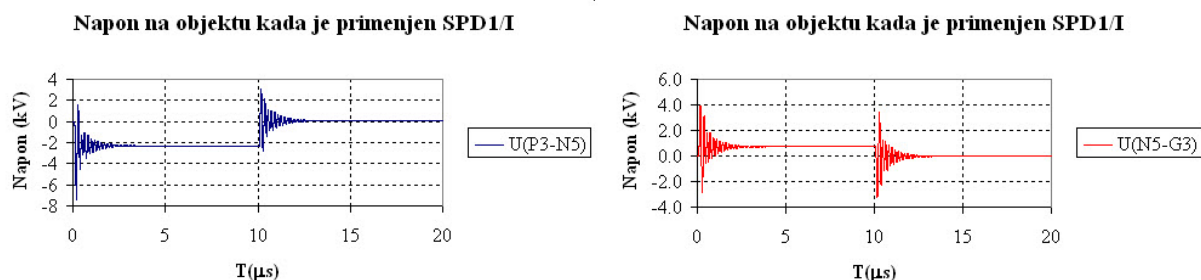
atmosferskog pražnjenja. Preskok u KPK redukuje napone, ali su oni dovoljno visoki da mogu da oštete objekat.

F.6.4 Analiza sistema sa prenaponskom zaštitom na ulazu u objekat

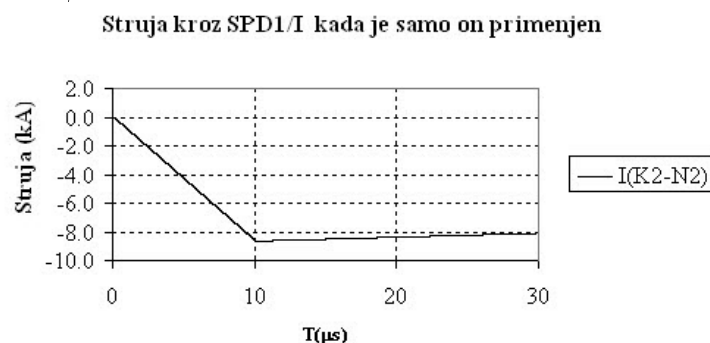
Na slici F.17 prikazani su naponi između tačaka P3-N5 kada se primenjuje samo SPD1/I sa iskrištem na ulazu napajanja u objekat. Na slici levo prikazan je napon između tačaka P3-N5 na objektu analize, a na slici desno prikazan je napon neutralnog provodnika prema zemlji N5-G3 na mestu objekta. Može se uočiti prelazni proces na naponskoj krivoj u trenutku kada iskrište reaguje i u trenutku $T = 10 \mu s$ kada prestaje čelo talasa. Pošto model talasa struje sa linearno rastućim čelom i linearno opadajućim začeljem ima naglu promenu strmine strujnog talasa sa pozitivne na čelu na negativnu u trenutku maksimuma, to izaziva dodatni prelazni režim koji se može izbeći promenom oblika talasa, ali to ne može da utiče na krajnje rezultate proračuna. Na slici F.18 prikazan je strujni talas koji protiče kroz SPD1/I, čiji je oblik talasa gotovo identičan strujnom talasu groma. Važno je izračunati maksimalnu struju kroz SPD da bi se odredila maksimalna udarna podnosiva struja. Provera se radi strujom oblika 10/350 μs . Izračunata udarna struja kroz SPD je 8.6 kA.

F.6.5 Analiza sistema sa 2 nivoa prenaponske zaštite

Na slici F.19 levo prikazan je talasni oblik napona na objektu, odnosno na grani P3-N5 kada se primenjuje SPD1/I na bazi iskrišta i SPD2/V na bazi varistora. Na slici desno prikazana je prikazan je talasni oblik napona na grani N5-G3 neutralnog provodnika



Slika F.17: Napon između tačaka P3-N5 (levo) i između tačaka N5-G3 (desno) kada se primenjuje samo SPD1/I sa iskrištem



Slika F.18: Talasni oblik strujnog talasa kroz SPD1/I kada se samo on primenjuje

N prema zemlji PE. Na slici F.20 prikazane su struje kroz SPD1/I i SPD2/I kada se primenjuju dva nivoa zaštite. Može se uočiti da je struja kroz SPD2/I značajno manja od struje kroz SPD1/I. Na slici F.21 prikazan je talasni oblik struje kroz prenaponski zaštitni uređaj SPD2/V u grani P2-N4.

Može se uočiti da napon na objektu ne prelazi 1.73 kV kada se primenjuju dve prenaponske zaštite.

U tabeli F.9 prikazani su maksimalni naponi i struje kada se ne primenjuje prenaponska zaštita i ne dolazi do preskoka u KPK, kada dolazi do preskoka u KPK i ne primenjuju se zaštite, kada se primenjuje samo SPD1 i kada se primenjuje i SPD1 i SPD2.

Na osnovu primera se može zaključiti da se potpuna zaštita postiže višestepenom primenom SPD. Pri tome je SPD1/I baziran na iskrištu deklarisan kao uređaj klase 1 više strujno i energetski opterećen od SPD2/I i SPD2/V uređaja klase 2. Kada se primeni SPD1/I, sprečava se preskok u KPK.

Tabela F.9: Maksimalni naponi i struje kroz zaštitu u zavisnosti od primenjene prenaponske zaštite

Upotrebljena zaštita	Bez presk. u KPK	Bez SPD	samo SPD1/I	SPD1/I + SPD2/V+SPD2/I
Napon na P3-N5 (kV)	378.9	24.4	7.46	1.73
Napon na N5-G3 (kV)	3.28	11.5	3.9	2.14
Struja kroz SPD1/I (kA)			8.6	8.5
Struje kroz SPD1/I i SPD2/I (kA)				0.88
Struja kroz SPD2/V (kA)				0.042
Struja kroz preskok (kA)	nema	8.7	nema	nema

F.7 Zaključak

Na osnovu predhodne analize se može izvršiti izbor prenaponskih zaštitnih uređaja.

SPD1 - klasa zaštite 1 Karakteristike SPD1/I date su u tabeli F.10

Tabela F.10: Tabela karakteristika uređaja SPD1/I na bazi iskrišta

Tip 1	Klasa I	
Nominalni napon 50 Hz	U_n (V)	230
Maksimalni radni napon	U_m (V)	255
Udarna struja pražnjenja	I_{imp} (10/350 μ s) (kA)	12.5
Zaštitni nivo (L-N)	U_p (kV)	2.5
Vreme odziva	t_a	<100 ns
Sposobnost gašenja propratne struje nakon reagovanja	I_{ef} (kA)	25 kA
Maksimalni osigurač prema izvoru	I_{osig} (A)	125
Opseg radne temperature	-40	+85
Zaštita od stranih tela i vlage		IP 20

Kod SPD na bazi iskrišta mora se obezbediti osigurač ispred SPD da prekine struju KS koja nastaje nakon reagovanja iskrišta. Neki od SPD uređaja imaju efikasan sistem za gašenje luka nakon reagovanja. Neki od SPD uređaja su snabdeveni sa daljinskom dojavom kvara SPD uređaja, a neki imaju na sebi indikaciju kvara.

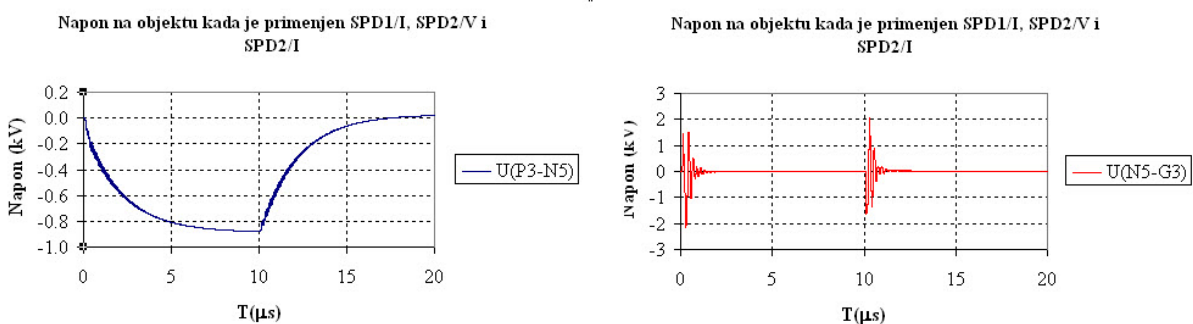
SPD2 - klasa zaštite 3 U tabeli F.11 dati su podaci za uređaj ispred krajnjeg potrošača.

Tabela F.11: Tabela karakteristika uređaja SPD2/V na bazi varistora

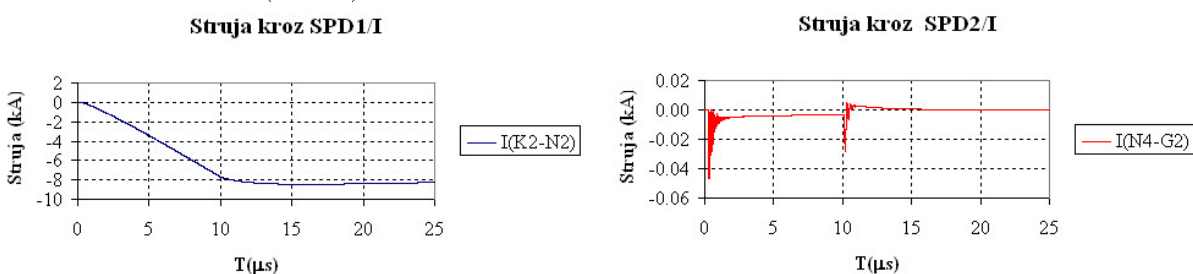
Tip 3	Klasa III	
Nominalni napon 50 Hz	U_n (V)	230
Maksimalni radni napon	U_m (V)	255
Udarna struja pražnjenja F-N	I_f (A) (8/20) μ s) (kA)	3
Ukupna struja pražnjenja N-PE	I_t (A) (8/20) μ s) (kA)	8
Zaštitni nivo (F-N)	U_{pf} (kV)	1
Zaštitni nivo (N-PE)	U_{pe} (kV)	1.5
Vreme odziva (F-N)	t_a	< 25 ns
Vreme odziva (N-PE)	t_a	< 100 ns
Sposobnost prekidanja struje KS	I_{ef} (kA)	6 kA
Maksimalni osigurač prema izvoru	I_{osig} (A)	25
Maksimalni privremeni prenaponi	TOV(F-N) (V) za 5 s	335
Opseg radne temperature	-40	+85
Zaštita od stranih tela i vlage		IP20

Zahvalnica

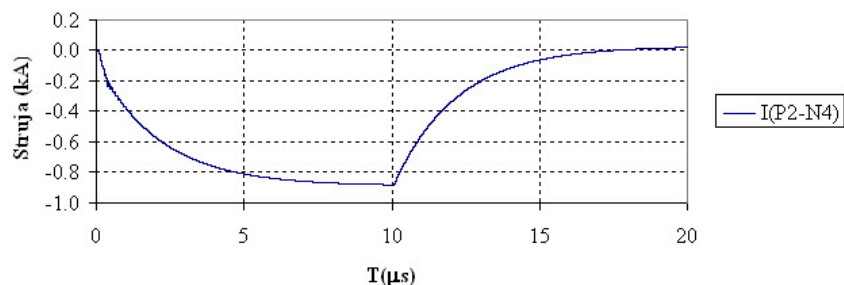
Primer je nastao na modifikacijom studije Analiza gromobranske zaštite i elektromagnet-ske kompatibilnosti Regionalnog centra za održavanje državnih puteva i centra za upra-vljanje saobraćajem u Nišu. Studija je rađena za Šidprojekt d.o.o, Kneza Miloša 2, Šid. Investor JP "Putevi Srbije", 2019 god.



Slika F.19: Talasni oblik napona na otporniku P3-N5 kada se primenjuje SPD1/I i SPD2/V SPD2/I (levo) i talasni oblik napona na grani N5-G3 neutralnog provodnika N prema zemlji PE (desno)



Slika F.20: Struje kroz SPD1/I (K2-N2) i kroz SPD2/I (P2-N4)



Slika F.21: Talasni oblik struje kroz prenaponski zaštitni uređaj SPD2/V u grani P2-N4