

## Dodatak B

# Udar u gromobransku instalaciju objekta

## B.1 Opis objekta i problema koji se pojavljivao

U industrijskom objektu se dogodio veći broj kvarova suvih transformatora 10/0.4 kV za vreme grmljavinskih oluja. Izvršena je analiza sa ciljem da se utvrdi uzrok kvarova i odgovarajućim merama spreči ponavljanje. Utvrđeno je da atmosferski prenaponi usled udara u nadzemni deo mešovitog voda 10 kV, koji se kablovskim prilazom vodi do objekta nisu uzrok havarija. Stoga je analiziran samo slučaj kada atmosferski prenaponi nastaju direktnim pražnjenjem u gromobransku instalaciju zgrade industrijskog objekta. Na slici B.1 prikazan je objekat sa bočne strane (levo) i odozgo (desno) sa dimenzijama u (m) i označenim gromobranskim prihvatnim sistemom u obliku mreže i spusnim provodnicima do uzemljivača u obliku prstena oko objekta, koji je nacrtan isprekidanom linijom.

*D* - kućica za lift zajedno sa dimnjakom, koji su 4 m iznad krova prvog sprata,

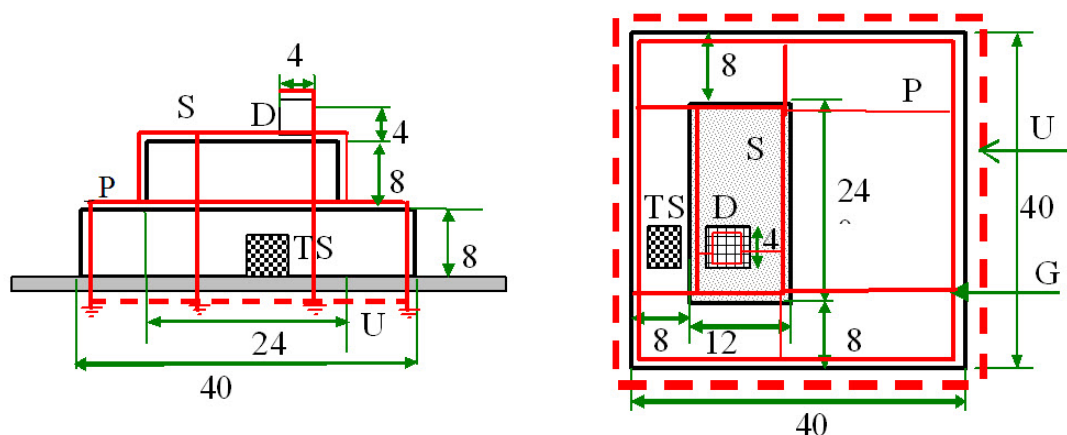
*G* - gromobranski prihvatni sistem,

*U* - uzemljivačka traka oko celog objekta,

*TS* -transformatorska stanica koja se nalazi u suterenu objekta, koja je više puta bila ugrožena od atmosferskih prenapona,

*P* - ravna površina krova prizemlja,

*S* - ravna površina prvog sprata.



Slika B.1: Prikaz objekta sa strane (levo) i iz ptičje perspektive (desno)

Sa svake strane duž objekta predviđen je na svakih 20 m po jedan spust koji je uzemljen vezivanjem na pravougaonu uzemljivačku traku oko objekta, označenu na slovom  $U$  i isprekidanim kvadratom na desnoj strani slike. Sve dimenzije objekta su date na slikama u metrima.

Na osnovu slike B.1 nacrtana je šema kompletne gromobranke instalacije koja obuhvata prihvatni sistem i spusne provodnike. Uzemljivački sistem nije modelovan trakom oko objekta, već koncentrisanim otpornicima koji ekvivalentiraju udarnu impedansu uzemljivača. Svaki spust se završava ekvivalentnim otpornikom koji ekvivalentira deo prstenastog uzemljivača. Vrednost otpora na kraju svakog spusta  $R_{uz} = R_{obj} \times N$ , gde je  $R_{obj}$  otpornost kompletnog prstenastog uzemljivača, a  $N$  broj ekvivalentnih otpornika na kraju svakog od spusteva. Izgled spoljašnje gromobranske instalacije skiciran je na slici B.2. Usvojene su karakteristične impedanse traka prihvatnih i spusnih provodnika je  $255 \Omega$ .

Napojni transformator postavljen je u donjem delu objekta. Na slici B.3 prikazana je ćelija u kojoj je smešten suvi transformator 10/0.4 kV.

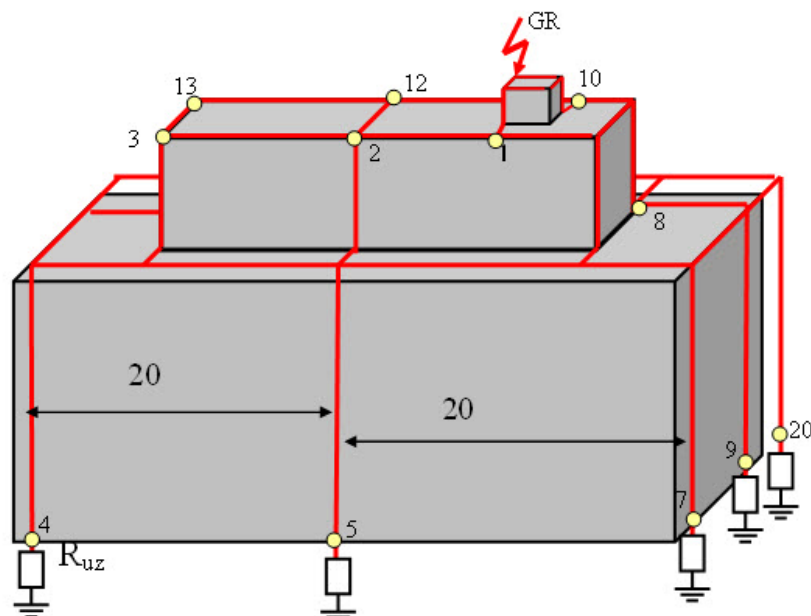
Oznake na slici B.3 imaju sledeće značenje:

**TR** -transformator,

**Sab** -sabirnice,

**OP** -odvodnik prenapona,

**Z** -traka za uzemljenje.



Slika B.2: Skica spoljašnje gromobranske instalacije

Dužina veze između uzemljenog kraja odvodnika prenapona i uzemljenja transformatora je 15 m, jer se vodi preko tavanice i bočnog zida do trake na podu. Dužina veze između krajeva odvodnika prenapona i priključaka transformatora je oko 3 m. Odvodnici prenapona su pričvršćeni za tavanicu čelije i vezani za sabirničke šine. Na slici B.4 prikazana je zamenska šema sistema za koji je izvršen proračun prenapona. Posmatran je jedan spust koji direktno vodi od dimnjaka do uzemljivača u tački koja je najbliža tački uzemljenja transformatora. Predpostavljen je udar groma u prihvatni sistem gromobranske instalacije na vrhu dimnjaka. Na slici levo prikazana je teorijska zamenska šema gromobranske instalacije, a na slici desno primenjeni deo šeme za proračun.

Oznake na slici B.4 imaju sledeće značenje:

$V_S$  - spusni provodnici dužine  $d_S = 16$  m,

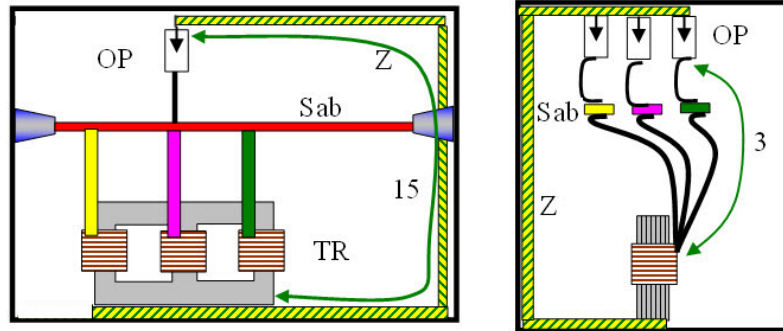
$V_H$  - horizontalni provodnici prihvatnog sistema dužine  $d_S = 20$  m,

$d_z$  - dužina veze od priključka odvodnika do transformatora  $d_z = 3$  m,

$d_T$  - dužina veze između odvodnika prenapona koji štiti transformator do uzemljivača na koji je povezano kućište transformatora. Ova dužina je procenjena na  $d_3 = 15$  m,

$C_T$  - Kondenzator koji zamenjuje kapacitivnost namotaja transformatora od 3 nF,

$R_{uz}$  - udarna impedansa uzemljenja koja je procenjena na  $R_{uz} = 30 \Omega$  po svakom spustu,



Slika B.3: Čelija sa suvim energetske transformatorom sa označenim odvodnicima prenapona, sabirnicama i trakom za uzemljenje

$OP$  - odvodnik prenapona,

$Z_{K10}$  - otpornik čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi 10 kV kabla kojim se transformator napaja. Predpostavljeno je da je kabl dovoljno dugačak da se ne pojavljuju procesi višestrukih refleksija za vreme trajanja prenapona. Karakteristična impedansa kabla je usvojena da iznosi  $Z_K = 20 \Omega$ .

Udarne impedansa uzemljenja određena je na sledeći način:

Za specifičnu otpornost tla od  $\rho = 254 \Omega\text{m}$  ukupna otpornost rasprostiranja uzemljivača u obliku kvadratne trake oko objekta dimenzija  $40 \times 40$  m izračunata je na osnovu izraza 7.64, na strani 222, za otpornost uzemljenja prstenastog uzemljivača.

$$R_{uk} = \frac{2 \cdot \rho}{3D_{ekv}} = \frac{2 \times 254}{3 \times 22.6} = 3.75 \Omega \quad (\text{B.1})$$

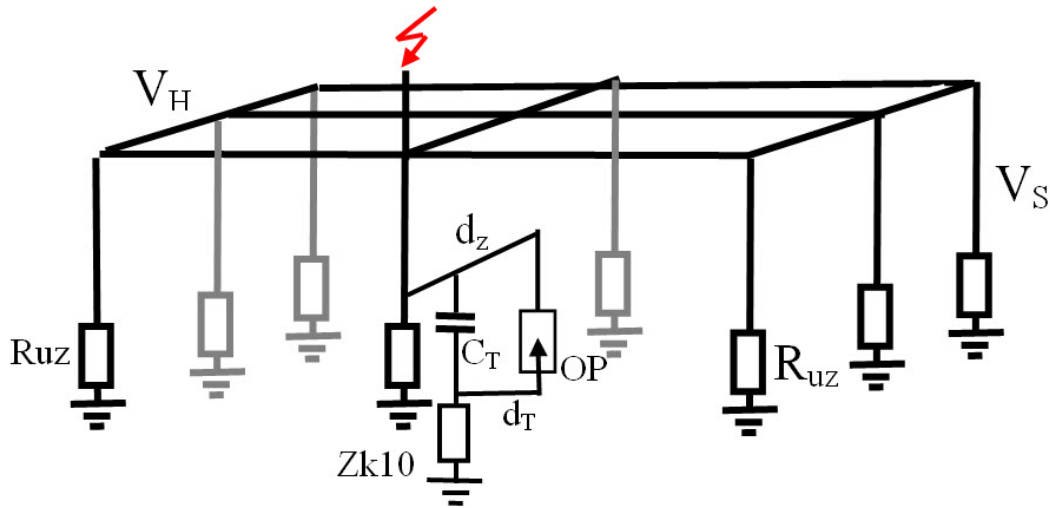
U predhodnom izrazu je ekvivalentni prečnik kruga izračunat na osnovu izraza 7.63 na strani 222, odnosno:

$$D_{ekv} = 1.13 \cdot \sqrt{A} = 1.13 \times 40 = 45.2 \text{ m} \quad (\text{B.2})$$

Ukupna dužina uzemljivačkog prstena je  $d_{uk} = 4 \times 40 = 160$  m. Otpornost rasprostiranja po 1 m dužine uzemljivača je:

$$R_1 = R_{uk} \times d_{uk} = 600 \Omega \quad (\text{B.3})$$

Ako se ukupna otpornost uzemljivača  $R_{uk}$  raspodeli na 8 koncentrisanih otpornika na krajevima svakog od spusteva, u tom se slučaju može se uvesti dužina uzemljivačke trake koja odgovara jednom spustu, za koju se izračunava otpornost ekvivalentnog otpornika. Svakom spustu odgovara dužina uzemljivačke trake od  $d_{uk}/8 = 20$  m, odnosno od svakog



Slika B.4: Šema gromobranske instalacije sa ucrtanim svim prihvatnim i spusnim provodnicima, otporima uzemljenja, priključkom transformatora i odvodnikom prenapona

spusta se na obe strane 10 m trake modeluju jednim otpornikom. Otpornost svakog pojedinačnog otpornika  $R_{uz} = R_{uk}/20 = 30 \Omega$ .

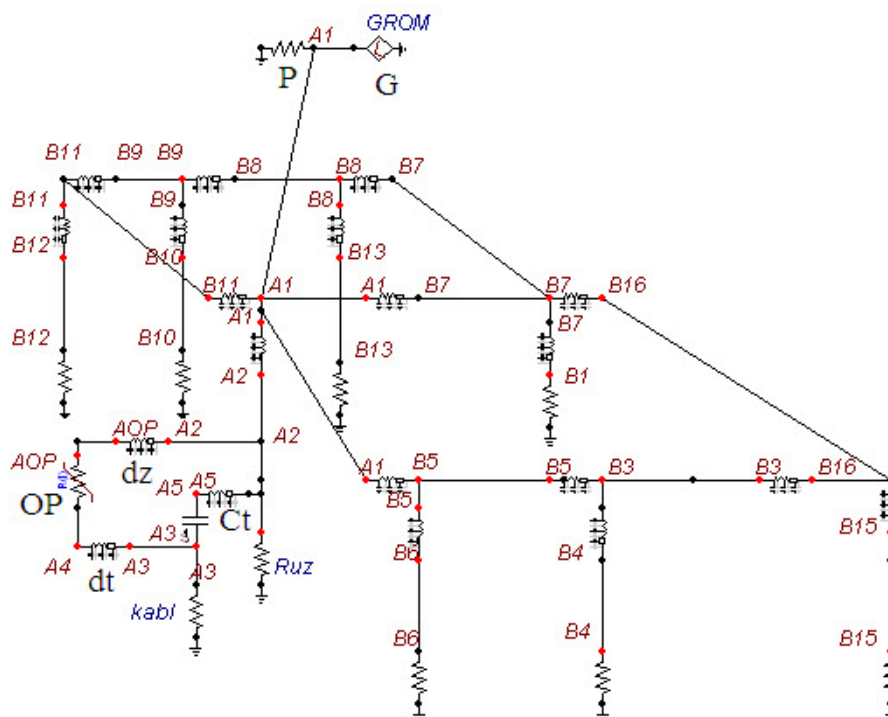
## B.2 Deterministički proračun pre optimizacije zaštite

Izvršena je simulacija prelaznog procesa usled atmosferskog pražnjenja primenom programa EMTP-ATP. Na slici B.5 prikazan je ekranski izgled kompletne šeme za proračun sa 8 gromobranskih spusteva.

Predpostavljen je udar groma amplitude 121 kA prema šemi na slici B.5 označen slovom  $G$ . Karakteristična impedansa kanala pražnjenja, koja je obeležena sa  $P$ , iznosi  $400 \Omega$ . Vreme čela talasa struje je usvojeno da bude  $T_f = 1.2 \mu s$ . Na slici B.6 prikazan je talasni oblik napona na transformatoru koji se nalazi u suterenu ispod dimnjaka na kome je tačka pražnjena. Usvojena je amplituda struje atmosferskog pražnjenja od 121 kA odgovara amplitudi struje prvih negativnih udara koja može biti prevaziđena verovatnoćom od 2 %, prema [43].

Maksimalni izračunati prenapon na transformatoru usled udara u grombransku hvaljku na vrhu dimnjaka iznosi  $U_{max} = 347.5 \text{ kV}$ , što je više od podnosivog napona izolacije transformatora, koji iznosi 75 kV.

Verovatnoća pojavljivanja struje od 121 kA koja izaziva ovoliki prenapon je 2 %. Iz tog razloga se mora izvršiti statistička analiza da bi se utvrdila verovatnoća pojavljivanja



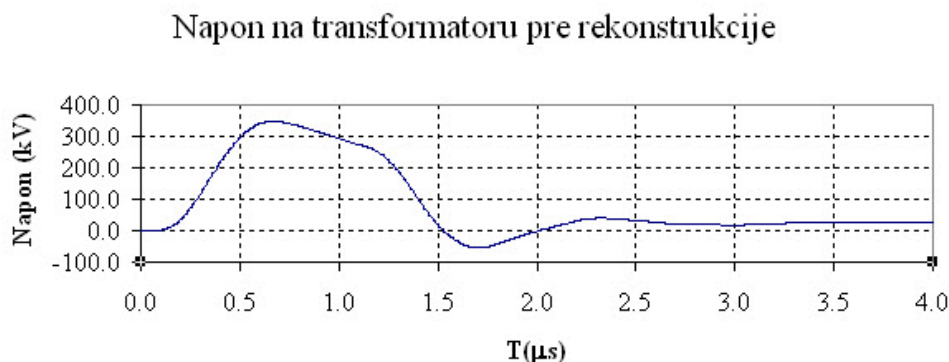
Slika B.5: Ekranski prikaz šeme po kojoj je vršen proračun

struje koja će izazvati prenapone koji premašuju 75 kV.

## B.3 Rešenje problema ugroženosti transformatora.

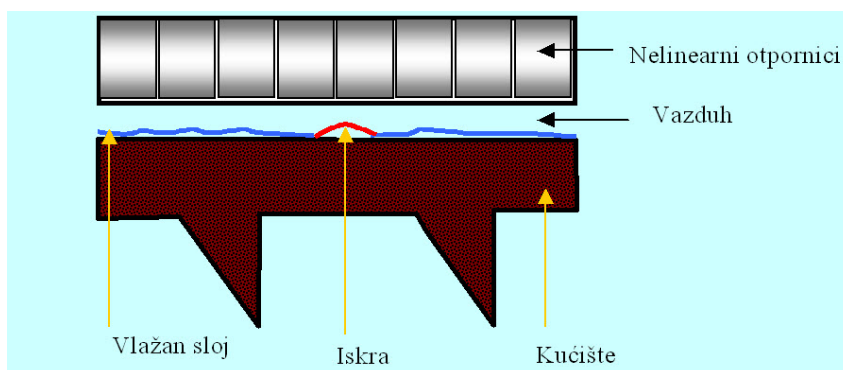
### B.3.1 Problem u radu starih tipova odvodnika prenapona u porculanskim kućištu

Silicijum karbidni odvodnici i prve konstrukcije ZnO odvodnika prenapona rađene su u porculanskim kućištima, sa vazдушnim zazorom između aktivnog dela (redne veze nelinearnih otpornika) i kućišta. Kod konstrukcija odvodnika u porculanskom kućištu pojavljuje se problem zaptivanja na mestu gde se spaja metalna priрубnica na vrhu i dnu odvodnika sa porculanom. Spajanje se obavlja pomoću specijalnog cementa. Ukoliko zaptivanje oslabi, dolazi u toku dana kada se odvodnik greje zbog sunčanog zračenja, do ispuštanja vazduha. U toku noći se odvodnik hladi, pritisak u procepu između porculana i aktivnog dela se smanjuje ispod spoljašnjeg atmosferskog pritiska i dolazi do usisavanja hladnog vazduha koji može da sadrži vlagu. Proces se ponavlja u ciklusima, gde se svaki put izbacuje topao vazduh bez vlage u toku dana, a u toku noći usisava vlažan vazduh. Vлага se



Slika B.6: Talasni oblik napona na transformatoru usled atmosferskog pražnjenja u gromobransku hvataljku na vrhu dimnjaka objekta tačno iznad transformatora u suterenu

kondenzuje na unutrašnjim zidovima kućišta, kao na slici B.7. Kroz tanak sloj vlage protiče mala struja, koja može da na pojedinim mestima izazove isušivanje vlage i parcijalni preskok u obliku iskre, kao na slici B.7.



Slika B.7: Skica kondenzovane vlage po zidu odvodnika prenapona i formiranje parcijalnog preskoka

Obeležimo otpornost po jedinici vlažnog sloja oznakom  $R_{v1}$ , a oznakom  $R_{i1}$  otpornost iskre po jedinici dužine. Neka je dužina vlažnog sloja po površini izolatora pre pojave iskre  $d$ , a efektivna vrednost napona u stacionarnom stanju na odvodniku  $U$ . Pod pretpostavkom da je vlažan sloj homogen sa konstantnim otporom po jedinici dužine, u tom slučaju bi efektivna vrednost struje koju bi povlačio vlažan sloj bi bila data izrazom:

$$I = \frac{U}{R_{v1}d} \quad (\text{B.4})$$

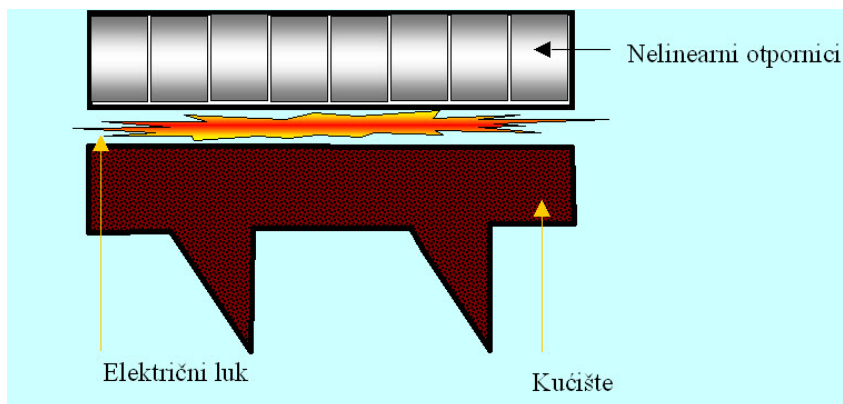
Ukoliko se pojavi iskra dužine  $d_i$ , tada bi ukupna dužina vlažnog sloja bila:

$$d_v = d - d_i \quad (\text{B.5})$$

Ukupna struja u ovom slučaju bila bi ograničena zbirom otpora vlažnog sloja i otpora iskre, odnosno:

$$I = \frac{U}{R_{v1}(d - d_i) + R_{i1}d_i} \quad (\text{B.6})$$

Ukoliko je otpornost po jedinici dužine iskre  $R_{i1}$  manja od otpornosti vlažnog sloja, ukupna otpornost strujnog puta će se smanjiti, a struja povećati. To će izazivati isušivanje vlažnog sloja, proširenje zone parcijalnog preskoka i dalje povećanje struje. Kao rezultat pojave parcijalnog preskoka sa otporom iskre koji je manji od otpornosti vlažnog sloja pojavljuje se na kraju proširenje zone parcijalnog preskoka duž celog unutrašnjeg zida kućišta odvodnika i pojave preskoka duž celog vazdušnog prostora između aktivnog dela odvodnika i kućišta, što rezultira pojavom električnog luka koji prespaja sa unutrašnje strane odvodnik i prouzrokuje kratak spoj, kao na slici B.8.



Slika B.8: Pojava električnog luka u međuprostoru između aktivnog dela odvodnika i kućišta

Električni luk koji se pojavljuje unutar kućišta odvodnika prenapona ima sledeće karakteristike:

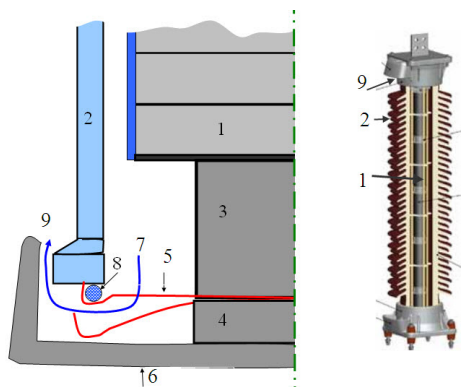
- Kada se pojavi električni luk duž cele unutrašnje strane kućišta, uspostavlja se struja od nekoliko kA do nekoliko desetina kA.
- Temperatura električnog luka kreće se od 3000 do preko 10000°C.
- Zbog naglog širenja vazduha usled visoke temperature pritisak unutar kućišta može da poraste toliko da izazove eksploziju porculanskog kućišta.

Eksplozija kućišta opasna je za okolne uređaje, koji mogu biti oštećeni, kao i za osoblje postrojenja. Iz tog razloga se odvodnik udaljavao od štice objekta (najčešće



transformatora), a sa druge strane zahtevi zaštite od prenapona su nalagali da odvodnik bude što bliže šticeu objektu.

Da bi se sprečile eksplozije odvodnika prenapona, kod odvodnika sa porculanskim kućištem još se primenjuje elastična metalna membrana koja služi za odušak gasova u slučaju nadpritiska. Na slici B.9 prikazan je presek donjeg dela odvodnika sa membranom (levo) i izgled kompletnog odvodnika u porculanskom kućištu sa metal-oksidnim otpornicima, prema [50]. Oznake na slici B.9 imaju sledeće značenje:



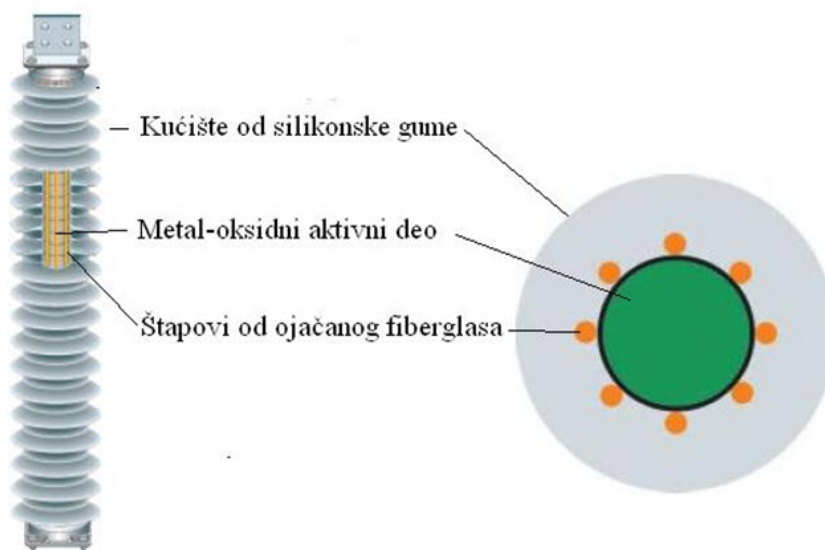
Slika B.9: Presek donjeg dela odvodnika sa membranom

1. Cilindrični rezistori (pogačice) od ZnO,
2. Porculansko kućište,
3. Metalni cilindrični umetak za popunu prostora između stuba koji čini aktivni deo nelinearnih otpornika i metalnog dna odvodnika,
4. Metalni cilindrični umetak koji priteže elastičnu membranu uz cilindar 3,
5. Elastična metalna membrana,
6. Metalno dno odvodnika, za koji se vezuje provodnik za uzemljenje,
7. Mlaz gasova u slučaju nadpritiska i otvaranja membrane,
8. Zaptivka od specijalnog materijala koja zajedno sa elastičnom membranom u normalnom radu drži unutrašnjost odvodnika zaptivenom od uticaja spoljašnjeg vazduha,
9. Otvor za izbacivanje gasova pod pritiskom u slučaju pojave nadpritiska u unutrašnjosti odvodnika prenapona.

Iako danas preovlađuje upotreba odvodnika u polimernim kućištima, kada su u pitanju objekti koji se nalaze u oblastima u kojoj postoji industrija koja izaziva agresivno zagađenje vazduha (jedinjenja azota ili sumpora), iskustva pokazuju da su porculanska kućišta apsolutno neosetljiva na takve uticaje, pa se u tom slučaju daje prednost ovim konstrukcijama.

### B.3.2 Odvodnici prenapona u kućištima o polimernih materijala

Danas se koriste polimerna kućišta, najčešće od silikonske gume, koje potpuno eliminiše opasnost od eksplozija. Naime, na aktivni deo odvodnika od nelinearnih otpornika se direktno izliva materijal od koga je kućište, uz postavljanje mehaničkog ojačanja od fibreglasa u kućište od silikonske gume, koje ne poseduje mehaničku čvrstoću. Konstrukcija je data na slici B.10, gde je prikazana takozvana kavezna konstrukcija odvodnika prenapona [50]. Postoje i drugi načini postizanja mehaničke čvrstoće i obezbeđivanja da ne dolazi



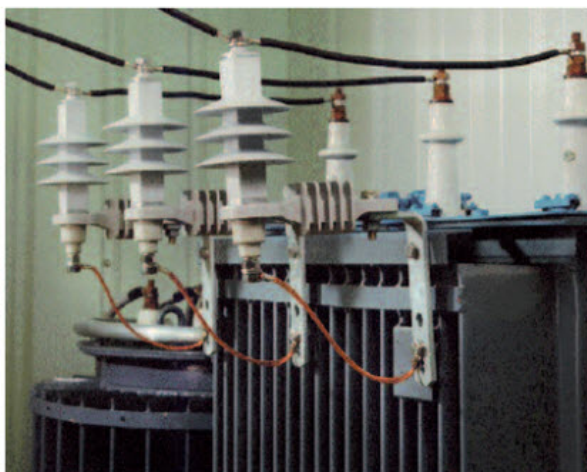
Slika B.10: Kavezna konstrukcija odvodnika prenapona

do internog luka.

Uvođenjem polimernih kućišta za odvodnike prenapona potpuno se izbegava opasnost od eksplozija, jer se kućišta postavljaju bez vazdušnih zazora na aktivni deo odvodnika. Sada ulazi u praksu postavljanje odvodnika direktno na kućište uljnih transformatora ili na uzemljenu konstrukciju suvih, kao što je prikazano na slici B.11

Na slici B.11 prikazana su dva primera instalacije metal-oksidnog (MO) odvodnika na uljnom transformatoru 10/0.4 (levo) i suvom (desno). U oba slučaja odvodnici su fiksirani za uzemljenu konstrukciju transformatora. Odvodnici prenapona služe kao potpore

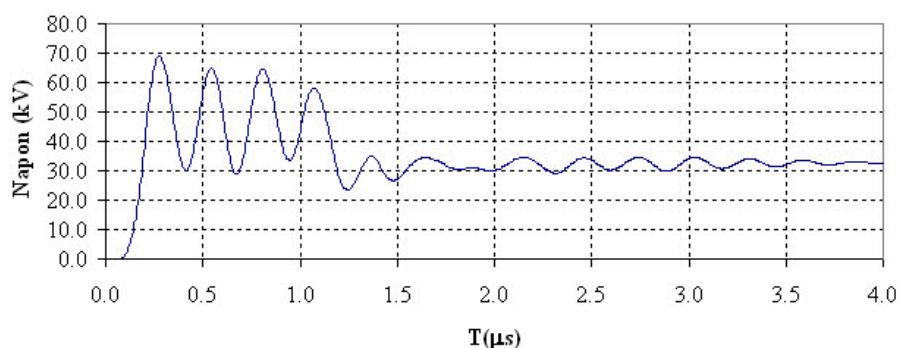
za fiksiranje šina (desno). Sva tri priključka za uzemljenje odvodnika prenapona povezana su savitljivim provodnikom i vezana za šinu za uzemljenje, da bi se izbeglo proticanje velike struje atmosferskog pražnjenja kroz metalnu konstrukciju transformatora. Savitljivi izolovani provodnik pod naponom vodi se od šina pod naponom do priključaka za namotaj (desno).



Slika B.11: 1 Slike uljnog i suvog transformatora sa postavljenim odvodnicima prenapona sa silikonskim kućištima direktno na konstrukciji

Izvršen je proračun prenapona kada je dužina veze od odvodnika do samog priključka transformatora 1 m, kada je struja pražnjenja 121 kA (slučaj sa slike B.11 desno). Vremenski tok napona na transformatoru dat je dat na slici B.12. Maksimalni izračunati prenapon je 72.2 kV što je manje od podnosivih 75 kV.

Napon posle postavljanja OP na transformator



Slika B.12: Vremenski tok napona na zaštićenom transformatoru

Na osnovu analize se mogu doneti sledeći zaključci:

- Električni uređaji u objektu mogu biti ugrožen od atmosferskih udara usled pražnjenja u gromobransku instalaciju samog objekta. To znači da ugroženost električnih instalacija ne mora da nastupi samo od prenapona koji dolaze po priključenim nadzemnim ili kablovskim vodovima.
- Optimalna zaštita transformatora je postavljanje odvodnika prenapona direktno na priključcima transformatora i vezivanje za uzemljeno kućište, stim što se paralelno sa kućištem transformatora vodi velika struja pražnjenja provodnikom odgovarajućeg preseka od donjeg kraja odvodnika do uzemljivača.

## B.4 Rizika kvara izolacije usled udara groma

Statistički prilaz proceni ugroženosti izolacije od atmosferskih prenapona u procesu koordinacije izolacije nekog objekta se sastoji iz sledećih tačaka:

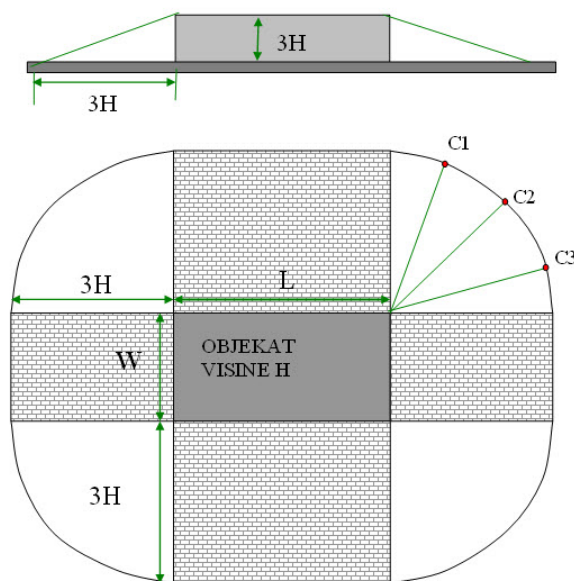
- Procena atraktivne površine objekta,
- Određivanje gustine pražnjenja za analizirano područje,
- Procena minimalne struje pražnjenja koja može da prouzrokuje proboj,
- Određivanje verovatnoće prevazilaženja minimalne struje pražnjenja koja može da prouzrokuje proboj.

Statistički prilaz proceni ugroženosti rizika kvara izolacije od atmosferskog pražnjenja urađen je za transformatora 10/0.4 kV iz primera u poglavlju B.

## B.5 Određivanje atraktivne površine objekta

Atraktivna površina usamljenog objekta na ravnoj površini zemlje se određuje u preseku između površine zemlje i prave linije sa nagibom  $1/3$  koja polazi sa gornje ivice posmatranog objekta, kao na slici B.13 prema standardu [16].

Napravljen je pojednostavljen model analiziranog objekta čija je osnova kvadratna, stranica  $L = 40$  m.



Slika B.13: Skica određivanja atraktivne zone usamljenih objektata na ravnom tlu

Visina II sprata od  $H = 16$  m je usvojena kao srednja visina objekta, a dimnjak na kome se nalazi deo prihvatnog sistema na kome se pretpostavlja da se dogodio udar je na visini  $H_p = 20$  m. Prema standardu [16] atraktivna zona objekta čija je osnova pravougaonik dužine  $L$ , širine  $W$ , a visina pravougloha paralelopipeda  $H$  se može izračunati primenom sledeće formule:

$$A_D = L \times W + 6 \times H \times (W + L) + 9 \times \pi \times H^2 \quad (\text{B.7})$$

Na slici B.1 iz poglavlja B dat je prikaz objekta sa strane (levo) i iz ptičje perspektive (desno).

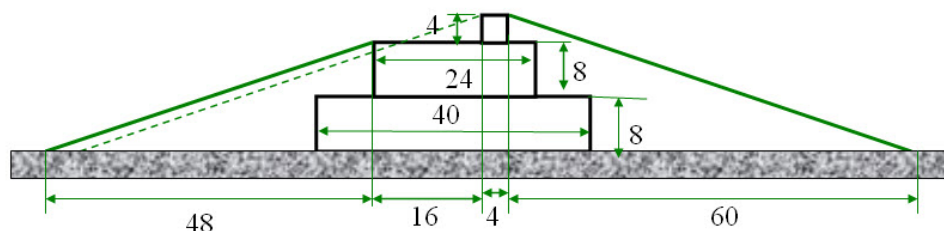
Na slici B.14 prikazano je određivanje prihvatne površine analiziranog objekta sa slike B.1 levo postavljanjem pravih pod nagibom 1:3 posmatrajući analizirani objekat sa bočne strane.

Sa slike B.14 može se uočiti da sa desne strane prihvatnu površinu definiše visina dimnjaka 20 m, pa je širina prihvatne površine 60 m, a sa leve strane prihvatnu površinu definiše visina krova prvog sprata od 16 m, pa je širina prihvatne površine 48 m.

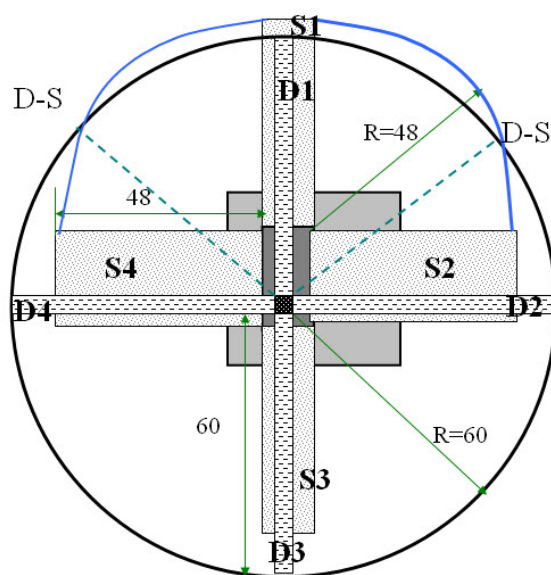
Na slici B.15 prikazana je grafička predstava određivanja prihvatne površine razmatranog objekta posmatrana odozgo, tako da se vide sve prihvatne površine.

Oznake imaju sledeće značenje:

$D1, D2, D3, D4$  - prihvatna površina samo usled uticaja stranice krova kućice za lift  $L1 =$



Slika B.14: Određivanje prihvatne površine objekta postavljanjem prava 1:3 posmatrajući analizirani objekat sa bočne strane



Slika B.15: Određivanje prihvatne površine razmatranog objekta

4 m i  $W = 4$  m, bez rotacije linije oko uglova objekta,

$S1, S2, S3, S4$  - prihvatna površina samo usled uticaja stranice krova sprata  $L2 = 12$  m i  $W2 = 24$  m, bez rotacije linije oko uglova objekta.

U našem slučaju postoje dva pravougaonika koja utiču na prihvatnu površinu. Dominantni uticaj ima kućica za lift i dimnjak, čiji je krov kvadratni, koja imaju sledeće dimenzije.

$$\begin{aligned} L_1 &= 4 \text{ m} \\ W_1 &= 4 \text{ m} \\ H_1 &= 20 \text{ m} \end{aligned} \tag{B.8}$$

Drugi po važnosti je ravan krov prvog sprata koji ima sledeće dimenzije:

$$\begin{aligned} L_2 &= 24 \text{ m} \\ W_2 &= 12 \text{ m} \\ H_2 &= 16 \text{ m} \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

Kada se izračuna prihvatna površina kućice za lift visine 20 m, bez uticaja prvog sprata, dobija se prihvatna površina kućice za lift:  $A_{DL}$ :

$$A_{DL} = 4 \cdot 4 + 6 \cdot 20 \cdot (4 + 4) + 9 \cdot \pi \cdot 20^2 = 16 + 960 + 11310 = 12286 \text{ m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Ako bi se prihvatna površina računala samo na osnovu dimenzija pravouglog paralipipeda koji odgovara prvom spratu, tada bi izračunata površina bila  $A_{DS}$ :

$$A_{DS} = 4 \cdot 4 + 6 \cdot 16 \cdot (24 + 12) + 9 \cdot \pi \cdot 16^2 = 288 + 3456 + 7238 = 10982 \text{ m}^2 \quad (\text{B.11})$$

Vidi se da je izračunata prihvatna zona dimnjaka  $A_{DL}$  veća nego prihvatna zona krova prvog sprata  $A_{DS}$ .

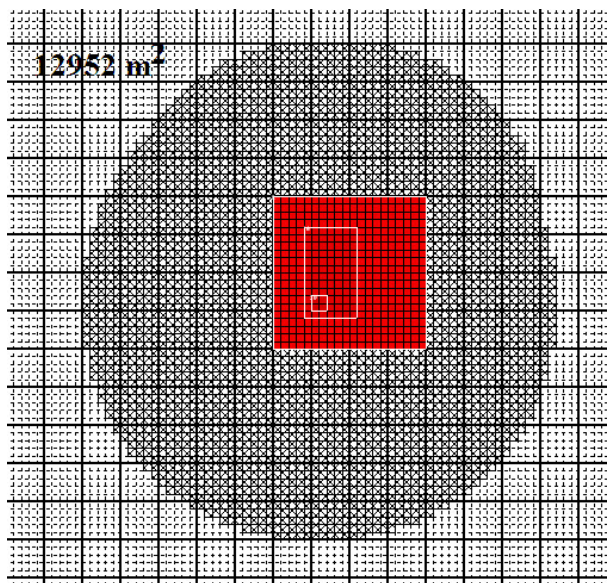
Kada se uzme u obzir i jedna i druga prihvatna površina, tada površina  $S1$  sa gornje strane na slici B.15 potiče od dela ravnog krova koji nije u zoni koju pokriva kućica za lift. Usvojicemo da je aproksimativno uticaj rotacije linije takav da je granica uticaja definisana pravom iz ugla kućice za lift do tačke  $D - S$  na luku kružnice. Od tačke  $D - S$  luk do pravougaonika površine  $S1$  je definisan pravama pod nagibom 1:3 od linije krova prvog sprata sa gornje strane.

Iako je moguće analitički izračunati taj uticaj previšenja koji čini kućica za lift, umesto analitičkog proračuna, korišćen je numerički proračun. Cela horizontalna površina tla oko objekta podeljena je na elementarne kvadrate. Objekat se modeluje postavljanjem iznad svakog kvadrata na površini tla jedan kvadar čija je osnova kocka, a visine odgovara visini tog dela objekta. Na taj način se može objekat veoma složenog oblika modelovati skupom kvadara. Za svaki kvadar se vrši modelovanje prihvatne površine, ali samo oni kvadri koji su na spoljašnjoj strani objekta utiču na prihvatnu površinu. Kvadri koji su unutar objekta i koji su okruženi susednim kvadrima nemaju uticaja.

Na slici B.16 prikazani su rezultati proračuna numeričkom metodom pomoću programa sopstvene izrade, koji je urađen u programskom jeziku Microsoft Visual Basic 6.

Uvećanje prihvatne površine objekta usled dejstva krova prvog sprata u odnosu na rezultate proračuna kada se razmatra samo kućica za lift  $D$  je:

$$k = \frac{12952}{12286} = 1.054$$

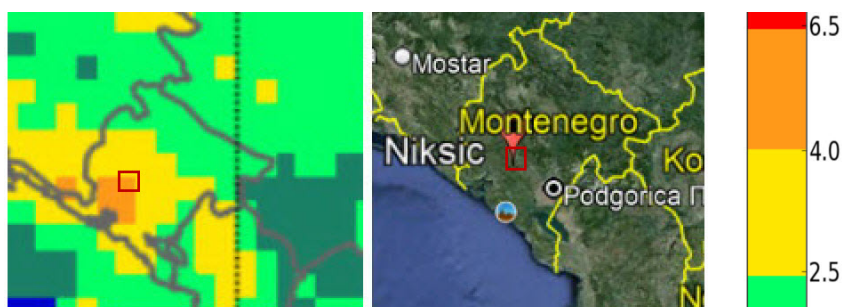


Slika B.16: Numerički određena prihvatna površina kompletnog objekta uvažavajući prizemlje, sprat i kućicu za lift

Može se smatrati da je ovaj uticaj mali.

## B.6 Godišnja gustina pražnjenja i broj udara u objekat

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja dobijena je na osnovu sistema za lokaciju pražnjeja koja pripadaju sistemu EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection). U [103] su dati rezultati sakupljanja podataka za područje Evrope o gustini atmosferskih pražnjenja u periodu 2008 do 2012 god. Na slici B.17 prikazana je jako uvećana mapa gustine atmosferskih pražnjenja  $N_G$  za područje Crne Gore (levo) i mapa Crne Gore iz Google Earth (desno).



Slika B.17: Mapa gustine atmosferskih pražnjenja  $N_G$  za područje Crne Gore (levo) i mapa Crne Gore (desno)



Na osnovu skale sa numeričkim vrednostima koje odgovaraju pojedinim bojama usvaja se godišnja gustina pražnjenja po  $1 \text{ km}^2 = 5.25$  za uokvireno područje približne veličine  $15 \times 15 \text{ km}^2$ .

Broj atmosferskih udara za razmatrani objekat izračunat je na osnovu [16] pomoću sledećeg izraza:

$$N_D = N_G \times A_d \times C_D \times 10^{-6} \quad (\text{B.12})$$

gde je:

$N_D$  - ukupan broj udara u objekat u toku 1 godine,

$N_G$  -gustina atmosferskih pražnjenja prema zemlji  $(\text{km}^2 \cdot \text{god})^{-1}$ , prema slici B.17 za uokvirenu oblast srednja vrednost je 5.25 udara po  $\text{km}^2/\text{god}$ .

$A_d$  - prihvatna površina objekta, za naš slučaj je  $A_d = 12952 \text{ m}^2$ .

$C_d$  -faktor lokacije za objekat, koji ima vrednost 1 za horizontalnu površinu zemlje bez okolnih objekata.

Kada se izračuna, dobija se godišnji broj udara u objekat:

$$N_D = 0.068 \text{ udara/god} \quad (\text{B.13})$$

Srednji broj godina bez udara u objekat je:

$$\text{MTBS} = \frac{1}{N_D} \quad (\text{B.14})$$

gde je MTBS skraćenica od engleskog **M**ean **T**ime **B**etween **S**trikes. Kada se izračuna, dobija se MTBS=14.7 god.

## B.7 Minimalna struja pražnjenja koja izaziva kvar

Po metodi koordinacije izolacije koja je opisana u sekciji 8.1.7 na strani 319, varira se amplituda struje atmosferskog pražnjenja od dovoljno velike vrednosti ka manjim vrednostima. Strmina je funkcionalno povezana sa amplitudom struje preko izraza za čelo talasa  $T_f = 0.154 \times I^{0.624}$  za  $I > 20 \text{ kA}$ , što je ranije dato izrazom 6.19, prema [13]. Za svaku struju pražnjenja se izračunava napon na transformatoru i upoređuje sa podnosivim naponom izolacije. Proračun verovatnoće premašenja kritične struje dat je u poglavlju 8.4.6 na strani 357.

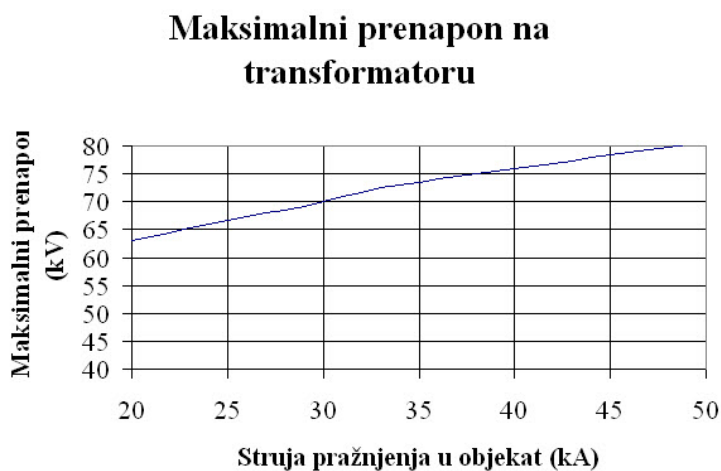
Primer jednog dela tabele sa rezultatima proračuna dat je u tabeli B.1. Proračun je rađen na taj način što je amplituda struje pražnjenja smanjivana za konstantan dekrement i za svaku struju je izračunavan maksimalni napon na transformatoru. Određena je minimalna struja za koju je napon iznad poznosivog napona, koji iznosi 75 kV.

Tabela B.1: Variranje struje od 45 kA na niže i određivanje minimalne amplitude struje koja izaziva proboj pri naponu od 75 kV

Br.	$I_{max}$ (kA)	$T_f$ ( $\mu s$ )	$U_{max}$ (kV)
1	45	1.66E-06	78.4
2	44	1.63E-06	77.9
3	43	1.61E-06	77.4
4	42	1.59E-06	76.9
5	41	1.56E-06	76.4
6	40	1.54E-06	75.9
7	39	1.52E-06	75.5
8	38	1.49E-06	75.0
9	37	1.47E-06	74.5
10	36	1.44E-06	74.0

Sve struje koje su veće ili jednake  $I_{min} = 38$  kA izazivaju proboj izolacije, jer je pri većim strujama napon na izolaciji viši od podnosivog napona izolacije  $U_{iz} = 75$  kV.

Na slici B.18 prikazana je maksimalna vrednost prenapona na transformatoru u funkciji amplitude struje pražnjenja za nešto širi dijapazon struja.



Slika B.18: Dijagram napona na transformatoru u funkciji amplitude struje pražnjenja

## B.8 Određivanje rizika proboja transformatora

Na osnovu tabele B.1 određena je amplituda struje od  $I_{min} = 38$  kA kao najmanja struja koja izaziva preskok. Svi parametri potrebni za proračun verovatnoće premašenja struje  $I_{min}$  dati su u tabeli B.2, uz usvojenu srednju amplitudu struje pražnjenja od  $I_{sr} = 30$  kA i srednjeg kvadratnog rasipanja logaritma struje  $\sigma_{\ln I} = 0.6$ .

Tabela B.2: Tabela sa proračunom verovatnoće pojave struje veće od minimalne struje koja izaziva proboj transformatora

$I_g$	$I_{sr}$	$\sigma_{\ln I}$	$X = \frac{\ln(I_g/I_{sr})}{\sqrt{2} \times \sigma_{\ln I}}$	$Z = \text{erf}(X)$	$P(I_g) = \frac{1+Z}{2}$
38	30	0.6	0.279	0.307	0.346

Verovatnoća pojave struje koja izaziva kvar izolacije je  $P(I_g > I_{min}) = 0.346$ . Ukupan očekivani broj kvarova transformatora je:

$$N_k = N_D \times P(I_g > I_{min}) = 0.068 \times 0.348 = 0.024 \text{ kvarova/god} \quad (\text{B.15})$$

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

$$MTBF = 42.6 \text{ god} \quad (\text{B.16})$$

Za transformatore se smatra da je prihvatljiv broj godina bez kvara  $MTBF > 600$  god, što znači da postojeće rešenje nije dobro. Stoga je potrebno postaviti odvodnik prenapona na transformator, što bi potpuno sprečilo kvarove transformatora, jer ne postoji struja pražnjenja koja bi povećala napon na transformatoru iznad 75 kV.

## Zahvalnica

Projekat zaštite transformatora 10/0.4 kV direktnim postavljanjem odvodnika prenapona na uzemljenu šasiju suvog transformatora u Institutu za crnu metalurgiju u Nikšiću rađen je u saradnji sa osobljem Instituta i proizvođačem suvog transformatora Minel Trafo Mladenovac, na čemu se zahvaljujem. To je bila prva primena rešenja prenaponske zaštite transformatora na opisani način u našoj zemlji, koja je realizovana 2005 god.