

Poglavlje 8

Rizik kvara izolacije

Danas je razvijeno više metoda za procenu rizika kvara izolacije elektroenergetske opreme u postrojenjima i godišnjeg broja preskoka na vazdušnoj izolaciji vodova usled atmosferskih pražnjenja. Pri primeni ovih metoda neophodno je poznavati zakone raspodele amplitude i strmine čela struje groma.

Pri primeni bilo koje metode za određivanje rizika kvara izolacije potrebno je ponoviti veći broj simulacija prelaznog procesa usled atmosferskih pražnjenja da bi se sagledao statistički uticaj slučajnih parametara groma na brojnu vrednost rizika kvara.

8.1 Kriva opasnih parametara groma

Pri primeni metode **krive opasnih parametara** proračun prelaznog procesa se ponavlja za veći broj strmina čela strujnih talasa groma ravnomerno raspoređenih od neke minimalne strmine S_{min} do maksimalne strmine S_{max} . Vrednosti za ove granične strmine struja groma se biraju tako da je verovatnoća pojavljivanja strmine čela manje od S_{min} , odnosno veće od S_{max} manja od 2%. Pri tome se smatra da su talasi linearno rastućeg čela.

Ukoliko je jedna simulacija prelaznog procesa izvršena sa strminom čela struje S_j i posle vremena t_j napon na ispitivanom elementu izolacije je postao veći od podnosivog napona izolacije U_{iz} u toj tački, tada se smatra da je prenapon izazvao kvar izolacije. Par vrednosti $(S_j; I_j)$ predstavlja koordinate jedne tačke krive opasnih parametara. Amplituda struje groma koja izaziva kvar izolacije izračunava se iz posmatrane strmine čela talasa i vremena do kvara t_j , odnosno:

$$I_j = S_j t_j \quad (8.1)$$

Vreme do kvara izolacije t_j zavisi od tipa pražnjenja u vod. Ako se računa rizik kvara izolacije elemenata postrojenja (posebno energetskog transformatora) usled direktnog udara groma u fazni provodnik, onda je t_j vreme od trenutka prvog nailaska talasa na posmatrani element do proboja izolacije, jer je upravo to vreme potrebno da strujni talas strmine S_j naraste do kritične amplitude koja izaziva proboj. Stvarno vreme od trenutka atmosferskog pražnjenja do proboja izolacije je duže za vreme neophodno za prostiranje talasa od mesta udara do posmatrane tačke u kojoj se traži rizik proboja izolacije.

Ako se posmatra proces povratnog preskoka na uzemljene delove voda (zaštitno uže ili vrh stuba), posle čega se stvara talas koji se prostire po faznom provodniku do postrojenja, gde može da izazove kvar izolacije, tada se vreme do proboja izolacije računa iz sledećeg izraza:

$$t_j = t_{pp} + t_{prob} \quad (8.2)$$

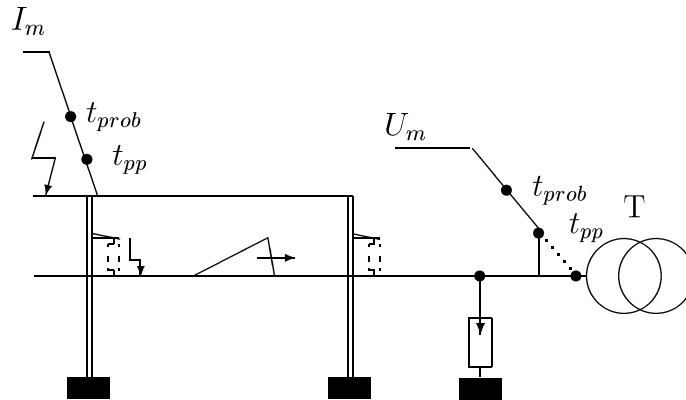
gde su:

t_{pp} – vreme potrebno od nailaska naponskog talasa na izolaciju stuba do povratnog preskoka,

t_{prob} – vreme od nailaska talasa na izolaciju posmatranog elementa do proboja izolacije.

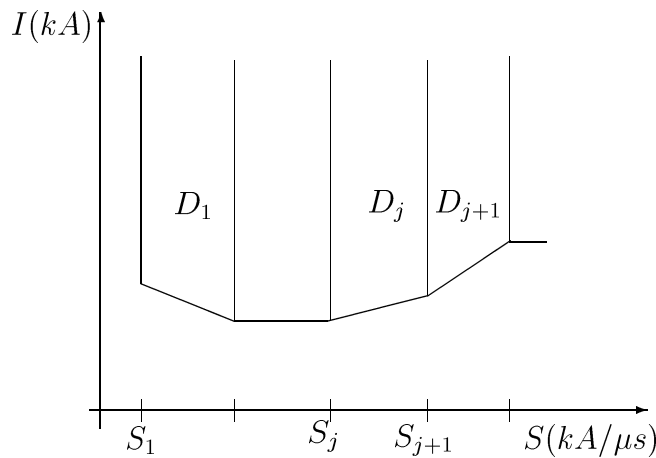
Vreme do proboja izolacije posle povratnog preskoka predstavlja zbir vremena potrebnog da struja poraste toliko da na stubu izazove povratni preskok i vremena da naponski talas nastao povratnim preskokom, od trenutka kada je stigao do posmatrane izolacije elementa postrojenja poraste do probojnog napona te izolacije. Vreme prostiranja od mesta atmosferskog pražnjenja do stuba na kome se odvija povratni preskok i od stuba do tačke u kojoj se računa rizik proboja izolacije ne ulaze u vreme do proboja računato izrazom 8.2. Linearno rastuće čelo talasa strmine S_j treba da ima trajanje najmanje t_j da bi se na posmatranoj izolaciji uspostavio napon dovoljan za proboj. Ovo je objašnjeno na slici 8.1. Da bi uopšte moglo da dodje do povratnog preskoka, napon mora da postigne vrednost preskočnog napona izolacije voda, što se postiže posle vremena t_{pp} . Međutim, napon na stubu može i dalje da raste, izazivajući dalji porast napona na faznom provodniku posle povratnog preskoka. Na slici 8.1 sa t_{pp} označeno je vreme koje je bilo potrebno da dodje do povratnog preskoka na izolaciji stuba. Crtkanom linijom na idealizovanom talasnom obliku napona uz transformator je označen napon koji bi postojao kada ne bi bilo izolacije na stubu, već bi se napon odmah prenosio na fazni provodnik. Usled povratnog preskoka dolazi do pojave naglog skoka napona na faznom provodniku. Od tog trenutka potrebno je da prodje još vreme t_{prob} da napon poraste do probojnog napona izolacije. U realnom sistemu talasni oblik na transformatoru je izobličen dejstvom višestrukih refleksija na stubu, delovanjem korone i zaštitnih naprava.

Iznad zaštitnog užeta nacrtan je odgovarajući talasni oblik struje atmosferskog pražnjenja. Sa slike se vidi da je dovoljna amplituda struje ona koja se dobija kao proizvod zbira vremena do povratnog preskoka i vremena do proboja i strmine čela strujnog talasa.



Slika 8.1: Računanje vremena do proboja izolacije pri proceni rizika

Proračun prelaznog procesa se prekida za posmatranu strminu struje kada nastane proboj na posmatranoj izolaciji i ponavlja se za sledeću vrednost strmine struje S_{j+1} . Spajanjem većeg broja dobijenih tačaka dobija se kriva opasnih parametara, kao na slici 8.2.



Slika 8.2: Kriva opasnih parametara groma

Svi udari groma čija je amplituda struje za zadatu strminu iznad krive opasnih parametara ugrožavaju izolaciju u posmatranoj tački elektroenergetskog sistema. Rizik kvara se određuje integraljenjem funkcije gustine raspodele amplitude i strmine struje groma u oblasti iznad krive opasnih parametara, odnosno:

$$R = \int_D \omega(I, S) dI dS \quad (8.3)$$

gde je: $\omega(I, S)$ – gustina raspodele amplitude i strmine struje groma.

Ukoliko se zakon raspodele amplitude i strmine struje groma daje logaritamsko - normalnom raspodelom, tada izraz za ovu raspodelu ima sledeći oblik:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.4)$$

Oznake u izrazu 8.4 imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.5)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.6)$$

gde su:

I – slučajna amplituda struje groma,

I_{sr} – srednja vrednost amplitude struje groma,

S – strmina linearizovanog čela struje groma,

S_{sr} – srednja vrednost strmine linearizovanog čela struje groma,

$\sigma_{\ln I}$ – standardno odstupanje logaritma struje groma,

$\sigma_{\ln S}$ – standardno odstupanje logaritma strmine čela struje groma,

ρ – koeficijent korelacije izmedju amplitude i strmine struje groma.

Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma date su u tablici 8.1 prema [30].

I_{sr} (kA)	S_{sr} (kA/ μ s)	$\sigma_{\ln I}$	$\sigma_{\ln S}$	ρ
30	14	0,68	0,55	0,38

Tabela 8.1: Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele parametara struje groma

Vrednosti iz tablice 8.1 su dobijene analizom rezultata izmerenih na televizijskim tor-
njevima na brdu Monte San - Salvatore od strane profesora Bergera.

Dvojna raspodela parametara atmosferskih pražnjenja se pokazuje kao vrlo pogodna za detaljnije procene ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja, mada se parametri raspodele moraju stalno korigovati u skladu sa novim rezultatima merenja od strane raznih autora.

Integraljenje se može izvršiti numeričkim postupkom podelom krive opasnih parametara na segmente, kao na slici 8.2.

Podelom krive opasnih parametara na linearne segmente dobijene su podoblasti opasnih parametara $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$. Za svaku podoblast moguće je odrediti analitičko rešenje integrala 8.3. Numeričko izračunavanje integrala 8.3 za sve podoblasti se sprovodi primenom metode trapeznog pravila.

Verovatnoća atmosferskog pražnjenja sa parametrima u oblasti D_i iznad krive opasnih parametara, za zakon raspodele amplitude i strmine struje dat logaritamsko-normalnom raspodelom je:

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \int_{x(y)}^{\infty} \omega(x, y) dx dy \quad (8.7)$$

Transformacijom izraza u eksponentu u relaciji 8.4 dobija se sledeći izraz za gustinu raspodele $\omega(x, y)$:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{(x-\rho y)^2}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.8)$$

Može se uvesti nova promenljiva z definisana na sledeći način:

$$z = \frac{x - \rho y}{\sqrt{1 - \rho^2}} \quad (8.9)$$

Uvodjenjem nove promenljive gustina raspodele slučajnih veličina y i z može se izraziti u sledećem obliku:

$$\omega(y, z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.10)$$

Sada se integraljenje u podoblasti D_i iznad krive opasnih parametara može izvršiti razdvajanjem podintegralne funkcije na dve nezavisne funkcije, odnosno:

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \omega(y) \int_{z(x,y)}^{\infty} \omega(z) dz dy. \quad (8.11)$$

gde su:

$$\omega(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (8.12)$$

$$\omega(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.13)$$

Sada se prvi integral u izrazu 8.11 može rešiti trapeznim pravilom, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1}, x)}^{\infty} \omega(z) dz \} \quad (8.14)$$

Posle analitičkog izračunavanja integrala i povratka na promenljive x i y se dobija:

$$P_{D_i} = \frac{\Delta y}{2\sqrt{2\pi}} \{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} Q\left(\frac{x_i - \rho y_i}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} Q\left(\frac{x_{i+1} - \rho y_{i+1}}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \} \quad (8.15)$$

U izrazu 8.15 funkcija $Q(z)$ ima sledeće značenje:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.16)$$

odnosno:

$$Q(z) = 0,5 - \Phi(z) \quad (8.17)$$

gde je $\Phi(z)$ Laplasova funkcija ili **funkcija greške** definisana na sledeći način:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.18)$$

Rizik pojavljivanja opasnih parametara u oblasti D_1 određuje se smatrajući da struje strmine manje od S_1 ne mogu da prouzrokuju kvar izolacije, što može da utiče na smanjenje vrednosti rizika pri proračunu. Stoga je amplituda struje $I_1 = \infty$, pa je verovatnoća pojavljivanja ove struje jednaka nuli.

Rizik pojavljivanja opasnih parametara u poslednjoj oblasti D_n određuje se pod pretpostavkom da je kriva opasnih parametara za strmine veće od S_n horizontalna prava. Realno se pri većim strminama sa povećanjem strmine povećava i neophodna amplituda struje groma koja može da izazove kvar izolacije zbog izražene volt-sekundne karakteristike izolacije. Zbog toga se uvođenjem pretpostavke o horizontalnoj karakteristici dobija nešto veći izračunati rizik.

Rizik kvara izolacije u poslednjoj oblasti D_n izračunava se primenom sledećeg izraza za numeričko integrisanje:

$$P_{D_n} = \sum_{k=n+1}^m \frac{\Delta y}{2\sqrt{2\pi}} \{ e^{-\frac{y_k^2}{2}} Q\left(\frac{x_n - \rho y_k}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) + e^{-\frac{y_{k+1}^2}{2}} Q\left(\frac{x_n - \rho y_{k+1}}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \} \quad (8.19)$$

gde je: $\Delta y = y_{k+1} - y_k = \text{const}$ — priraštaj normalizovane strmine talasa.

Broj sabiraka m u gornjem izrazu se bira tako što se u svakom koraku proverava da li sledeći član ima vrednost veću od ε , gde je ε unapred odabrani dovoljno mali broj. Ukoliko se dobije da je za $k + 1$ priraštaj manji od ε , proračun se prekida.

Ukupna verovatnoća kvara izolacije dobija se sumiranjem pojedinačnih verovatnoća po podoblastima:

$$P = \sum_{i=1}^n P_{D_i} \quad (8.20)$$

Broj P predstavlja verovatnoću da će pri jednom udaru groma u neku tačku na vodu napon na posmatranoj izolaciji prevazići podnosivi udarni napon izolacije U_{iz} .

Obično je dovoljno proračun izvršiti sa 15 do 20 strmina struja atmosferskih pražnjenja.

8.2 Verovatnoća pražnjenja mimo užeta

Prilikom odredjivanja verovatnoće atmosferskog pražnjenja mimo zaštitnog užeta se za svaku amplitudu struje groma I može primenom elektrogeometrijskog modela odrediti verovatnoća prodora groma mimo zaštitnog užeta $X(I)$, koja predstavlja odnos atraktivne površine faznog provodnika kod voda koji je zaštićen užetom i atraktivne površine faznog provodnika kod voda koji nije zaštićen užetom, za jednu određenu struju groma I . Rizik kvara izolacije se dobija integraljenjem gustine raspodele amplitude i strmine struje groma što daje verovatnoću pojavljivanja kritičnih parametara, što se množi verovatnoćom da se takvi parametri pojave prodorom groma mimo zaštitnog užeta.

$$R = \int_D \omega(I, S) X(I) dI dS \quad (8.21)$$

Proračun izraza 8.21 numeričkim putem za logaritamsko-normalnu raspodelu amplituda i strmina struja groma može se uraditi modifikacijom izraza 8.14 množenjem svake promenljive x koja predstavlja normalizovanu vrednost amplitude struje sa odgovarajućom verovatnoćom prodora te struje kroz gromobransku zaštitu, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1}, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \right\} \quad (8.22)$$

gde X označava verovatnoću prodora groma u funkciji amplitude struje groma. Integral:

$$I(i) = \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \quad (8.23)$$

se izračunava numeričkim postupkom primenom trapeznog pravila. Celokupni opseg amplituda struja atmosferskih pražnjenja od neke minimalne vrednosti I_{min} do maksimalne

vrednosti struje groma I_{max} se diskretizuje na m ekvidistantnih vrednosti amplituda struja, za koje se izračunava verovatnoća prodora mimo zaštitnog užeta $X(I)$. Numeričko izračunavanje integrala $I(i)$ vrši se na sledeći način:

$$I(i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[\frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j) + \frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j+1) \right] \times \quad (8.24)$$

$$\times \left[\frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} - \frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} \right]$$

gde su:

i -indeks koji odgovara i -toj strmini struje sa krive opasnih parametara,

j -indeks koji odgovara j -toj amplitudi struje groma, koja se varira sa nezavisnim korakom ΔI od neke minimalne vrednosti I_{min} do maksimalne vrednosti I_{max} ,

$X(j)$ -verovatnoća prodora groma čija je amplituda struje $I(j)$ mimo zaštitnog užeta,

m - broj diskretnih vrednosti amplituda struja groma koje se koriste pri numeričkom integraljenju.

Minimalna vrednost struje I_{min} predstavlja struju koja se pojavljuje sa nekom dovoljno malom verovatnoćom, tako da se pojava manje struje može zanemariti (obično 2-3 kA). Maksimalna amplituda struje atmosferskog pražnjenja I_{max} se bira tako da bude malo veća od najveće struje koja može da prodje mimo zaštitnog užeta. To je obično između 20 i 30 kA. Obično je dovoljno posmatrati 15 do 20 različitih amplituda struja pražnjenja od minimalne do maksimalne struje koje mogu da prodju mimo zaštitnog užeta.

Jedina razlika u proračunu rizika kvara izolacije pri razmatranju pojave pražnjenja mimo zaštitnog užeta i pojave pražnjenja u uzemljene delove koje izaziva povratni preskok ili pražnjenja u fazni provodnik voda bez zaštitnog užeta je ta što se kod pražnjenja mimo zaštitnog užeta integral 8.23 mora rešavati numerički, a u ostalim slučajevima se može rešavati analitički primenom Laplasove funkcije 8.17.

8.3 Uticaj mesta udara groma na rizik kvara izolacije

Metodom opasnih parametara se određuje rizik da pri tačno određenom mestu udara groma dodje do preskoka na izolaciji voda ili proboja unutrašnje izolacije transformatora. U realnom sistemu je mesto udara groma slučajna veličina, sa ravnomerno raspoređenom verovatnoćom

duž raspona. Može se smatrati da je nešto veća verovatnoća udara groma u vrh stuba nego u zaštitno uže na rasponu zbog veće visine, kao i zbog geometrije stuba.

Da bi se uvažio slučajan efekat mesta udara u uzemljene delove pri simulaciji pojave povratnog preskoka, potrebno je varirati mesto udara groma duž raspona.

Ukoliko do udara groma dolazi na deonici voda dužine Δd_i izmedju tačaka i i $i + 1$, tada je srednja verovatnoća preskoka na toj deonici:

$$P_{Sr_i} = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \quad (8.25)$$

gde je P_i verovatnoća preskoka usled udara groma u tačku i . Godišnji broj udara na deonici dužine Δd_i u km koji izaziva preskok je:

$$N_{1god,\Delta d_i} = \frac{P_{Sr_i} \Delta d_i n_{1god,100km}}{100} \quad (8.26)$$

gde je $n_{1god,100km}$ godišnji broj udara groma na 100 km voda.

Ukoliko se uvažava povećanje verovatnoće pražnjenja u stub u odnosu na pražnjenje u zaštitno uže na sredini raspona, tada se može napisati izraz za srednji godišnji broj preskoka na deonici dužine Δd_i u obliku:

$$N_{1god,\Delta d_i} = \frac{0,5 \cdot (P_{s_i} K_s \Delta d_i + P_{i+1} \Delta d_i) n_{1god,100km}}{100} \quad (8.27)$$

gde su:

P_{s_i}, P_{i+1} – verovatnoća pražnjenja u tačke i na vrhu stuba i $i + 1$ na rasponu,

K_s – koeficijent povećanja verovatnoće udara u stub, odnosno povećanje atraktivne površine stuba u odnosu na raspon.

Može se usvojiti da je $K_s = 1,3$ što znači da je za 30% veća verovatnoća udara groma u stub nego u zaštitno uže. Sumiranjem broja preskoka usled pražnjenja u sve deonice voda dobija se ukupna verovatnoća preskoka usled udara groma u zaštitno uže ili u stub na celoj dužini voda $d = \sum \Delta d_i$.

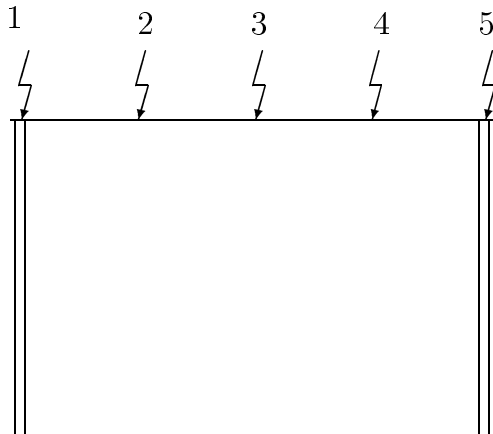
$$N_{1god,d} = \sum_{i=1}^{m-1} N_{1god,\Delta d_i} \quad (8.28)$$

gde je m ukupan broj tačaka na vodu u kojima se simulira udar groma.

Godišnji broj preskoka na 100 km voda usled atmosferskih prenapona $N_{1god,100km}$ se može izračunati svodjenjem broja ispada na 100 km, odnosno:

$$N_{1god,100km} = \frac{100N_{1god,d}}{d} \quad (8.29)$$

Ako se smatra da vod ima identične karakteristike duž cele trase, odnosno istu geometriju stuba i otpor uzemljenja, tada se može odrediti ugroženost voda od atmosferskih prenapona samo na osnovu proračuna rizika preskoka u nekoliko tačaka na polovini jednog raspona. U tom slučaju zbog potpune simetrije bi udari groma sa istom verovatnoćom izazvali preskok na susednom stubu. U opštem slučaju se računa rizik preskoka u nekoliko tačaka duž celog raspona, kao na slici 8.3. U ovom slučaju je za istu tačnost potreban veći broj simulacija. Pokazuje se da je za tačnost proračuna koja je u tehnički prihvatljivim granicama dovoljno uzeti 5 tačaka.



Slika 8.3: Variranje mesta udara duž raspona voda identičnih karakteristika stubova

Na veoma sličan način se može vršiti proračun ugroženosti transformatora od nailazećih talasa po vodovima usled povratnog preskoka na prilazu postrojenju. Raspon j dužine d_j ispred postrojenja se deli na $m - 1$ elementarnih deonica. Verovatnoća kvara izolacije transformatora se računa za udare gromova u m tačaka koje ograničavaju elementarne deonice

dužine $\Delta d = d_j / (m - 1)$. Srednji godišnji broj kvarova transformatora $N_{Tj,1god}$ za atmosferska pražnjenja unutar posmatranog raspona j može se izračunati primenom trapeznog pravila u sledećoj formi:

$$N_{Tj,1god} = [0,5 K_s P_{s_1} \Delta d + P_2 \Delta d + \dots + P_{m-1} \Delta d + 0,5 K_s P_{s_m} \Delta d] \frac{n_{1god,100km}}{100} \quad (8.30)$$

gde su:

$P_{s_i}, (i = 1, m)$ – verovatnoća prevazilaženja podnosivog napona transformatora ako do udara groma dolazi u tačke 1, odnosno m na vrhovima stubova,

$P_i, (i = 2, 3, \dots, m - 1)$ – verovatnoća prevazilaženja podnosivog napona transformatora ako do udara groma dolazi u neku od tačaka $2, 3, \dots, m - 1$ duž raspona.

$n_{1god,100km}$ – očekivani godišnji broj udara groma na $100km$ dalekovoda,

Ukupan očekivani godišnji broj proboja izolacije transformatora usled atmosferskih pražnjenja u zaštitno užu ili vrh stuba na prvih m_r raspona ispred transformatorske stanice se dobija sabiranjem očekivanog godišnjeg broja kvarova usled pražnjenja po pojedinim rasponima, odnosno:

$$N_{T,1god} = \sum_{j=1}^{m_r} N_{Tj,1god} \quad (8.31)$$

gde su:

$N_{T,1god}$ – ukupan očekivani broj kvarova izolacije transformatora usled nailazećih atmosferskih prenapona prouzrokovanih povratnim preskokom negde na vodu,

m_r – broj posmatranih raspona ispred postrojenja. Analiza je pokazala da je kod visokonaponskih postrojenja dovoljno proračun raditi za samo prva dva raspona ispred ulaza u postrojenje, jer je udar groma u dalje raspone bezopasan zbog toga što a udari velikih amplituda struja groma izazivaju preskoke pri prostiranjima talasa duž voda smanjujući energiju talasa koji dolazi do samog postrojenja. Kod mreža nižih nazivnih napona, naročito ako su otpori uzemljenja stubova veliki (na primer veći od 20Ω), tada treba uzeti veći broj raspona u obzir. Pri tome treba uraditi analizu osetljivosti rezultata varirajući broj raspona. Rastojanje ispred transformatora koje se uzima da može da bude kritično sa stanovišta ugroženosti transformatora usled atmosferskih prenapona se naziva **graničnim rastojanjem**.

Očekivani broj godina bez kvara izolacije transformatora usled atmosferskih prenapona prouzrokovanih povratnim preskocima na prilaznim vodovima dobija se kao recipročna vrednost ukupnog očekivanog godišnjeg broja kvarova, odnosno:

$$N_{god} = \frac{1}{N_{T,1god}} \quad (8.32)$$

Vrlo često se sreće oznaka u literaturi za srednji broj godina bez kvara **MTBF** od engleske oznake *Mean Time Between Failures*.

U slučaju kada se posmatra godišnji broj preskoka na izolaciji vodova ili godišnji broj kvarova izolacije transformatora usled direktnih pražnjenja u fazne provodnike kod nadzemnih vodova bez zaštitnog užeta, dovoljno je posmatrati samo udare u dva mesta na krajevima posmatranog raspona da bi se dobila zadovoljavajuća tačnost.

8.4 Uticaj trenutne vrednosti radnog napona

Pri analizi atmosferskih prenapona u niskonaponskim i srednjenaponskim sistemima trenutna vrednost radnog faznog napona nema bitnog uticaja na rizik kvara izlacijske izolacije. Međutim, kod elektroenergetskih mreža visokih i vrlo visokih napona prenaponi atmosferskog porekla na vodovima su uporedivi sa radnim naponom koji postoji na faznim provodnicima u trenutku pražnjenja. U slučaju udara groma u uzemljene delove voda (vrh stuba ili zaštitno uže na rasponu), naprezanje izolacije na stubu srazmerno je razlici napona na konzoli i trenutne vrednosti radnog napona faznog provodnika.

Udar groma se može dogoditi u bilo kom trenutku periode radnog napona. Stoga se može smatrati da je fazni ugao Θ ravnomerno raspoređena slučajna veličina u opsegu $[0, 2\pi]$, kao na sl. 8.4.

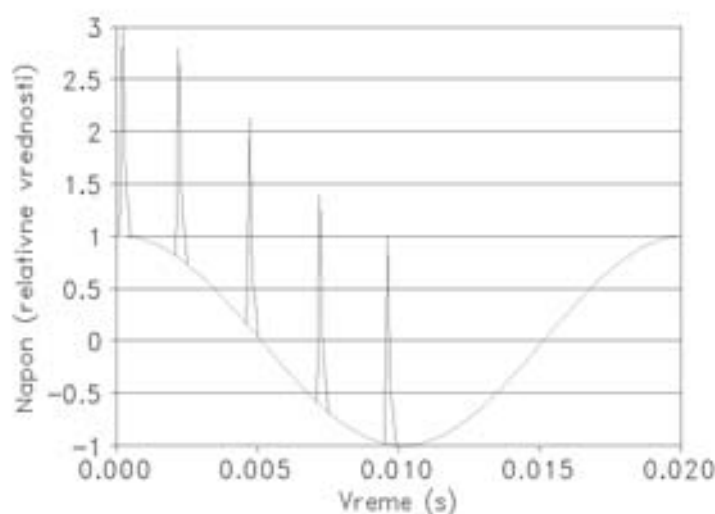
Da bi se uvažio uticaj trenutne vrednosti radnog napona na očekivani godišnji broj kvarova izolacije, potrebno je da se proračun vrši za određenu trenutnu vrednost radnog napona, koja se može smatrati konstantnom za vreme trajanja prenapona atmosferskog porekla. Trenutna vrednost radnog napona za fazni ugao Θ_i iznosi:

$$U_{rad_i} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \cos \Theta_i \quad (8.33)$$

gde su:

U_n – efektivna linijska vrednost napona na vodu, koja se može usvojiti da je jednaka nazivnom naponu voda ili najvišem radnom naponu sistema,

Θ_i – i -ta vrednost slučajnog faznog ugla u trenutku pražnjenja.



Slika 8.4: Slučajni trenutak atmosferskog pražnjenja u okviru periode radnog napona

Godišnji broj kvarova izolacije izračunat za posmatrani ugao Θ_i ima vrednost R_{Θ_i} . Proračun očekivanog godišnjeg broja kvarova se mora ponoviti za n različitih vrednosti faznih uglova u intervalu $[0, \pi]$. Dovoljno je posmatrati samo jednu poluperiodu radnog napona, jer se u drugoj poluperiodi ponavljaju iste trenutne vrednosti radnog napona.

Očekivani broj kvarova, uvažavajući i uticaj trenutne vrednosti radnog napona u trenutku pražnjenja dobija se kao srednja vrednost broja kvarova koji je izračunat za određene fazne uglove u trenutku pražnjenja.

$$N_u = \frac{\sum_1^n N_{\Theta_i}}{n} \quad (8.34)$$

gde su:

n – broj simuliranih trenutaka pražnjenja u okviru poluperiode. Optimalno je usvojiti da je $n = 5$, jer se na taj način uzimaju najreprezentativnije trenutne vrednosti radnog napona oba polariteta.

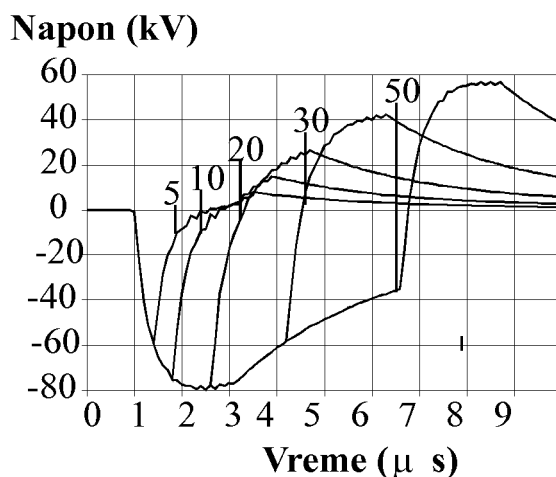
N_u – Očekivani broj kvarova izolacije sa uvažavanjem trenutne vrednosti radnog napona.

8.5 Statistički proračun kod indukovanih prenapona

Statistički postupak proračuna indukovanih prenapona vrši se metodom opasnih parametara na isti način kao kod direktnih atmosferskih pražnjenja. Pri primeni bilo koje metode za

određivanje rizika kvara izolacije potrebno je ponoviti veći broj simulacija prelaznog procesa usled atmosferskih pražnjenja da bi se sagledao statistički uticaj slučajnih parametara atmosferskog pražnjenja na brojnu vrednost rizika kvara.

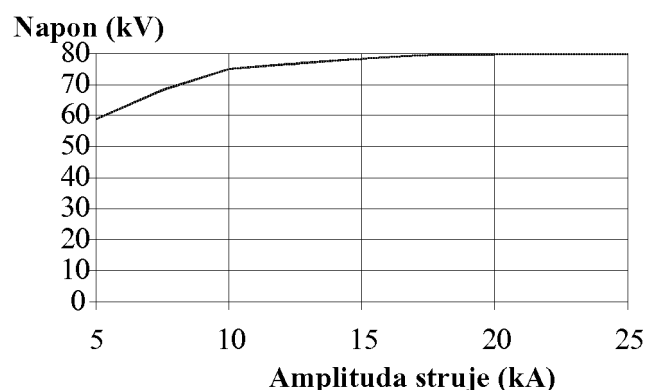
Bitna razlika izmedju slučaja direktnog atmosferskog pražnjenja u vod i indukovano prenapona je u tome što je trajanje čela indukovano prenapona nezavisno od trajanja čela struje atmosferskog pražnjenja, sem u slučaju pražnjenja veoma malih amplituda. Na slici 8.5 prikazani su talasni oblici indukovanih prenapona na 500 m dugačkom vodu visine provodnika 10 m, zatvorenog sa oba kraja otpornicima identičnim karakterističnoj impedansi voda da bi se sprečile refleksije od kraja voda, za slučaj talasa identičnih strmina od $15 \text{ kA}/\mu\text{s}$, ali različitih amplituda od 5 kA, 10 kA, 20 kA, 30 kA i 50 kA. Mesto atmosferskog pražnjenja je udaljeno 100 m okomito od voda. Tačka na vodu koja je najbliža pražnjenju nalazi se na 250 m od početka voda. Na osnovu slike 8.5 može se uočiti da je za atmosferska pražnjenja



Slika 8.5: Talasni oblici napona za različite amplitude struje atmosferskog pražnjenja, strmine čela $15 \text{ kA}/\mu\text{s}$

konstantne strmine od $15 \text{ kA}/\mu\text{s}$ čija amplituda prelazi 20 kA vreme do maksimuma napona konstantno i iznosi oko $2,6 \mu\text{s}$. Za talase manje amplitude vreme čela se smanjuje. Na slici 8.6 prikazana je zavisnost maksimalne vrednosti prenapona od amplitude struje atmosferskog pražnjenja. Na osnovu slike 8.6 se može uočiti da sa porastom amplitude atmosferskog pražnjenja do vrednosti od $17,5 \text{ kA}$ raste i amplituda izračunatog indukovano prenapona. Za temene vrednosti struja atmosferskih pražnjenja koje su iznad $17,5 \text{ kA}$ amplituda prenapona je praktično konstantna. Proračun prenapona ponovljen je za konstantnu amplitudu struje pražnjenja od 30 kA, a za strminu variranu od 5 do $30 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Na slici 8.7 prikazani su talasni oblici napona za različite strmine struje pražnjenja.

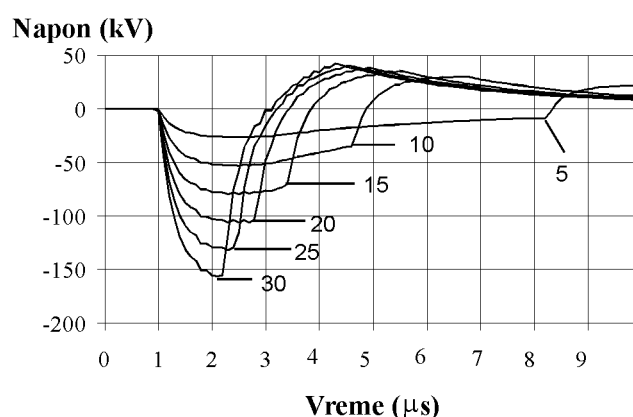
Na slici 8.8 prikazana je zavisnost amplitude indukovano prenapona od strmine čela struje atmosferskog pražnjenja, pri svim ostalim parametrima koji su identični.



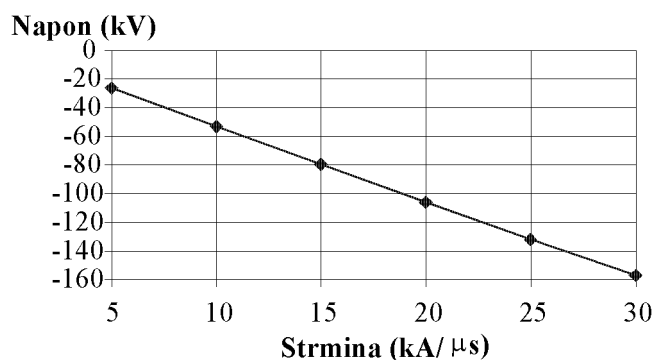
Slika 8.6: Amplituda indukovnog prenapona u funkciji temelne vrednosti struje atmosferskog pražnjenja

Na osnovu slike 8.8 može se zaključiti da postoji linearna zavisnost izmedju amplitude indukovnog prenapona i strmine struje pražnjenja.

Indukovani prenaponi se karakterišu nezavisnošću trajanja čela indukovnog prenapona od trajanja čela struje pražnjenja, osim u slučaju pražnjenja veoma malih amplituda. Metoda opasnih parametara se može primeniti za proračun rizika kvara izolacije usled indukovanih prenapona, jer se u toku linearnog porasta struje pražnjenja pojavljuje maksimalni indukovani prenapon. Ukoliko za posmatranu strminu ne dodje do pojave kvara izolacije za vreme usponskog dela indukovnog prenaponskog talasa, proračun se prekida i počinje za novu vrednost strmine struje atmosferskog pražnjenja. Sigurno je da ne može da se pojavi indukovani prenapon koji može da ugrozi izolaciju za vreme začelja struje pražnjenja. Metoda opasnih parametara se primenjuje na potpuno isti način kao kod direktnih pražnjenja i formiraju se parovi vrednosti strmina struja i amplituda struja koji su dovoljni da izazovu kvar izolacije.



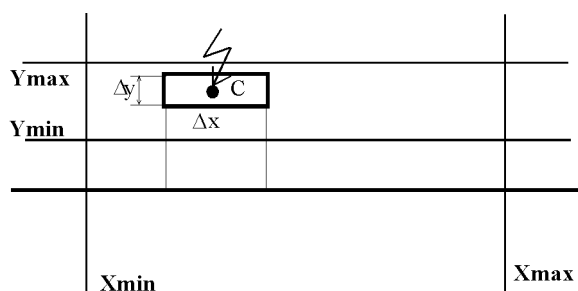
Slika 8.7: Talasni oblici napona za različite strmine struje pražnjenja



Slika 8.8: Zavisnost amplitude indukovanog prenapona od strmine struje pražnjenja

Pri statističkom proračunu godišnjeg broja preskoka na nadzemnim vodovima usled indukovanih prenapona se pretpostavlja da je vod identičnih karakteristika duž cele svoje dužine i da je postavljen pravolinijski na posmatranoj dužini. Mesto atmosferskog pražnjenja pored voda se varira paralelno sa vodom i okomito na njega. Pri tome se vrši proračun rizika preskoka na izolaciji na bar dva mesta na vodu. Ispitivanjem osetljivosti rezultata ustanovljeno je da veći broj tačaka posmatranja ne bi uticao bitno na rezultate proračuna, a zamenska šema postaje složenija i proračun sporiji.

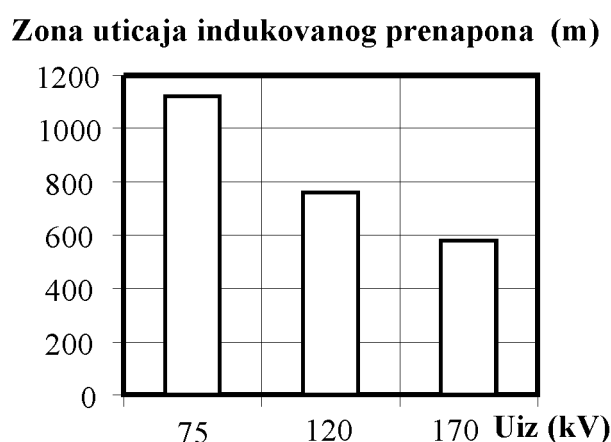
U statističkom prilazu kordinacije izolacije izvode se varijacije mesta udara groma kako po x -osi, tako i po y -osi. Na slici 8.9 su prikazane granice u kojima se vrše varijacije položaka pražnjenja u pravcu voda i normalno na njega.



Slika 8.9: Variranje mesta atmosferskog pražnjenja kod indukovanih prenapona u pravcu voda i normalno na njega

Smatra se da indukovani prenaponi nastali pražnjenjem bilo gde unutar pravougaone površine dužine Δx i širine Δy izazivaju istu visinu prenapona kao kada bi pražnjenje bilo u tački C u centru pravougaonika. Variranje mesta udara normalno na vod počinje od najbližeg rastojanja Y_{min} i vrši se sa korakom Δy sve do graničnog rastojanja Y_G za koje više ne nastaje

kvar izolacije ni pri pri strujama najvećih strmina. Varijacija rastojanja mesta udara od voda se prekida za rastojanja veća od ovog graničnog rastojanja. Minimalno rastojanje mesta udara od voda Y_{min} se usvaja da iznosi tri visine voda, jer bi se za manja rastojanja pražnjenja odvijala u vod, a ne u zemlju pored njega. Y_{max} je maksimalna udaljenost do koje se vrši varijacija mesta udara. Ova veličina zavisi od podnosivog udarnog napona izolacije voda. Na slici 8.10 prikazana je granična udaljenost na kojoj indukovani prenaponi imaju uticaja za različite podnosive udarne napone izolacije voda. Posmatrani su tri naponska nivoa distributivnih mreža i to 10 kV, 20 kV i 35 kV. Njihovi udarni podnosivi naponi su 75 kV, 125 kV i 170 kV respektivno.



Slika 8.10: Maksimalna udaljenost tačke udara od voda Y_{max} u zavisnosti od podnosivog udarnog napona U_{iz}

Godišnji broj preskoka na izolaciji voda prouzrokovan atmosferskim pražnjenjima u elementarnu pravougaonu površinu dimenzija Δx i Δy je:

$$N_{\Delta x \Delta y} = N_g \Delta x \Delta y P_c \quad (8.35)$$

gde su:

P_c - verovatnoća preskoka na izolaciji u slučaju pražnjenja u tački C ,

N_g - godišnja gustina atmosferskih pražnjenja po km^2 .

Ukupan broj kvarova na izolaciji kada mesto pražnjenja groma varira i zmedju Y_{min} i Y_{max} i od X_{min} do X_{max} je računat sumiranjem svih pojedinačnih brojeva kvarova izolacije prouzrokovanih pražnjenjem u elementarnim zonama čija je površina $\Delta A = \Delta x \Delta y$. Kada se izračuna godišnji broj kvarova na određenoj dužni voda $D = N_x \Delta X$, usled indukovanih

prenapona, dobija se da je taj broj kvarova:

$$N_D = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} = N_g \Delta x \Delta y P_{cij} \quad (8.36)$$

gde je:

N_D - ukupan godišnji broj kvarova usle indukovanih prenapona na dužini voda D ,

N_y - broj varijacija rastojanja od mesta udara do voda

N_x - broj varijacija rastojanja atmosferskog pražnjenja od početka voda duž njega.

U statističkom prilazu kordinaciji izolacije parametri proračuna imaju veliki uticaj. U statističkom proračunu postoje tri važna parametra proračuna. Pored broja varijacija mesta udara duž x i y ose to je ukupan broj simulacija sa strujama različite strmine N_u .

Ukupan broj simulacija prelaznih procesa pretstavlja proizvod ova tri broja. Ako je ovaj proizvod veoma veliki, javlja se značajan porast potrebnog vremena za proračun. Zbog toga se izvodi optimizacija parametara proračuna.

Optimalne vrednosti potrebnog broja ponavljanja simulacija dobijene analizom osjetljivosti greške su $N_u = 16$, $N_x = 7$ i $N_y = 14$.

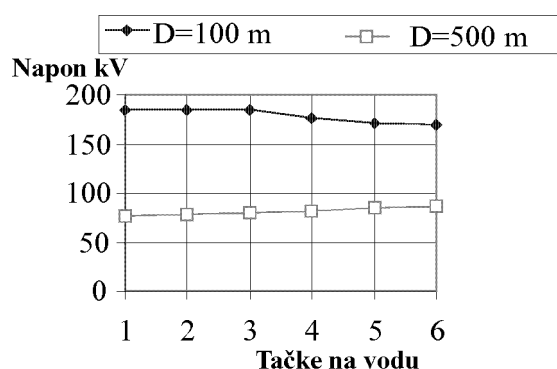
Da bi se ilustrovao uticaj položaja pražnjenja u odnosu na vod na visinu prenapona, uradjene su varijacije mesta pražnjenja pri svim ostalim konstantnim parametrima voda i pražnjenja.

Pokazuje se da amplituda prenapona raste sa udaljavanjem mesta pražnjenja duž voda od tačke na vodu u kojoj se prenapon izračunava, ako je mesto pražnjenja na malom okomitom rastojanju od voda, a da opada kada je udaljenost mesta pražnjenja od voda velika. Na slici 8.11 prikazana je zavisnost visine indukovano prenapona na vodu od udaljenosti mesta pražnjenja od posmatrane tačke u kojoj se napon izračunava, za pražnjenje udaljeno 100 m i 500 m od voda.

Na slici 8.12 prikazana je zavisnost visine prenapona od rastojanja mesta pražnjenja okomito od voda.

Može se uočiti značajno snižavanje amplitude prenapona sa udaljavanjem mesta pražnjenja od voda.

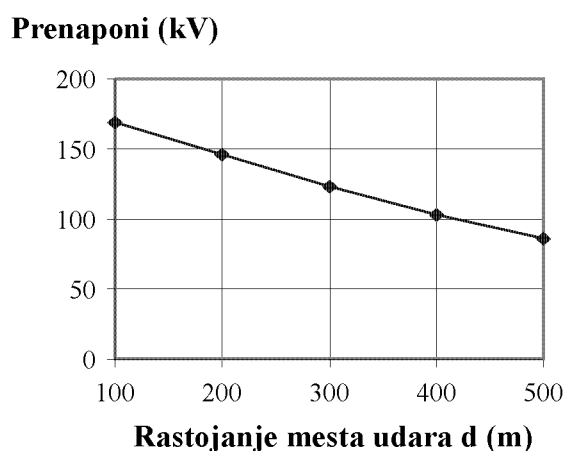
Da bi se sagledao uticaj pojedinih tipova pražnjenja na broj preskoka na izolaciji sred-njenaponskih nadzemnih distributivnih vodova, izvršen je proračun godišnjeg broja preskoka



Slika 8.11: Zavisnost visine prenapona od udaljenosti mesta pražnjenja duž voda od tačke u kojoj se napon registruje, za 100 i 500 m udaljena pražnjenja

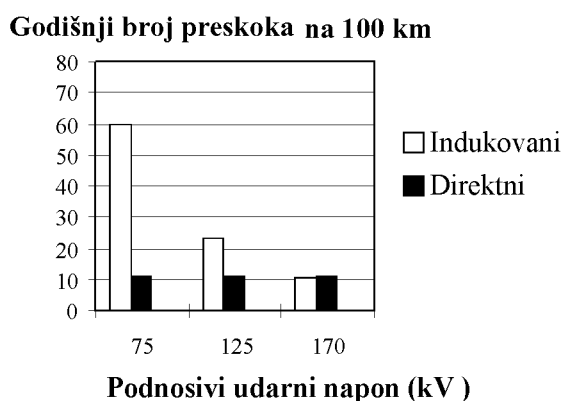
usled direktnih pražnjenja u fazne provodnike i indukovanih prenapona. Ramatrani vodovi su imali sledeće karakteristike:

- visina faznih provodnika iznad tla 10 m,
- vodovi su bez zaštitnog užeta,
- karakteristične impedanse faznog provodnika 450 Ω ,
- Podnosivi napon izolatorskog lanca variran je, tako da odgovara nazivnim naponima vodova 10 kV, 20 kV i 35 kV,
- keraunički nivo područja je 30 grmljavinskih dana godišnje,



Slika 8.12: Zavisnost visine prenapona od okomite udaljenosti mesta pražnjenja od voda

Godišnji broj preskoka usled direktnih atmosferskih pražnjenja i indukovanih prenapona u funkciji nazivnog napona voda prikazan je na slici 8.13. Može se uočiti da godišnji broj preskoka usled indukovanih prenapona značajno opada sa porastom podnosivog napona izolacije. Naprotiv, broj preskoka usled direktnih pražnjenja u nadzemne vodove srednjeg napona ne zavisi od nazivnog napona voda. Naime, svako direktno pražnjenje u fazni provodnik srednjenaponskog voda uvek izaziva preskok, jer je atmosferski prenapon uvek znatno viši od podnosivog napona izolacije.



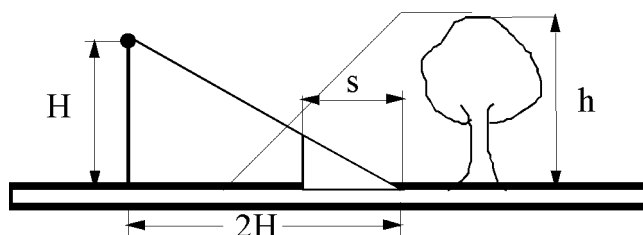
Slika 8.13: Broj preskoka u zavisnosti od nazivnog napona voda za slučaj direktnih i indirektnih pražnjenja

Sa slike 8.13 se može uočiti da je udeo indukovanih prenapona u ukupnom broju preskoka kod mreža podnosivog udarnog napona 75 kV (odnosno nazivnog napona voda 10 kV) znatno veći nego kod voda podnosivog udarnog napona 125 kV (odnosno nazivnog napona 20 kV), dok je kod vodova nazivnog napona 35 kV, odnosno podnosivog napona 170 kV broj preskoka usled direktnih pražnjenja i indukovanih prenapona skoro jednak. Sa daljim porastom nazivnog napona voda bi uticaj indukovanih prenapona bio još manji. To se tumači činjenicom da pražnjenje koje se odvija čak i relativno daleko od voda može da izazove indukovani prenapon koji može da izazove preskok u mreži nižeg nazivnog napona, dok kod mreža višeg nazivnog napona samo vrlo bliska pražnjenja izazivaju indukovane prenapone koji mogu da izazovu preskok.

8.6 Efekat ekraniranja voda susednim objektima

U [17] je opisan postupak obuhvatanja uticaja okolnih objekata na izloženost vodova i drugih elektroenergetskih objekata direktnim atmosferskim pražnjenjima. U radu [17] je usvojeno da je širina ekvivalentne atraktivne površine voda sa jedne strane jednaka dvostrukoj visini

voda. Ekvivalentna atraktivna površina voda je horizontalna površina zemlje u koju bi broj udara bio jednak broju udara u posmatrani vod. U razvijenom programskom paketu koji je korišćen u pri proračunima atmosferskih prenapona se smatra da je ekvivalentna atraktivna površina sa jedne strane voda jednaka trostrukoј visini voda. Na isti način se dobija ekvivalentna atraktivna površina bilo kog drugog objekta. Ovakav prilaz je u saglasnostima sa IEC preporukama [95]. Prvi prilaz koji je usvojen u [17] prikazan je na slici 8.14, a drugi prilaz koji se koristi u razvijenom programskom paketu usvoje na osnovu standarda prikazan je na slici 8.15. Oznake na slici 8.14 imaju sledeće značenje:



Slika 8.14: Uticaj ekraniranja voda obližnim drvetom prema - prilaz I

H - visina provodnika voda,

h - visina objekta koji ekranira vod,

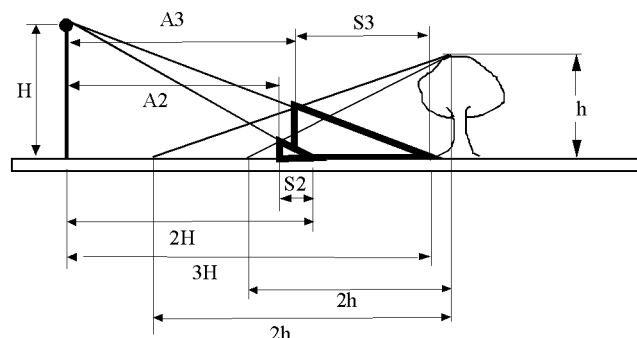
s - smanjenje širine ekvivalentne površine voda dejstvom susednog objekta.

Širina ekvivalentne atraktivne površine objekta dobija se povlačenjem prave pod nagibom 1:2, odnosno 1:3 u zavisnosti od primenjene metode, sa vrha objekta prema zemlji. Odsečak na horizontalnoj površini zemlje čini ekvivalentnu atraktivnu površinu. U preseku pravih postavljenih sa oba objekta dobija se granica uticaja pojedinih objekata. Na taj način smanjenje ekvivalentne atraktivne površine voda se dobija kada se od ekvivalentne atraktivne površine voda oduzme širina s između granica zona uticaja dva objekta i granice ekvivalentne atraktivne površine voda.

Na slici 8.15 prikazana su oba postupka određivanja smanjenja ekvivalentne atraktivne površine voda prema [17] i prema [95].

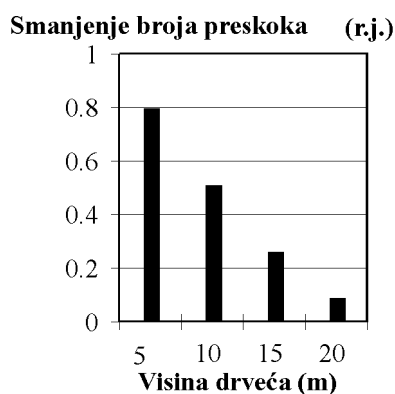
Na slici 8.15 indeks 2 označava da je širina atraktivne površine jednaka dvostrukoј visini, a indeks 3 trostrukoј visini. Ukoliko su i vod i susedni objekat iste visine, oba postupka daju isti rezultat. Ukoliko je vod veće visine od susednog objekta, tada širina atraktivne zone koja odgovara trostrukoј visini prema [95] daje veću atraktivnu zonu voda.

Izvršena je analiza uticaja okolnog drveća na broj preskoka usled direktnih pražnjenja u nadzemni vod visine 10 m. Širina koridora je usvojeda da iznosi $6H$ (gde je H visina voda).



Slika 8.15: Smanjenje atraktivnih površina voda usled okolnih objekata primenom dva postupka

Visina drveća na granici koridora je varirana od 5 do 20 m. Drveće je na međusobnom rastojanju od 20 m. Na slici 8.16 prikazano je smanjenje broja preskoka usled direktnog atmosferskog pražnjenja fazne provodnike voda zbog ekranirajućeg dejstva okolnog drveća. Na osnovu slike 8.17 se može uočiti da sa povećanjem visine okolnog drveća dolazi do bitnog



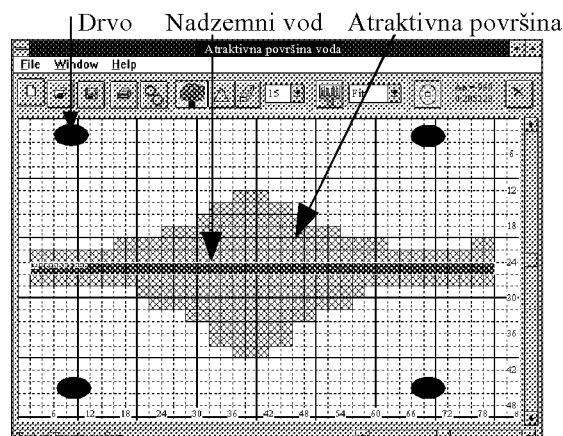
Slika 8.16: Relativno smanjenje broja preskoka u zavisnosti od visine okolnog drveća

smanjenja broja preskoka zbog ekranirajućeg dejstva drveća. Drveće ima uticaj na broj preskoka samo usled direktnih pražnjenja.

Na slici 8.17 prikazana je atraktivna zona nadzemnog voda u prisustvu okolnog drveća. Slika je dobijena direktno iz programa za proračun prenapona i ima za cilj da pokaže kako okolno drveće utiče na oblik atraktivne zone voda.

8.7 Monte - Karlo simulacija

Monte - Karlo simulacija predstavlja veoma često korišćenu metodu za statističku analizu atmosferskih prenapona. Po ovoj metodi se svi slučajni parametri koji se uzimaju u obzir pri



Slika 8.17: Oblik atraktivne zone voda u prisustvu drveća dobijen korišćenjem računarskog programa

analizi uticaja atmosferskih prenapona na izolaciju uvažavaju metodom izvlačenja slučajnih brojeva. Za odredjeni skup slučajnih parametara se izvrši analiza atmosferskih prenapona da bi se utvrdilo da li analizirani prenaponi premašuju izolacioni nivo ili su ispod njega. Rizik kvara izolacije je:

$$R = \frac{N_{kvar}}{N_{uk}} \quad (8.37)$$

gde su:

N_{kvar} – broj simulacija pri kojima je došlo do kvara izolacije,

N_{uk} – ukupan broj simulacija.

Ukupan broj simulacija treba izabrati tako da bude zadovoljen kriterijum željene tačnosti.

Osnovni slučajni parametri koji se uzimaju u obzir su slučajna amplituda I i strmina struje groma S . Može se pretpostaviti da su amplituda i strmina struje groma raspoređeni po logaritamsko - normalnom zakonu raspodele koji je dat izrazom 8.38:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.38)$$

gde su:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.39)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.40)$$

slučajne promenljive rasporedjene po normalnom zakonu raspodele.

Slučajna veličina x koja je rasporedjena po normalnom zakonu se može izvlačiti metodom slučajnih brojeva. Slučajna vrednost amplitude struje groma se u tom slučaju dobija iz izraza 8.39:

$$I = I_{sr} e^{x \sigma_{\ln I}} \quad (8.41)$$

Ako se uvede promenljiva $z = \frac{y - \rho x}{\sqrt{1 - \rho^2}}$ koja se može smatrati nezavisnom slučajnom veličinom rasporedjenom po normalnom zakonu, tada se slučajna strmina struje S može odrediti na osnovu slučajne amplitude struje I koja je ranije izračunata i slučajne veličine z . Slučajna veličina y je:

$$y = z \sqrt{1 - \rho^2} + \rho x \quad (8.42)$$

Zamenom se dobija na osnovu slučajnih veličina x i y rasporedjenih po normalnom zakonu da slučajna strmina struje ima vrednost datu sledećom relacijom:

$$S = S_{sr} e^{y \sigma_{\ln S}} \quad (8.43)$$

Slučajna vrednost faznog ugla Θ određuje se izvlačenjem slučajne veličine a iz intervala $[0, 1]$ i množenjem sa faktorom π .

Slučajno mesto udara groma duž određenog raspona se takodje može simulirati izvlačenjem slučajne ravnomerno rasporedjene veličine b iz intervala $[0, 1]$. Deonica od stuba do mesta udara Δd_1 dobija se kao:

$$\Delta d_1 = b d_j \quad (8.44)$$

a deonica od mesta udara do drugog stuba:

$$\Delta d_2 = (1 - b) d_j \quad (8.45)$$

gde je d_j dužina j -tog raspona.

Metodom Monte - Karlo simulacije se može obuhvatati slučajna priroda preskočnog napona pri modelovanju preskoka na vazdušnoj izolaciji. Ako je poznata volt - sekundna karakteristika izolacije $U_{50\%}(t)$, koja predstavlja zavisnost 50 % preskočnog napona u funkciji vremena do preskoka za različite strmine talasa, tada je verovatnoća preskoka u trenutku t_i data izrazom:

$$P(U_{t_i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_{t_i}} e^{-\frac{[u - U_{50\%}(t)]^2}{2\sigma^2}} du \quad (8.46)$$

gde je σ srednje kvadratno odstupanje.

Slučajna vrednost preskočnog napona u trenutku t_i je U_{t_i} . Ona se dobija izvlačenjem slučajne promenljive $x = \frac{U_{t_i} - U_{50\%}(t)}{\sigma}$ koja je raspoređena po normalnom zakonu. Na osnovu slučajno određene veličine x određuje se slučajna vrednost napona:

$$U_{t_i} = x \cdot \sigma + U_{50\%}(t) \quad (8.47)$$

U svakom koraku se upoređuje napon na izolaciji sa slučajnom vrednošću preskočnog napona na izolaciji. Ukoliko je ovaj napon manji od preskočnog napona, ne javlja se preskok, a ako je veći, preskok se modeluje kratkim spajanjem konzole i faznog provodnika. Ukoliko se nije dogodio preskok, u narednom koraku se izvlači nova vrednost slučajne veličine x i izračunava nova vrednost preskočnog napona data izrazom 8.47.

8.7.1 Procena potrebnog broja simulacija

Pretpostavimo da se vrši n simulacija atmosferskih pražnjenja. Neka je rezultat svake simulacije ishod X , koji može imati vrednost 1 ako je došlo do kvara razmatranog izolacionog sistema, ili 0 ako nije došlo do kvara izolacionog sistema. Srednja vrednost ishoda računata po izrazu:

$$\overline{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (8.48)$$

predstavlja rizik kvara izolacije računat po izrazu 8.37.

Prema **centralnoj graničnoj teoremi** [33], ako je X slučajna promenljiva sa matematičkim očekivanjem $M(X)$ i standardnim odstupanjem σ , a $\overline{X}_n$ srednja vrednost slučajne veličine određena na uzorku od n simulacija, tada zakon raspodele veličine:

$$\frac{\overline{X}_n - M(X)}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (8.49)$$

teži ka normalnoj raspodeli kada $n \rightarrow \infty$.

U slučaju nezavisnih simulacija može se izračunati verovatnoća da razlika između matematičkog očekivanja $M(X)$ slučajne veličine X i njene srednje vrednosti $\overline{X}_n$ ispunjava uslov:

$$P \left\{ \left| M(X) - \overline{X}_n \right| < \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right\} \approx \gamma \quad (8.50)$$

gde su:

γ -nivo poverenja koji se računa kao $\gamma = 2 \Phi(\beta)$

Φ -tablična funkcija normalne raspodele u kumulativnom obliku,

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (8.51)$$

β -parametar od koga zavisi nivo poverenja.

Standardno odstupanje σ se može približno odrediti iz n opita na osnovu izraza:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_n)^2} \quad (8.52)$$

U tablici 8.7.1 date su vrednosti parametara β za nekoliko karakterističnih vrednosti nivoa poverenja γ prema [85].

γ	0,80	0,85	0,9	0,95	0,995
β	1,281	1,440	1,645	1,960	2,801

Tabela 8.2: Vrednost parametra β za različite nivoe poverenja

Matematičko očekivanje slučajne veličine X nalazi se, sa verovatnoćom γ , u granicama:

$$\bar{X}_n - \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq M(X) \leq \bar{X}_n + \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8.53)$$

Krajnje granice određuju nivo poverenja.

Može se uočiti da se sa porastom broja simulacija sužava interval poverenja, odnosno povećava tačnost postupka. Postoji više kriterijuma za procenu minimalnog broja simulacija radi dobijanja rezultata sa zadovoljavajućom tačnošću.

Kada se radi o diskretnim slučajnim promenljivima, kao što je promenljiva $X = 1$ kada je došlo do kvara izolacije, odnosno $X = 0$ kada nema kvara izolacije, tada se takav zakon raspodele može opisati **Bernulijevom raspodelom**. Verovatnoća nastupanja događaja X je p , a verovatnoća nenastupanja $q = 1 - p$. Ako se izvrši aproksimacija Bernulijeve raspodele normalnom raspodelom za veliki broj simulacija n , tada je matematičko očekivanje $M(X) = np$, a srednje kvadratno odstupanje $\sigma = \sqrt{npq}$.

Jedna od mogućih formula za procenu broja simulacija da bi se dobila relativna razlika ε između srednje vrednosti slučajne promenljive $\overline{X}_n$ za n simulacija i matematičkog očekivanja $M(X)$ data je u [85]:

$$n \geq \left\{ \frac{\beta}{\varepsilon} \right\}^2 \frac{1 - \overline{X}_n}{\overline{X}_n} \quad (8.54)$$

Na osnovu gornje formule ili sličnih izraza baziranih na drugim aproksimacijama može se proceniti broj potrebnih simulacija. Međutim, za izračunavanje broja simulacija potrebno je poznavati procenjenu srednju vrednost slučajne promenljive $\overline{X}_n$ na bazi prethodnih n simulacija.

8.8 Procena godišnjeg broja preskoka

U ovom poglavlju će biti opisane analitičke metode za jednostavnu procenu broja preskoka na vodovima ili broja kvarova izolacije opreme usled atmosferskih pražnjenja. Sve metode su bazirane na primeni eksponencijalnog zakona raspodele parametara struje groma.

8.8.1 Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda bez zaštitnog užeta

Pri direktnom udaru groma u fazni provodnik vazdušnog voda bez zaštitnog užeta se na faznom provodniku pojavljuje maksimalan prenapon dat ranije izvedenim izrazom:

$$U_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (8.55)$$

gde su:

Z_c —karakteristična impedansa faznog provodnika,

I_m —temena vrednost očekivane struje groma u dobro uzemljeni objekat,

U_f —napon na faznom provodniku.

Da bi nastupio preskok na izolaciji, potrebno je da napon na vodu generisan atmosferskim pražnjenjem bude viši od podnosivog udarnog napona izolacije U_{iz} . U slučaju zanemarenog radnog napona u trenutku pražnjenja kriterijum preskoka ima oblik:

$$Z_c \frac{I_m}{4} > U_{iz} \quad (8.56)$$

odakle se može odrediti kritična amplituda struje groma koja izaziva napon na vodu koji je viši od podnosivog udarnog napona izolacije.

Iz izraza 8.56 se dobija kritična struja koja izaziva preskok.

$$I_m > \frac{4 U_{iz}}{Z_c} \quad (8.57)$$

Verovatnoća pojavljivanja amplitude struje koja je veća od I_m može se odrediti na osnovu ranije opisanog eksponencijalnog zakona raspodele amplitude struje groma:

$$\overline{P}(I_m) = e^{-I_m/a} \quad (8.58)$$

gde koeficijent a ima vrednost:

- $a = 26,1 \text{ kA}$ za ravničarske predele sa malim otporom zemlje,
- $a = 13,0 \text{ kA}$ za planinske predele,

$\overline{P}(I_m)$ –verovatnoća da će se pojaviti struja groma I veća od struje I_m ,

I –slučajna amplituda struje groma.

Verovatnoća da će doći do preskoka jednaka je verovatnoći da granična struja groma koja izaziva preskok bude prevaziđjena, odnosno:

$$P(U_{iz}) = e^{-\frac{4 U_{iz}}{Z_c a}} \quad (8.59)$$

Ako je srednja visina faznog provodnika H , tada se godišnji broj pražnjenja na 100 km voda može proceniti na osnovu ranije datog izraza:

$$n_{1god,100km} = 2 \times 3 H 10^{-3} 100 N_g = 0,6 H N_g \quad (8.60)$$

gde su:

H – prosečna visina voda (m)

N_g – godišnja gustina pražnjenja po km^2 .

Kada se pomnoži godišnji broj pražnjenja u vod sa verovatnoćom preskoka, dobija se godišnji broj preskoka na vodu:

$$N_p = 2 \times 3 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot N_g \cdot P(U_{iz}) = 0,6 \cdot H \cdot N_g \cdot e^{-\frac{4}{a} \frac{U_{iz}}{Z_c}} \quad (8.61)$$

U izrazu 8.61 N_p predstavlja ukupan broj preskoka na izolaciji voda usled atmosferskih pražnjenja u fazni provodnik voda bez zaštitnog užeta. Ako je η stepen uspešnosti brzog automatskog ponovnog uključenja (APU), i ako je vod snabdeven odgovarajućom automatikom, tada je broj ispada voda usled direktnih pražnjenja u fazni provodnik:

$$N_{isp} = (1 - \eta) \cdot N_p \quad (8.62)$$

gde je $1 - \eta$ stepen neuspešnosti operacije APU. U našim mrežama se η kreće od 0,5 do 0,9.

Primer procene broja ispada nadzemnog voda nazivnog napona 35 kV bez zaštitnog užeta

U ovom slučaju se procenjuje godišnji broj preskoka na izolaciji vazdušnog voda usled direktnih atmosferskih pražnjenja u fazni provodnik.

Posmatrani vod ima sledeće osnovne parametre potrebne za procenu:

Visina faznog provodnika $H_f = 15 \text{ m}$

Karakteristična impedansa faznog provodnika $Z_c = 490 \Omega$

Podnosivi udarni napon izolacije $U_{iz} = 170 \text{ kV}$

Godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje $N_g = 2,81 \text{ 1/km}^2$

Koeficijent eksponencijalne funkcije raspodele amplitude struje groma $a = 26,1 \text{ kA}$

Sistem radi bez automatskog ponovnog uključenja.

Godišnji broj pražnjenja u vod dužine 100 km se može približno izračunati iz sledeće relacije:

$$n_{1god,100km} = 0,6 N_g H_f = 25,3 \quad (8.63)$$

Verovatnoća da pri jednom udaru dodje do preskoka na izolaciji je:

$$P(U_{iz}) = e^{-\frac{4}{a} \frac{U_{iz}}{Z_c}} = 0,94 \quad (8.64)$$

Kada se izračuna godišnji broj preskoka na 100 km voda, dobija se:

$$N_p = n_{1god,100km} P(U_{iz}) = 23,8 (1/100km, 1god) \quad (8.65)$$

Svaki preskok na izolaciji predstavlja trajan ispad voda jer ne postoji brzo automatsko ponovno uključenje.

8.8.2 Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji vazdušnog voda sa zaštitnim užetom

Povratni preskok može nastati usled udara groma u vrh stuba ili njegovu neposrednu okolinu ili usled udara groma u zaštitno uže. Smatra se da je udar u stub i onda kada se pražnjenje dogodi u zaštitno uže u blizini stuba tako da na amplitudu struje kroz stub nema uticaja odvodjenje struje pražnjenja kroz susedne stubove. Smatra se da se oko 50% pražnjenja mogu tretirati kao da su se dogodila u vrh stuba, a ostalih 50 % u zaštitno uže, tako da i susedni stubovi utiču na prelazni proces na posmatranom stubu.

Ukoliko je vod snabdeven zaštitnim užetom i udar groma je u stub, tada se smatra da veći deo struje protiče kroz stub, a manji deo odlazi po zaštitnim užadima levo i desno od posmatranog stuba, odnosno:

$$I_{st} = K_{st} \cdot I_g \quad (8.66)$$

gde su:

I_g —amplituda struje groma (kA),

I_{st} —amplituda struje kroz stub (kA),

K_{st} —koeficijent koji pokazuje koji deo struje ide kroz stub.

Obično se usvaja da je $K_{st} = 0,8$, što pokazuje da 80 % struje atmosferskog pražnjenja prolazi kroz najbliži stub, a po 10 % protiče sa svake strane po zaštitnim užadima.

Naprotiv, ako je udar u zaštitno uže na rasponu, tada samo polovina ukupne struje groma putuje ka jednom stubu, pa je koeficijent koji pokazuje koji deo struje ide kroz stub upola manji, jer susedni stub preuzima jednak deo struje pražnjenja. U ovom slučaju je struja kroz stub:

$$I_{st} = 0,5 K_{st} I_g \quad (8.67)$$

U ovom slučaju se može usvojiti da je $K_{st} = 0,9$. Proračun verovatnoće povratnog preskoka usled proticanja struje kroz stub može se izvršiti metodom opasnih parametara. Kriterijum

povratnog preskoka uz zanemaren uticaj radnog napona je:

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot I_{st} + L_{st} \cdot S_{st} \quad (8.68)$$

Kada se zameni struja kroz stub ukupnom strujom atmosferskog pražnjenja, dobija se:

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot K_{st} \cdot I_g + L_{st} \cdot K_{st} \cdot S_g \quad (8.69)$$

gde su:

I_g —amplituda struje groma (kA),

I_{st} —amplituda struje kroz stub (kA),

S_g —strmina struje groma ($kA/\mu s$),

S_{st} —strmina struje kroz stub ($kA/\mu s$),

L_{st} —induktivnost stuba (μH),

R_{uz} —otpornost uzemljenja stuba (Ω).

U razmatranom modelu je pretpostavljeno da je struja linearno rastućeg čela, čime se proračun značajno pojednostavljuje.

Kriterijum povratnog preskoka se na osnovu izraza 8.69 može pisati u sledećoj formi:

$$\frac{I_g}{I_M} + \frac{S_g}{S_M} > 1 \quad (8.70)$$

gde su:

$$I_M = \frac{U_{iz}}{R_{uz} K_{st}} \quad (8.71)$$

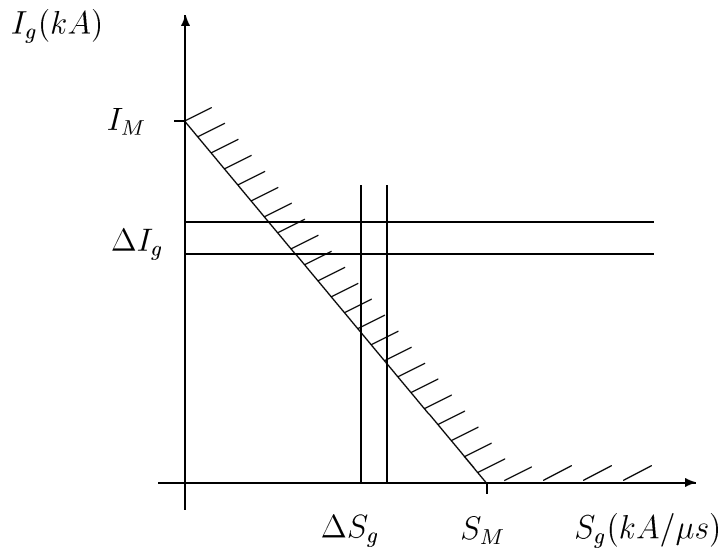
$$S_M = \frac{U_{iz}}{L_{st} K_{st}} \quad (8.72)$$

Na osnovu kriterijuma povratnog preskoka koji je dat izrazom 8.70 formirana je kriva opasnih parametara, koja je prikazana na slici 8.18. Sva atmosferska pražnjenja čija je amplituda iznad krive opasnih parametara izazivaju povratni preskok.

Verovatnoća pojave atmosferskog pražnjenja sa amplitudom u opsegu I_g i $I_g + \delta I_g$ i sa strminom u opsegu S_g i $S_g + \delta S_g$, što odgovara elementarnoj površini iznad krive opasnih parametara, iznosi:

$$dP = \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.73)$$

gde su:



Slika 8.18: Kriva opasnih parametara za slučaj udara groma u vrh stuba

$\omega_1(I_g)$ –gustina raspodele amplitude struje groma data eksponencijalnom funkcijom:

$$\omega_1(I) = -\frac{1}{a} e^{-\frac{I_g}{a}} \quad (8.74)$$

$\omega_2(S_g)$ –gustina raspodele strmine struje groma data eksponencijalnom funkcijom, odnosno:

$$\omega_2(I) = -\frac{1}{b} e^{-\frac{S_g}{b}} \quad (8.75)$$

Verovatnoća da će jedno atmosfersko pražnjenje u stub izazvati povratni preskok je:

$$P_{ps} = \int_D \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \delta S_g \quad (8.76)$$

Oblast D iznad krive opasnih parametara je data sledećim granicama:

- Za strminu struje koja se menja od 0 do S_M amplituda struje se menja od prave $i = (1 - \frac{S_g}{S_M})I_M$ do ∞ ,
- Za strminu struje koja se menja od S_M do ∞ amplituda struje se menja od 0 do ∞ .

Posle zamene u izraz za verovatnoću povratnog preskoka 8.76 se dobija:

$$P_{ps} = \int_0^{I_M} \int_i^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g + \int_{I_M}^\infty \int_0^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.77)$$

U izrazu 8.77 P_{ps} predstavlja verovatnoću povratnog preskoka usled atmosferskog pražnjenja u vrh stuba ili u njegovu blizinu, što se može tretirati kao pražnjenje u vrh stuba.

Posle izvršenog integraljenja, vodeći računa da je donja granica u prvom integralu $i = (1 - \frac{S_g}{S_M})I_M$, dobija se sledeći analitički izraz:

$$P_{ps} = \frac{bI_M e^{-S_M/b} - aS_M e^{-I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.78)$$

Verovatnoća povratnog preskoka usled pražnjenja u sredinu raspona se dobija potpuno identičnim postupkom, jedino je deo struje koji ide kroz svaki stub upola manji.

Ukupan broj povratnih preskoka na posmatranom vodu se može izračunati podelom ukupne dužine voda na dva dela. Jedan deo voda se odnosi na okolinu stubova, kada se pražnjenje u zaštitno uže posmatra kao pražnjenje u stub, a drugi deo se posmatra kao pražnjenje u raspon kada oba stuba dele struju pražnjenja. Pri pražnjenjima u sredinu raspona se mora voditi računa da pri nailasku upadnog strujnog talasa po kanalu groma u tački udara talas nailazi na zaštitno uže koje se produžava sa obe strane mesta udara simetrično, tako da je njegova ekvivalentna karakteristična impedansa istog reda veličine kao i kod kanala groma, pa se može smatrati da su i amplituda i strmina struje groma u ovom slučaju dva puta manje nego kod udara u vrh stuba, koji se može smatrati dobro uzemljenim objektom.

Kriterijum preskoka, koji je bio dat izrazom 8.78 sada postaje:

$$\frac{I_g}{2 \cdot I_M} + \frac{S_g}{2 \cdot S_M} > 1 \quad (8.79)$$

Kada se, sa novim granicama izračuna verovatnoća povratnog preskoka, usled pražnjenja u raspon, obeležena sa P_{pr} , dobija se:

$$P_{pr} = \frac{bI_M e^{-2S_M/b} - aS_M e^{-2I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.80)$$

Ako je za posmatranu deonicu voda verovatnoća atmosferskog pražnjenja u stub (ili u okolinu stuba sa efektima kao da je do pražnjenja došlo u stub) P_{st} , tada je verovatnoća pražnjenja u raspon $P_{ras} = 1 - P_{st}$. Pri tome se smatra da postoji ravnomerna raspodela verovatnoće mesta pražnjenja, tako da je verovatnoća pražnjenja u stub ili u raspon srazmerna dužini voda u okolini stuba na kojoj se pražnjenje smatra da je u stub, odnosno preostaloj dužini voda na rasponu.

Ukupan broj povratnih preskoka na posmatranom vodu dužine d se može izračunati kao zbir povratnih preskoka usled udara u stub ili u njegovu okolinu, sa efektima kao da je

do udara došlo u stub, kao i usled udara u raspon, odnosno:

$$N_{pp} = 6 N_g H_{ef} \cdot 10^{-3} d [P_{st} P_{ps} + P_{ras} P_{pr}] \quad (8.81)$$

gde su:

N_g —godišnja gustina pražnjenja u zemlju ($1/km^2, 1god$)

H_{ef} —efektivna visina zaštitnog užeta (m).

Izraz 8.81 je dobijen na bazi najjednostavnije relacije za atraktivnu površinu dalekovoda kao pojasa širine $3 H_{ef}$ sa obe strane voda. Pražnjenja koja bi se dogodila u zemlju u tom pojasu događaju se u vod, a ostala pražnjenja se događaju u zemlju.

Broj povratnih preskoka na 100 km voda se dobija na osnovu sledećeg izraza:

$$N_{pp100km} = N_{pp} \frac{100}{d} \quad (8.82)$$

Primer procene broja ispada nadzemnog voda nazivnog napona 35 kV sa zaštitnim užetom

U ovom primeru se procenjuje godišnji broj preskoka na izolaciji nadzemnog voda usled povratnih preskoka nastalih atmosferskim pražnjenjima u zaštitno uže.

Posmatrani vod ima sledeće osnovne parametre potrebne za procenu:

Visina zaštitnog užeta $H_z = 16,5 m$

Podnosivi udarni napon izolacije $U_{iz} = 170 kV$

Induktivnost stuba $L_{st} = 9,9 \mu H$

Otpornost uzemljenja stuba $R_{uz} = 15 \Omega$. Pri proceni će se smatrati da se udarna impedansa uzemljenja može aproksimirati stacionarnom otpornošću.

Usvojeni koeficijent odnosa struje kroz stub prema ukupnoj struji (koja se raspoređuje i kroz stub i po zaštitnim užadima) $K_{st} = 0,8$

Koeficijent eksponencijalne funkcije raspodele amplitude struje groma $a = 26,1 kA$

Koeficijent eksponencijalne funkcije raspodele strmine struje groma $b = 15,6 kA/\mu s$

Godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje $N_g = 2,81 \text{ 1/km}^2$

Granična amplituda struje pražnjenja koja izaziva preskok pri nultoj strmini struje iz izraza 8.71 je:

$$I_M = 14,2 \text{ kA} \quad (8.83)$$

Granična strmina struje pražnjenja koja izaziva preskok pri nultoj amplitudi struje iz izraza 8.72 je:

$$S_M = 21,4 \text{ kA}/\mu\text{s} \quad (8.84)$$

Kada se zamene vrednosti za verovatnoću preskoka usled jednog pražnjenja u stub iz izraza 8.78, dobija se:

$$P_{ps} = 0,795 \quad (8.85)$$

Verovatnoća preskoka usled jednog pražnjenja u raspon, prema izrazu 8.80, posle izračunavanja ima vrednost:

$$P_{pr} = 0,52 \quad (8.86)$$

Ako smatramo da se 40 % pražnjenja odvija u stubove, a 60 % u raspone, tada je godišnji broj povratnih preskoka, prema izrazu 8.81:

$$N_{pp100km} = 17,5 \text{ (1/100km, 1god)} \quad (8.87)$$

Godišnji broj isključenja voda usled povratnih preskoka je malo manji od godišnjeg broja isključenja voda usled direktnih pražnjenja u vod bez zaštitnih užadi. Međutim, može se uočiti da je razlika u broju preskoka usled direktnih pražnjenja u vod bez zaštitnog užeta i broja preskoka u vod sa zaštitnim užetom mala, što je razlog zbog čega nije neophodno na srednjenaponskim vodovima postavljati zaštitnu užad. Naime, zbog niske vrednosti preskočnog napona izolacije velika je verovatnoća da pri pražnjenju u stub dodje do preskoka na izolaciji ($P_{ps} = 0,782$), odnosno pri pražnjenju u uže na rasponu ($P_{pr} = 0,5$), što dovodi do velikog broja godišnjih broja preskoka. Ova verovatnoća bi se mogla smanjiti na dva načina:

- smanjivanjem udarne otpornosti uzemljenja
- smanjivanjem visine stuba (zbog smanjivanja atraktivne površine voda i zbog smanjivanja induktivnosti stuba).

Ako bi se smanjila udarna otpornost uzemljenja stuba sa 15Ω na 5Ω , tada bi broj preskoka bio:

$$N_{pp100km} = 9,4 \text{ (1/100km, 1god)} \quad (8.88)$$

Smanjivanjem visine stuba na 11 m pri otpornosti uzemljenja od $R = 15 \Omega$ broj preskoka bi postao:

$$N_{pp100km} = 10,5 \text{ (1/100km, 1god)} \quad (8.89)$$

Vidi se da se promenom konstrukcije stuba može bitno uticati na broj povratnih preskoka. Nažalost, oblasti koje su karakteristične po izraženoj grmljavinskoj aktivnosti u našoj zemlji imaju i vrlo veliku specifičnu otpornost zemlje, tako da je nemoguće postići malu otpornost uzemljenja stuba. Tada je povoljnije vazdušni vod raditi bez zaštitnog užeta, jer uže nema zaštitnog efekta, a izgradnja voda je dosta jeftinija.

8.8.3 Procena godišnjeg broja preskoka na izolaciji nadzemnog voda usled indukovanih prenapona

Indukovani prenapon na faznom provodniku nadzemnog voda efektivne visine h usled udara groma u zemlju na rastojanju b od voda može se proceniti na osnovu ranije navedenog empirijskog izraza za indukovane prenapone:

$$U_{max} = k \frac{I_m h}{b} \quad (8.90)$$

gde su:

I_m —temena vrednost struje atmosferskog pražnjenja,

k —empirijski faktor koji ima vrednost od 30 do 60, stim što se u našoj praksi koristi vrednost $k = 30$,

h —efektivna visina faznog provodnika (m),

b —udaljenost mesta udara od voda (m).

Granična amplituda struje atmosferskog pražnjenja I_g u blizinu vazdušnog voda koja će izazvati pojavu indukovnog napona na faznom provodniku, koji je viši od podnosivog udarnog napona izolacije U_{iz} , dobija se na osnovu kriterijuma:

$$U_{iz} < k \frac{I_g h}{b} \quad (8.91)$$

Kada se odredi granična struja, dobija se:

$$I_g > \frac{U_{iz} b}{k h} \quad (8.92)$$

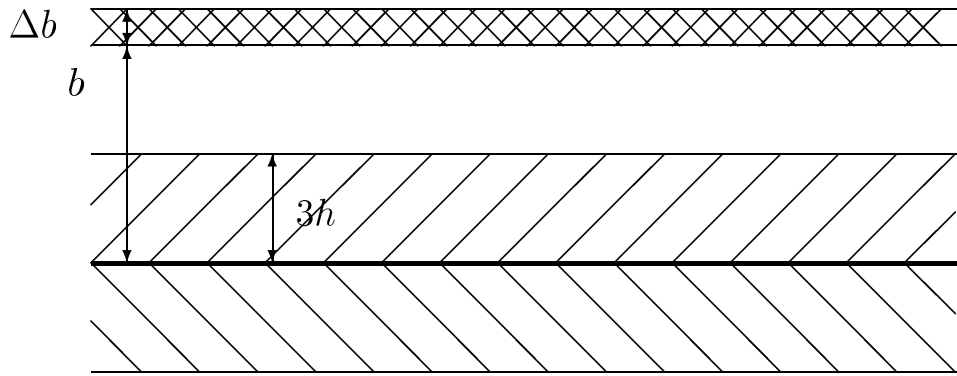
Verovatnoća pojave struje groma $I_g > I$ može se opisati eksponencijalnom funkcijom:

$$P(I_g) = e^{-\frac{I_g}{a}} \quad (8.93)$$

Verovatnoća pojave indukovanog napona većeg od podnosivog udarnog napona izolacije može se dobiti zamenom granične struje koja izaziva preskok na izolaciji iz izraza 8.92 u kumulativni zakon raspodele amplituda struja groma dat izrazom 8.93:

$$P(U_{iz}) = e^{-\frac{U_{iz}b}{kah}} \quad (8.94)$$

U analizi indukovanih prenapona je pretpostavljeno da svi udari na rastojanju $b < 3h$ izazivaju direktna pražnjenja u vod. Pražnjenja na većim rastojanjima se odvijaju u zemlju ili druge objekte, izazivajući pojavu indukovanih prenapona. Očekivani broj udara groma u elementarnu površinu širine Δb i dužine d se računa prema slici 8.19. Kada se izračuna broj



Slika 8.19: Proračun broja udara u zonu širine Δb na udaljenosti b od vazdušnog voda

pražnjenja u elementarni pojas širine $\Delta b(m)$, dužine $d(km)$, dobija se:

$$\Delta n = N_g d 10^{-3} \Delta b \quad (8.95)$$

gde je N_g godišnja gustina atmosferskih pražnjenja po km^2 . Elementarni broj pražnjenja koji izaziva preskok na izolaciji voda zbog indukovanih prenapona je:

$$\Delta N_{pr} = N_g d 10^{-3} e^{-\frac{U_{iz}b}{kah}} \Delta b \quad (8.96)$$

Ako se računa da do atmosferskog pražnjenja može da dodje sa obe strane voda, integriranjem broja udara od rastojanja $b = 3h$ do ∞ , dobija se ukupan očekivani godišnji broj udara koji ugrožava izolaciju:

$$N_{pr} = 2 \cdot 10^{-3} \int_{3h}^{\infty} N_g d e^{-\frac{U_{iz}b}{kah}} \Delta b \quad (8.97)$$

Posle izračunavanja integrala se dobija:

$$N_{pr} = \frac{2 k a h d}{U_{iz}} e^{-\frac{3U_{iz}}{ka}} 10^{-3} \quad (8.98)$$

Izraz 8.98 daje godišnji broj preskoka samo usled indukovanih prenapona duž voda dužine $d(km)$. Broj preskoka sveden na 100 km dobija se primenom sledeće proporcije:

$$N_{pr_{100km}} = N_{pr} \frac{100}{d} \quad (8.99)$$

Primer procene broja ispada vazdušnog voda nazivnog napona 35 kV usled indukovanih prenapona

U ovom slučaju se procenjuje godišnji broj preskoka na izolaciji usled indirektnih atmosferskih pražnjenja u blizinu posmatranog voda.

Posmatrani vod ima sledeće osnovne parametre potrebne za procenu:

Visina faznog provodnika $H_f = 15 m$

Karakteristična impedansa faznog provodnika $Z_c = 490 \Omega$

Podnosivi udarni napon izolacije $U_{iz} = 170 kV$

Godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje $N_g = 2,81 1/km^2$

Koeficijent eksponencijalne funkcije raspodele amplitude struje groma $a = 26,1 kA$

Empirijski koeficijent za indukovane prenapone $k = 30$

Kada se zamene vrednosti u izraze 8.98 i 8.99, dobija se:

$$N_{pr_{100km}} = 7,2 (1/1god, 100km) \quad (8.100)$$

8.9 Analiza broja ispada nadzemnog voda 400 kV

Da bi se ilustrovao postupak proračuna godišnjeg broja ispada nadzemnih vodova, izvršena je numerička analiza atmosferskih prenapona na nadzemnom vodu nazivnog napona 400 kV ,

razmatrajući dva različita tipa stuba, uz ispitivanje osetljivosti rezultata proračuna na pojedine parametre stuba. Analizirana je mogućnost smanjivanja dimenzija stuba (kompaktizacija dalekovoda) i snižavanja stupnja izolacije sa stanovišta uštede u investicijama prilikom izgradnje novih vodova. Pri analizi su posmatrani procesi pri povratnom preskoku i pri pražnjenjima mimo zaštitnog užeta, dok prenaponi usled indirektnog udara groma nisu razmatrani jer su potpuno bezopasni za izolaciju voda nazivnog napona 400 kV.

8.9.1 Povratni preskok

Za analizu atmosferskih prenapona na nadzemnom 400 kV vodu je posmatran samo jedan raspon.

Pretpostavljena su sledeća mesta atmosferskih pražnjenja u vod:

- u vrh stuba (tačka T_1)
- na četvrtinu raspona (tačka 2)
- na polovinu raspona (tačka 3)
- na tri četvrtine raspona (tačka 4)
- u vrh drugog stuba (tačka T_5)

Razmatrani slučajevi su prikazani na slici 8.20.

Razmatrani vod imao je sledeće podatke:

Dužina raspona $l = 340$ m,

Karakteristična impedansa zaštitnog užeta $Z_z = 555$ Ω ,

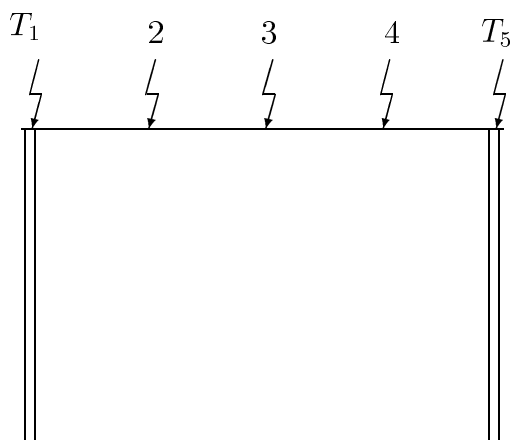
Karakteristična impedansa faznog provodnika $Z_f = 356$ Ω ,

Karakteristična impedansa kanala groma $Z_g = 300$ Ω ,

Visina stuba $H_s = 29$ m,

Razmak izmedju zaštitnih užadi $b = 18$ m,

Vertikalni razmak izmedju vrha stuba i konzole, dužine 6 m,



Slika 8.20: Variranje mesta udara groma duž raspona voda

Razmak od konzole do uzemljenja 23 m,

Otpornost uzemljenja stuba $R_{uz} = 15 \Omega$,

Podnosivi udarni napon izolacije $U_{iz} = 1425 kV$,

Sniženi podnosivi udarni napon izolacije $U_{iz} = 1300 kV$,

Volt–sekundna karakteristika 50 % preskočnog napona za standardni atmosferski talas 1,2/50 $\mu s/\mu s$ za jednostruki izolatorski lanac od 19 članaka snabdeven sa zaštitnom armaturom čiji je razmak između elektroda 2370 mm koji odgovara punom stupnju izolacije, za nazivni napon nadzemnog voda od 400 kV, prikazana je na slici 8.21. Usvojen je keraunički nivo područja od 30 grmljavinskih dana godišnje, kome odgovara godišnja gustina pražnjenja od 2,81 pražnjenja po km^2 . Godišnji broj pražnjenja u 100 km voda proračunat je primenom sledećeg izraza:

$$n_{1god,100km} = 0,1N_g(b + 28H_{uz}^{0,6}) \quad (8.101)$$

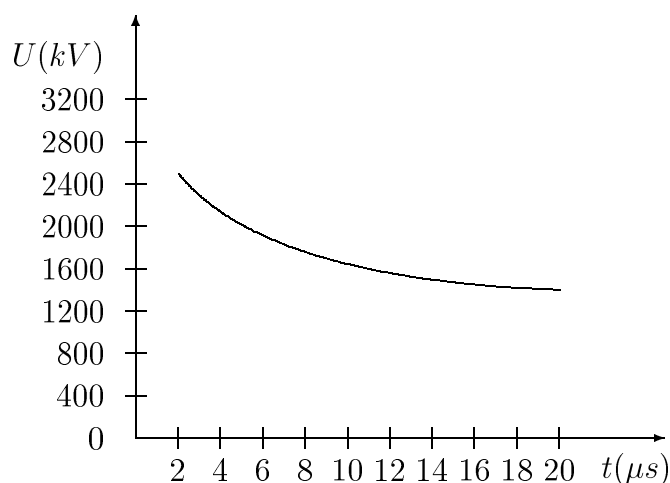
gde su:

b –razmak između zaštitnih užadi (m),

H_{uz} –prosečna visina zaštitnog užeta (m).

Kada se izračuna, dobija se:

$$n_{1god,100km} = 77 (1/god,100km) \quad (8.102)$$



Slika 8.21: Volt–sekundna karakteristika izolacije izolatorskog lanca nazivnog napona 400 kV

Gornji broj predstavlja ukupan broj pražnjenja u elemente voda. Smatramo da dominantan atraktivni efekat imaju zaštitna užad, tako da se usvaja da je taj broj približno broj pražnjenja u zaštitnu užad.

Efektivne širine stubova (merene na sredini visine stuba), kao i karakteristične impedanse pojedinih tipova portalnih stubova koji su dati na slici 8.27 i Y stubova na slici 8.28, na narednim stranicama, prikazane su u tablici 8.3.

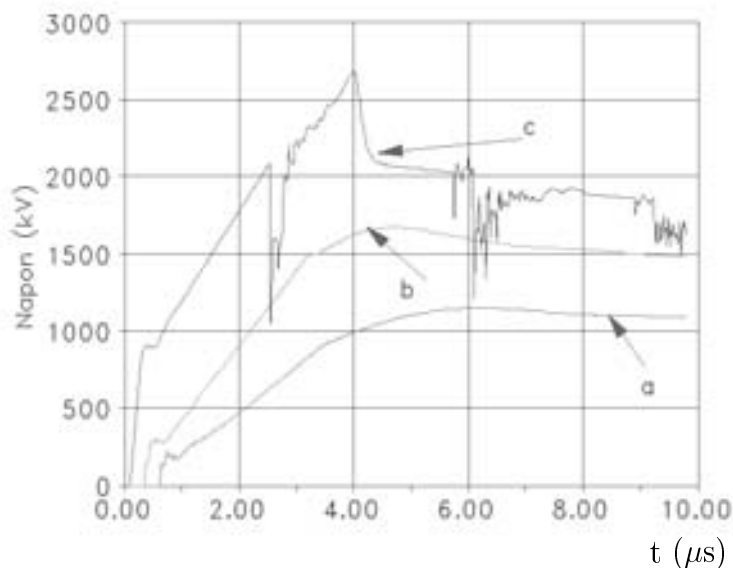
Br.	Tip stuba	Efektivna širina stuba (m)	Karakteristična impedansa (Ω)
1.	Portal (a)	16,7	85
2.	Portal (b)	12,3	87,4
3.	Portal (c)	11,4	88,3
4.	Y (a)	4	127
5.	Y (b)	4	127

Tabela 8.3: Karakteristične impedanse pojedinih tipova stubova

Pri ovoj analizi je impulsna impedansa uzemljivača stuba zamenjena konstantnom otpornošću koja odgovara stacionarnoj otpornosti uzemljenja.

Radi ilustracije na slici 8.22 prikazani su vremenski tokovi napona na konzoli iznad faznog provodnika za atmosfersko pražnjenje u zaštitno uže na sredini raspona, na četvrtini

raspona od posmatranog stuba i u sam vrh stuba. Proračun je urađjen za atmosfersko pražnjenje čija je amplituda struje $I_m = 121 \text{ kA}$ i strmina struje $S = 43,2 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Ovo su parametri koji mogu da budu prevaziđeni sa verovatnoćom od samo 2 %. Verovatnoća



Slika 8.22: Vremenski tokovi napona za udar u zaštitno uže u a) polovinu raspona , b) četvrtinu raspona, c) vrh stuba

da će doći do preskoka pri određenom mestu udara groma određena je metodom opasnih parametara. Na slici 8.23 prikazana je zavisnost verovatnoće povratnog preskoka od mesta pražnjenja za portalni stub (a) sa slike 8.27 za pun izolacioni nivo. Rastojanje mesta pražnjenja je mereno od levog stuba prema desnom stubu duž raspona.

Može se uočiti da je najmanja verovatnoća povratnog preskoka ako do pražnjenja dodje u sredinu raspona i da verovatnoća raste ukoliko se mesto udara približava stubovima. Pošto oba stuba imaju iste vrednosti otpornosti uzemljenja, ova kriva je simetrična u odnosu na sredinu raspona. Na slici 8.24 prikazane su krive opasnih parametara za ovaj slučaj.

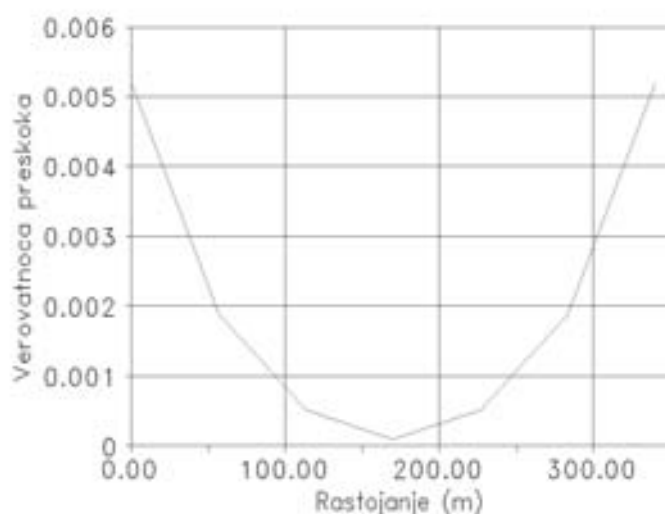
Očekivani godišnji broj pražnjenja na 100 km voda izračunat je primenom sledećeg izraza:

$$n_{1god,100km} = 0,1N_g(b + 28H_{uz}^{0,6}) \quad (8.103)$$

Ako se usvoji da je srednja visina užeta jednaka visini stuba, dobija se:

$$n_{1god,100km} = 64,4 (1/god, 100km) \quad (8.104)$$

za srednju godišnju gustinu pražnjenja po km^2 horizontalne ravne površine zemlje $N_g = 2,81 \text{ 1/km}^2, \text{ god.}$



Slika 8.23: Verovatnoća povratnog preskoka u zavisnosti od tačke udara groma na rasponu

Godišnji broj preskoka na analiziranom rasponu se dobija sabiranjem broja preskoka usled pražnjenja na pojedine elementarne deonice voda dužine Δd (km). U razmatranom slučaju dužina svake elementarne deonice je $\Delta d = 0,085$ km, za $i = 1, 2, \dots, 5$. Verovatnoća pražnjenja u vrh stuba se uvećava za 30 % u odnosu na raspon. Srednja verovatnoća preskoka na i -toj deonici voda je:

$$P_{sr_i} = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \quad (8.105)$$

gde je P_i verovatnoća preskoka usled udara groma u tačku i .

Ukoliko se uvažava povećanje verovatnoće pražnjenja u stub u odnosu na pražnjenje u zaštitno uže na sredini raspona, tada se može napisati izraz za srednji godišnji broj preskoka na deonici dužine Δd u obliku:

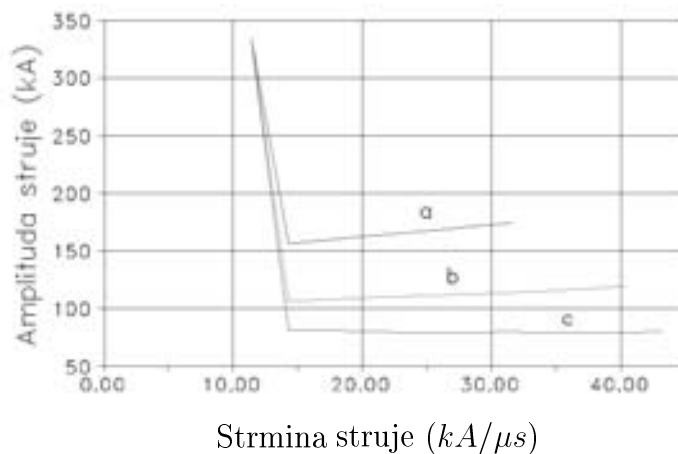
$$N_{1god, \Delta d} = \frac{0,5 \cdot (P_{s_i} K_s \Delta d + P_{i+1} \Delta d) n_{1god, 100km}}{100} \quad (8.106)$$

gde su:

P_{s_i} – verovatnoća pražnjenja u tačku i na vrhu stuba,

K_s – koeficijent povećanja verovatnoće udara u stub.

Može se usvojiti da je $K_s = 1,3$ što znači da je za 30% veća verovatnoća udara groma u stub nego u uže.



Slika 8.24: Krive opasnih parametara za udar u zaštitno užje u a) polovinu raspona, b) četvrtinu raspona, c) vrh stuba

Godišnji broj udara na deonici dužine Δd u km koji izaziva preskok je:

$$N_{1god,\Delta d} = \frac{P_{si} \cdot \Delta d \cdot n_{1god,100km}}{100} \quad (8.107)$$

Za razmatrani slučaj voda na portalnim stubovima sa slike 8.27 (a) sa podacima u tablici 8.4, prikazane su verovatnoće preskoka pri udaru u pojedine tačke duž raspona, srednje verovatnoće preskoka na pojedinim deonicama, kao i očekivani godišnji broj preskoka na pojedinim deonicama raspona.

Br.	Rastojanje (m)	Verovatnoća preskoka	Godišnji broj preskoka
1	0	0.00518	0.021427
2	85	0.0011	0.00326
3	170	9.2E-05	0.00326
4	255	0.0011	0.021427
5	340	0.00518	-

Tabela 8.4: Rezultati statističkog proračuna verovatnoće preskoka po pojedinim deonicama

Poslednje dve kolone u kojima su izračunate srednje verovatnoće preskoka i godišnji broj preskoka usled udara groma u deonicu odnose se na određenu deonicu između dve tačke na vodu. Zbog toga je broj vrsta koji odgovara broju deonica za jedan manji od broja vrsta koji odgovara broju tačaka na vodu, pa je poslednje mesto u zadnjoj koloni prazno.

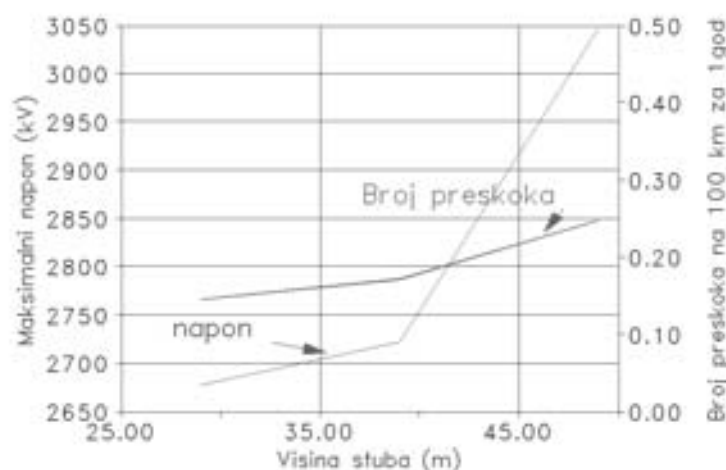
Sabiranjem broja preskoka po svim deonicama posmatranog raspona iz poslednje kolone se dobija godišnji broj preskoka usled udara groma u posmatrani raspon. Kada se izračuna, dobija se $N_{1god,340\text{ m}} = 0,0494 \text{ 1/god}$. Godišnji broj preskoka na 100 km voda se dobija svodjenjem broja preskoka sa posmatranog raspona na dužinu od 100 km, odnosno:

$$N_{1god,100\text{ km}} = \frac{N_{1god,\Delta d} \cdot 100}{\Delta d} \quad (8.108)$$

Kada se izračuna, dobija se $N_{1god,100\text{ km}} = 0,1452 \text{ 1/god, 100km}$.

Ispitivanje osetljivosti godišnjeg broja ispada na visinu stubova

Izvršen je proračun maksimalnog prenapona za slučaj udara u vrh stuba, kao i analiza godišnjeg broja preskoka na 100 km voda za tri različite visine stubova. Analizirani su portalni stubovi visina 29 m, 39 m i 49 m. Rezultati analize su prikazani u grafičkom obliku na slici 8.25.

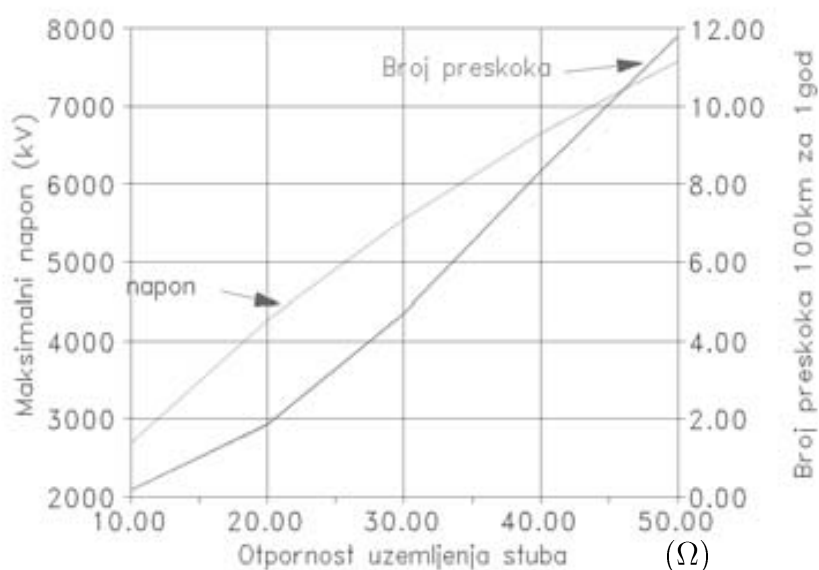


Slika 8.25: Uticaj visine stuba na visinu prenapona i očekivani broj preskoka na 100 km nadzemnog voda

Može se uočiti da sa porastom visine stuba blago raste i visina prenapona, odnosno godišnji broj preskoka na 100 km voda.

Ispitivanje osetljivosti godišnjeg broja ispada na otpornost uzemljenja stuba

Poznato je da otpornost uzemljenja stuba ima dominantan uticaj na visinu prenapona i rizik preskoka izolacije pri pojavi atmosferskog pražnjenja u vrh stuba ili zaštitno uže. Verovatnoća povratnog preskoka se značajno povećava sa porastom otpornosti uzemljenja stubova. Da bi se ovaj efekat ilustrovao, izvršen je proračun maksimalnog prenapona pri udaru groma u vrh stuba, kao i godišnji broj preskoka na 100 *km* voda ranije opisanim postupkom za otpornosti uzemljenja stubova koje su varirane od 10 Ω do 50 Ω . Rezultati su prikazani na slici 8.26.



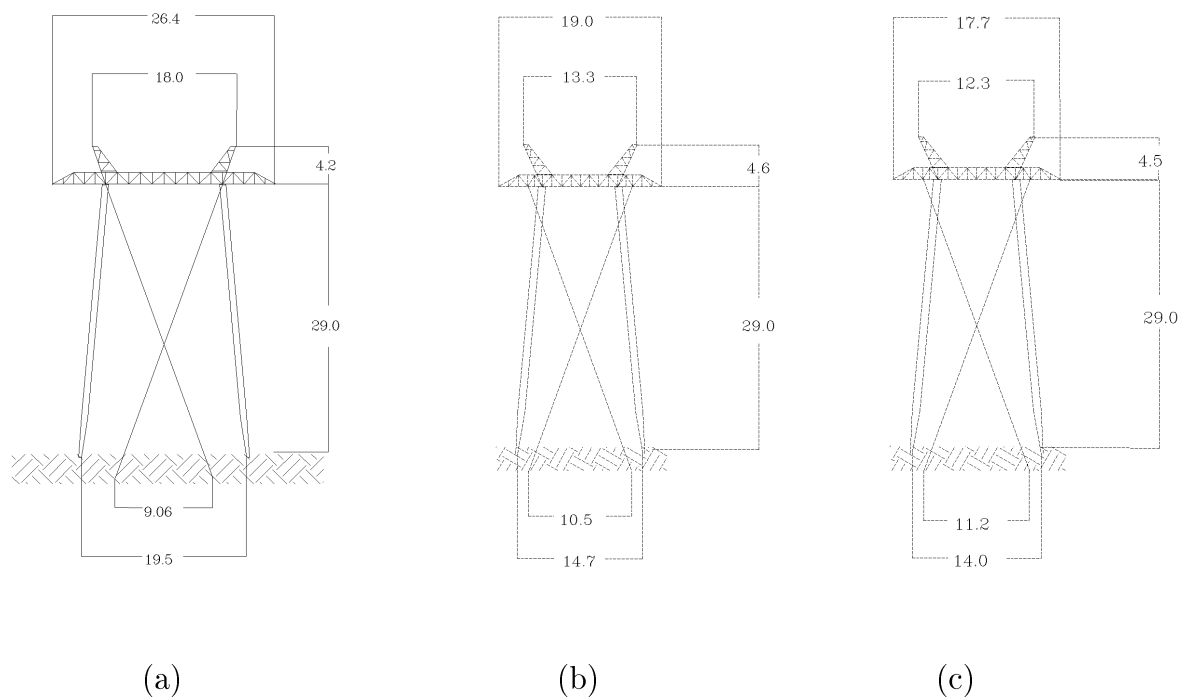
Slika 8.26: Uticaj otpornosti uzemljenja stuba na visinu prenapona i očekivani broj preskoka na 100 km nadzemnog voda

Ispitivanje osetljivosti godišnjeg broja ispada na konstrukciju stuba

Da bi se ilustrovao uticaj oblika glave stuba na rizik povratnog preskoka, izvršena je analiza rizika preskoka za više različitih konstrukcija stubova. Na slici 8.27 a), b) i c) prikazana su tri tipa portalnih stubova sa označenim dimenzijama, a na slici 8.28 a) i b) prikazana su dva tipa Y stubova sa dimenzijama. Konstrukcije stubova su dobijene od Minel Projekt-inženjeringa iz Beograda.

Uvedene su sledeće oznake:

P_1 1425/1050 –Stub na slici 8.27 a) sa izolacijom sa atmosferskim podnosivim naponom



Slika 8.27: Tri tipa portalnih stubova

1425 kV i sklopnim podnosivim naponom 1050 kV

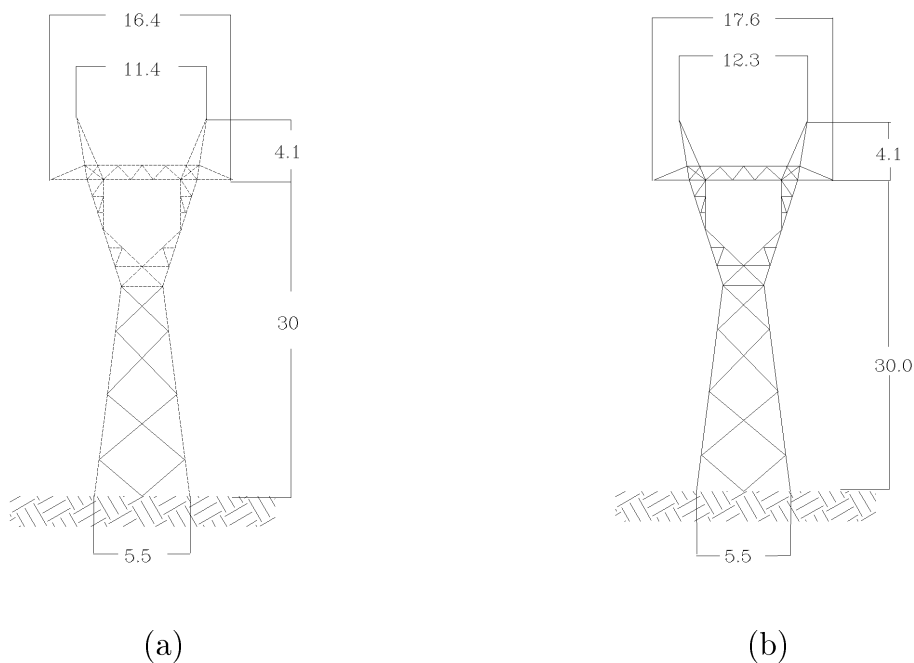
P_2 1425/1050 –Stub na slici 8.27 b) sa atmosferskim podnosivim naponom 1425 kV i sklopnim podnosivim naponom 1050 kV

P_3 1300/950 –Stub na slici 8.27 c) sa atmosferskim podnosivim naponom 1300 kV i sklopnim podnosivim naponom 950 kV

Y_1 1425/1050 –Stub na slici 8.28 a) sa atmosferskim podnosivim naponom 1425 kV i sklopnim podnosivim naponom 1050 kV

Y_2 1300/950 –Stub na slici 8.28 b) sa atmosferskim podnosivim naponom 1300 kV i sklopnim podnosivim naponom 950 kV

U tablici 8.5 u prvoj koloni dat je naziv stuba, u drugoj koloni dat je godišnji broj ispada voda na 100 km, za otpornost uzemljenja stuba od $R_{uz} = 15 \Omega$, dok je u trećoj koloni data

Slika 8.28: Dva tipa Y stubova

procentualna promena broja povratnih preskoka u odnosu na bazni slučaj iz prve vrste za stub P_1 sa punim izolacionim nivoom.

Može se uočiti da promena geometrije glave stuba nema bitan uticaj na godišnji broj povratnih preskoka. Snižavanje izolacionog nivoa ima značajan uticaj na broj preskoka, mada je taj broj dovoljno mali i za izolacioni nivo od 1300 kV .

8.9.2 Pražnjenje mimo zaštitnog užeta

Verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta bitno zavisi od geometrije glave stuba. Posebno veliki uticaj na verovatnoću pražnjenja mimo zaštitnog užeta ima visina stuba i zaštitni ugao koji čini vertikalna povučena kroz centar zaštitnog užeta i prava povučena kroz centre zaštitnog užeta i faznog provodnika.

Tip stuba	Godišnji broj preskoka na 100 km N_{pp} (1/100km, god)	Promena broja povratnih preskoka ΔN_{pp} (%)
P_1 1425/1050	0,145	0
P_2 1425/1050	0,146	0,6
P_3 1300/950	0,208	43,5
Y_1 1425/1050	0,147	0,15
Y_2 1300/950	0,238	64,2

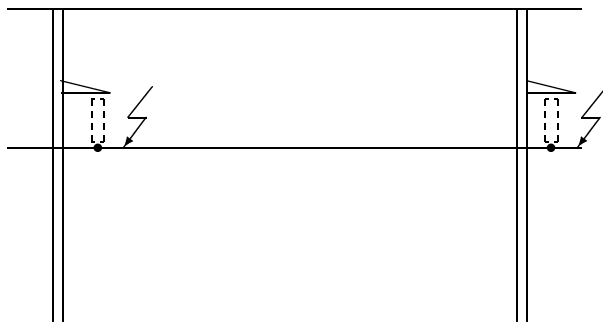
Tabela 8.5: Promena godišnjeg broja povratnih preskoka u zavisnosti od tipa stuba

Proračun broja preskoka na 400 kV dalekovodu usled pražnjenja mimo zaštitnog užeta je urađen primenom elektrometrijske metode. Primenjena je hipoteza o usmeravanju lidera ka objektu pražnjenja pre poslednjeg skoka, kao što je to ranije objašnjeno. Po ovoj hipotezi, od glave skokovitog lidera koji se nalazi u položaju neposredno pred poslednji skok kreću najintenzivniji strimeri u pravcu objekta na kome se očekuje pražnjenje.

Preskočni napon izolacije je dat volt-sekundnom karakteristikom za lanac od 19 članaka, kao na slici 8.21. Radi ilustracije će biti dati rezultati urađeni za portalni stub prikazan na slici 8.27 a) sa modifikovanom visinom do vrha stuba, za zaštitni ugao od 30° . Razmatrana je ukupna visina stuba do vrha od 40 m. Vertikalni razmak između centra faznog provodnika i zaštitnog užeta je $D_1 = 7,2$ m, a horizontalni razmak između centra zaštitnog užeta i faznog provodnika je $B_1 = 4,2$ m. Usvojen je keraunički nivo od 30 grmljavinskih dana godišnje, kome odgovara godišnja gustina pražnjenja od 2,81 pražnjenja po km^2 . Godišnji broj pražnjenja u vod je $n_{1god,100km} = 77$ (1/god, 100km).

Proračuni prelaznog procesa su urađeni za samo dve tačke pražnjenja, koje su prikazane na slici 8.29. Ispitivanjem osetljivosti je ustanovljeno da korona ne igra bitnu ulogu na prigušivanje prelaznog procesa, tako da je dovoljno posmatrati samo dve tačke pražnjenja na celom rasponu. Putujući talas koji nastaje na vodu pri udaru u sredinu raspona pri prostiranju do stuba značajno smanjuje svoju strminu, dok u manjoj meri smanjuje svoju amplitudu. Sa druge strane, karakteristika preskočnog napona izolatorskog lanca je niža za talase dužeg trajanja čela, tako da je ukupan efekat takav da mesto udara groma u fazni provodnik na rasponu utiče vrlo malo na verovatnoću preskoka na stubu, za razliku od povratnog preskoka, gde je mesto udara od dominantnog efekta na verovatnoću preskoka. Verovatnoća da će doći do prodora atmosferskog pražnjenja mimo zaštitnog užeta i da će to atmosfersko pražnjenje izazvati preskok izračunava se primenom izraza 8.21 za rizik kvara, uz ubačenu modifikaciju amplitude atmosferskog pražnjenja mimo zaštitnog užeta, odnosno:

$$P = \int_D \omega(I, S) X(I) dI dS \quad (8.109)$$



Slika 8.29: Tačke pražnjenja na faznom provodniku za koje se vrši proračun

gde su:

D –oblast iznad krive opasnih parametara,

$\omega(I, S)$ – gustina raspodele amplitude i strmine struje groma.

$X(I)$ –verovatnoća prodora groma amplitude struje I mimo zaštitnog užeta.

Kada se izračuna verovatnoća preskoka za samo jednu tačku udara na rasponu, dobija se:

$$P_1 = 1,96 \cdot 10^{-2} \quad (8.110)$$

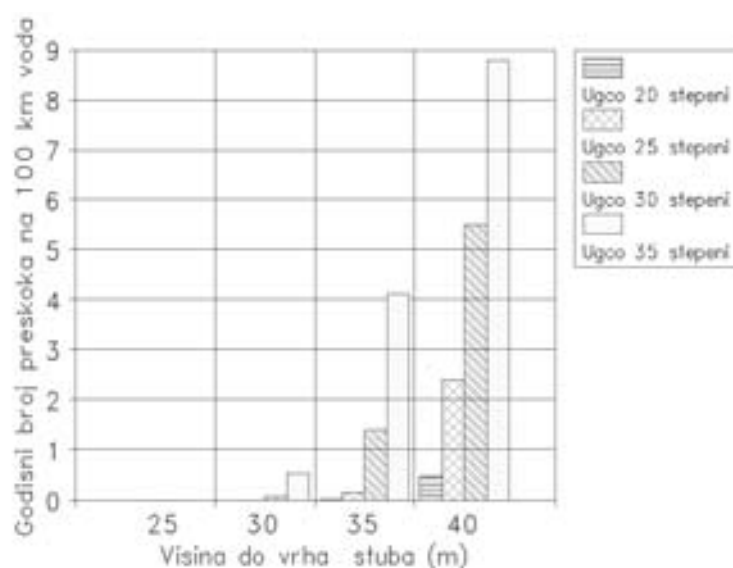
Ukoliko se smatra da je identična geometrija svih stubova duž trase, tada bi pri pražnjenju na bilo kom mestu na trasi verovatnoća preskoka bila identična. U tom slučaju je ukupan broj preskoka usled pražnjenja mimo užeta na 100 km voda u toku jedne godine:

$$N_{1god,100\ km} = n_{1god,100km} \cdot P_1 \quad (8.111)$$

gde je $n_{1god,100km}$ godišnji broj pražnjenja u 100 km voda, a P_1 verovatnoća preskoka usled pražnjenja mimo užeta pri jednom udaru. Kada se izračuna, dobija se:

$$N_{1god,100\ km} = 1,51\ (1/god, 100km) \quad (8.112)$$

Na slici 8.30 prikazan je histogram godišnjeg broja preskoka na 100 km vazdušnog voda nazivnog napona 400 kV u zavisnosti od visine zaštitnog užeta i zaštitnog ugla. Pri variranju zaštitnog ugla je menjan samo vertikalni položaj spoljašnje faze u odnosu na zaštitno uže, dok dužina konzole nije menjana. Može se uočiti izražena zavisnost godišnjeg broja preskoka



Slika 8.30: Uticaj visine stuba i zaštitnog ugla na godišnji broj preskoka usled pražnjenja mimo užeta za vod 400 kV

od visine stuba i od zaštitnog ugla.

U sadašnjoj praksi se kao kriterijum zaštite koristi samo zaštitni ugao, koji treba da iznosi 30°. Analize pokazuju da bi u slučajevima visokih stubova zaštitni ugao trebalo da bude manji da bi se održala ista efikasnost zaštite kao kod nižih stubova.

Radi uporedjenja, izvršena je analiza godišnjeg broja preskoka za identičnu geometriju stubova, a za tri različita naponska nivoa. Cilj analize je da se pokaže veća ugroženost vodova nižih naponskih nivoa. Iako su po pravilu stubovi za niže naponske nivoe nešto manjih poprečnih dimenzija i u proseku manjih visina, ipak ova analiza treba da ukaže da je verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta koje izaziva preskok na izolaciji veća kod vodova nižeg nazivnog napona.

Rezultati proračuna godišnjeg broja preskoka usled pražnjenja mimo zaštitnog užeta za vodove nazivnih napona 110 kV, 220 kV i 400 kV, čiji su odgovarajući podnosivi atmosferski naponi 550 kV, 950 kV i 1425 kV prikazani su u tablici 8.6.

Gornji proračuni su uradjeni za vod sa portalnim stubovima visokim 39 m i zaštitnim uglom od 30°.

Nazivni napon (kV)	110	220	400
$N_{1god,100km}$	2,7	1,05	0,09

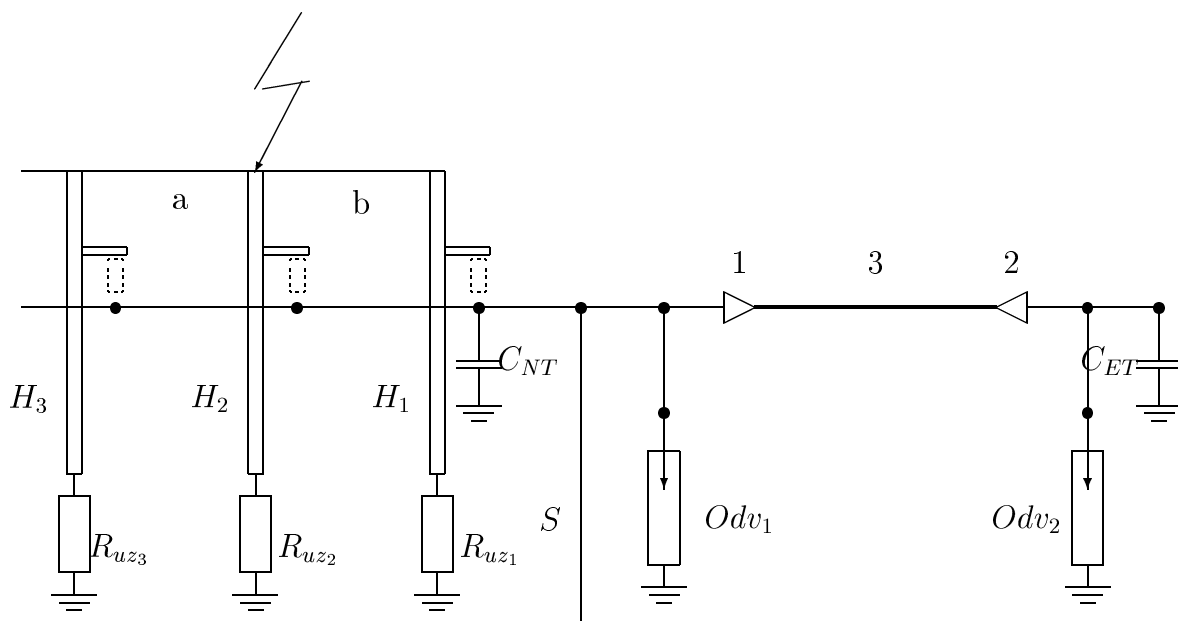
Tabela 8.6: Uticaj nazivnog napona na godišnji broj preskoka usled pražnjenja mimo zaštitnog užeta

8.10 Analiza zaštite transformatora od prenapona

Postupak proračuna srednjeg broja godina bez kvara energetskog transformatora usled atmosferskih prenapona ilustrovan je na primeru postrojenja nazivnog napona 110 kV pri elektrani, sa kablovskim prilazom.

8.10.1 Podaci o sistemu

Na slici 8.31 prikazana je zamenska šema sistema za koji je izvršena analiza atmosferskih prenapona. Transformator se napaja preko kabla, bez direktnog kablovskog uvoznika u



Slika 8.31: Zamenska šema sistema pri proračunu ugroženosti transformatora od atmosferskih prenapona. Tačke 1, 2 i 3 na kابلu označavaju gde se napon računa.

transformator, tako da se može postaviti odvodnik prenapona na kratkoj vezi izmedju transformatora i kablovske završnice. Na drugoj strani se kabl takodje može štititi odvodnikom

prenapona. U analizi prenaponske zaštite izvršeno je upoređivanje prenaponske zaštite kada se postavljaju odvodnici na obe strane kabla ili kada se postavljaju odvodnici samo na jednu stranu kabla.

U zamenskoj šemi pojedini parametri sistema imaju sledeće vrednosti:

- Dužina raspona a je $d_a = 134 \text{ m}$
- Dužina raspona b je $d_b = 56 \text{ m}$
- Visina prvog stuba prema postrojenju $H_1 = 16,6 \text{ m}$
- Visina ostalih stubova $H_2 = H_3 = 30,5 \text{ m}$
- Karakteristična impedansa faznog provodnika $Z_f = 420 \Omega$
- Karakteristična impedansa zaštitnog užeta $Z_z = 625 \Omega$
- Karakteristična impedansa prvog stuba prema postrojenju $Z_s = 76 \Omega$
- Karakteristična impedansa ostalih stubova $Z_s = 150 \Omega$
- Kapacitivnost naponskog mernog transformatora $C_{NT} = 3 \text{ nF}$
- Veza izmedju naponskog mernog transformatora i sabirnica dužine $d_{cs} = 20 \text{ m}$, karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Sabirnice S su dužine $d_s = 15,5 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Veza izmedju sabirnica i priključka odvodnika prenapona dužine $d_{so_1} = 11 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Spust od faznog provodnika do odvodnika prenapona i veza do uzemljivača ukupne dužine $d_{o_1} = 6 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Veza izmedju odvodnika i kablovske završnice bliže vodu $d_{ok_1} = 4 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Kabl dužine $d_k = 260 \text{ m}$, karakteristične impedanse $Z_k = 33,8 \Omega$
- Veza izmedju kablovske završnice kod transformatora i spusta za odvodnik prenapona dužine $d_{ko_2} = 21 \text{ m}$, karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Spust od faznog provodnika do odvodnika prenapona i veza do uzemljivača ukupne dužine $d_{o_2} = 6 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$

- Veza između spusta za odvodnik prenapona i transformatora dužine $d_{o2T} = 4 \text{ m}$ karakteristične impedanse $Z_f = 420 \Omega$
- Ulazna kapacitivnost energetskog transformatora $C_{ET} = 5 \text{ nF}$

Primenjeni odvodnici su tipa HMM 108 proizvodnje MINEL - Beograd nazivnog napona 108 kV sledećih karakteristika:

- Maksimalni dozvoljeni radni napon između priključaka odvodnika 108 kV_{eff}
- Maksimalni napon reagovanja industrijske frekvencije 162 kV_{eff}
- Maksimalni napon reagovanja na sklopne prenapone $259 \text{ k}\hat{V}$
- Maksimalni 100 % udarni napon reagovanja za standardni talas $1, 2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ $U_{100\%} = 248 \text{ k}\hat{V}$
- Maksimalni udarni napon reagovanja na čelu talasa $292 \text{ k}\hat{V}$
- Maksimalni preostali napon za udarnu struju standardnog oblika $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ amplitude 5 kA je $227 \text{ k}\hat{V}$
- Maksimalni preostali napon za udarnu struju standardnog oblika $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ amplitude 10 kA je $248 \text{ k}\hat{V}$
- Maksimalni preostali napon za udarnu struju standardnog oblika $8/20 \mu\text{s}/\mu\text{s}$ amplitude 20 kA je $281 \text{ k}\hat{V}$

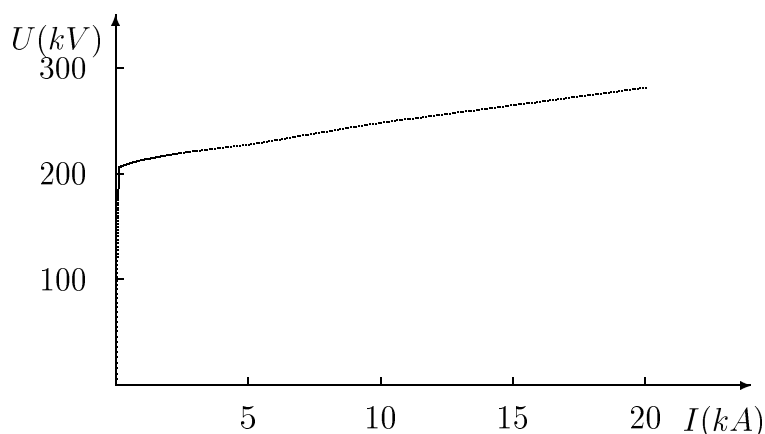
Oznaka $\text{k}\hat{V}$ odnosi se na temenu vrednost izmerenog napona, a kV_{eff} na efektivnu vrednost napona.

Karakteristika preostalog napona je ekstrapolirana za manje i veće vrednosti struja odvodjenja od onih koje su date u kataloškim podacima. Kriva preostalog napona u funkciji struje odvodjenja prikazana je na slici 8.32.

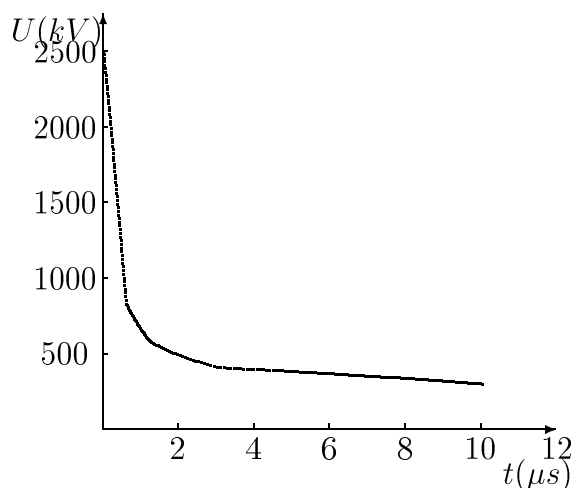
Volt-sekundna karakteristika izolatorskog lanca voda nazivnog napona 110 kV , čiji je podnosivi atmosferski udarni napon 550 kV data je na slici 8.33.

8.10.2 Rezultati klasičnog postupka proračuna

Klasičan proračun je urađen sa strujnim talasom amplitude 121 kA i strmine $43, 2 \text{ kA}/\mu\text{s}$, za koje se smatra da mogu da budu prevaziđeni sa malom verovatnoćom (prema Bergerovoj



Slika 8.32: Kriva preostalog napona odvodnika u funkciji struje odvodjenja



Slika 8.33: Volt-sekundna karakteristika izolacije izolatorskog lanca nazivnog napona 110 kV

raspodeli sa verovatnoćom od samo 2 %). Posmatran je udar groma u stub broj 2 ispred postrojenja. Rezultati proračuna dati su za pojedine karakteristične tačke u tablici 8.7 za slučajeve kada postoji samo odvodnik sa strane voda, kada postoji odvodnik samo sa strane transformatora i kada postoje oba odvodnika.

Može se uočiti da se jedino postavljanjem dva kompleta odvodnika sa obe strane kabla postiže ograničenje napona na vrednosti koje su niže od podnosivih napona kabla i transformatora pri atmosferskom pražnjenju vrlo velikog intenziteta.

Na slici 8.34 prikazana je vremenska promena napona na transformatoru kada je primenjen odvodnik u tački 1 na početku kabla (kriva a), u tački 2 na kraju kabla (kriva b) i na oba kraja kabla (kriva c).

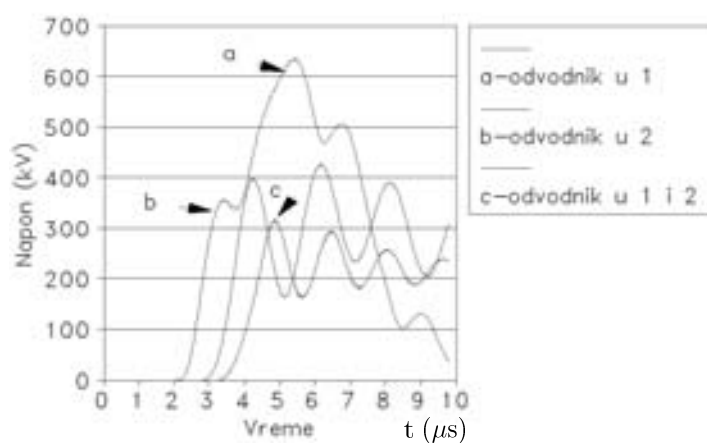
Broj i Lokacija odvodnika	Posmatrana tačka	maksimalni napon (kV)
Dva kompleta odvodnika	Konzola pogodjenog stuba	975
	Tačka 1 na početku kabla	339
	Tačka 3 na sredini kabla	359
	Tačka 2 na kraju kabla	352
	Transformator	404
Odvodnik u tački 1	Konzola pogodjenog stuba	976
	Tačka 1 na početku kabla	425
	Tačka 3 na sredini kabla	557
	Tačka 2 na kraju kabla	528
	Transformator	659
Odvodnik u tački 2	Konzola pogodjenog stuba	976
	Tačka 1 na početku kabla	595
	Tačka 3 na sredini kabla	493
	Tačka 2 na kraju kabla	449
	Transformator	417

Tabela 8.7: Maksimalni napon u pojedinim karakterističnim tačkama

Na slici 8.35 prikazan je profil maksimalnog napona duž kabla (zavisnost maksimalnog prenapona u funkciji rastojanja duž kabla, merena od početka kabla prema vodu). Ova zavisnost je data za slučaj kompleta odvodnika koji je priključen u tački 1 na početku kabla, u tački 2 na kraju kabla i u obe tačke.

8.10.3 Rezultati statističkog postupka proračuna

Prvi korak u statističkom postupku proračuna je određivanje graničnog rastojanja iza koga atmosferska pražnjenja u zaštitno užu, iako izazivaju povratni preskok, nisu opasna za izolaciju postrojenja. U tu svrhu je varirana tačka udara groma, počevši od prvog stuba ispred postrojenja ka daljim stubovima. Za svaku tačku udara groma je izračunata verovatnoća da će da dodje do pojave proboja izolacije energetskog transformatora usled prenaponskog talasa nastalog na vodu usled povratnog preskoka. Verovatnoća proboja izolacije transformatora u funkciji lokacije mesta udara groma prikazana je na slici 8.36. Sa slike se može uočiti da je verovatnoća kvara najveća u slučaju atmosferskog pražnjenja u prvi stub ispred postrojenja, da bi se ova verovatnoća smanjivala pri udarima bliže sredini raspona. Približavanjem mesta udara drugom stubu verovatnoća kvara raste, da bi se na drugom rasponu još više smanjila. Pošto su atmosferska pražnjenja na rastojanjima koja su veća od prva dva raspona bezopasna za postrojenje, usvojeno je granično rastojanje koje je jednako



Slika 8.34: Vremenska promena napona na transformatoru kada je primenjen odvodnik u tački 1 na početku kabla (kriva a), u tački 2 na kraju kabla (kriva b) i na oba kraja kabla (kriva c)

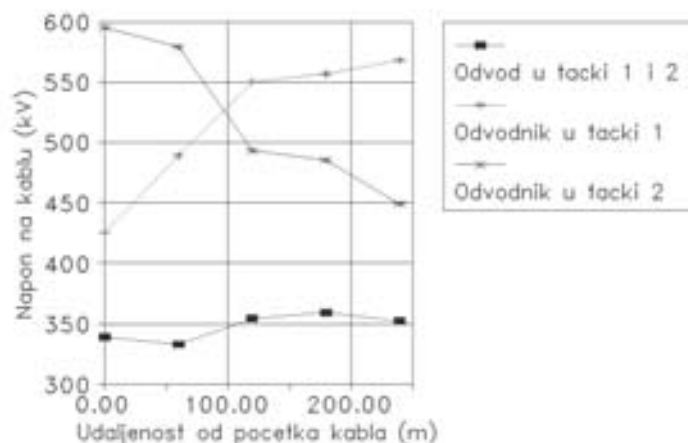
rastojanju do trećeg stuba ispred postrojenja.

Proračun rizika proboja izvršen je za po 5 lokacija atmosferskih pražnjenja ravnomerno raspoređenih duž svakog od prva dva raspona. Rezultati proračuna verovatnoće proboja pri jednom pražnjenju za pojedine lokacije dati su u tablici 8.8. Usvojena je srednja godišnja gustina pražnjenja po km^2 horizontalne ravne površine zemlje $N_g = 2,81 \text{ 1/km}^2, god$, a godišnji broj pražnjenja u 100 km voda je usvojen $n_{1god,100km} = 66 \text{ 1/god, 100km}$. U prvog

Br.	Rastojanje (m)	Verovatnoća proboja	Broj proboja za posmatranu deonicu
1	0	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$
2	14	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-8}$
3	28	$5,40 \cdot 10^{-6}$	$4,39 \cdot 10^{-8}$
4	42	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$4,77 \cdot 10^{-8}$
5	56	$4,79 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^{-7}$
6	89,5	$9,81 \cdot 10^{-6}$	$4,56 \cdot 10^{-8}$
7	123	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^{-8}$
8	156,5	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$2,41 \cdot 10^{-9}$
9	190	$2,19 \cdot 10^{-6}$	—

Tabela 8.8: Rezultati statističkog proračuna verovatnoće proboja izolacije transformatora pri pražnjenjima po pojedinim deonicama i broja kvarova

koloni u tablici 8.8 se nalazi redni broj deonice posmatrane počevši od prvog stuba prema



Slika 8.35: Profil maksimalnog prenapona duž kabla pri atmosferskom pražnjenju u drugi stub

postrojenju. U drugoj koloni se nalazi rastojanje posmatrane tačke udara groma od prvog stuba. U trećoj koloni su unete verovatnoće proboja izolacije transformatora P_i usled atmosferskog pražnjenja u posmatranoj tački. U četvrtoj koloni dat je očekivani godišnji broj proboja usled pražnjenja u posmatranu deonicu sračunat prema izrazu:

$$N_{T_i,1god} = 0,5 \cdot \left\{ P_i \cdot \frac{\Delta d}{1000} \frac{n_{1god,100km}}{100} + P_{i+1} \cdot \frac{\Delta d}{1000} \frac{n_{1god,100km}}{100} \right\} \quad (8.113)$$

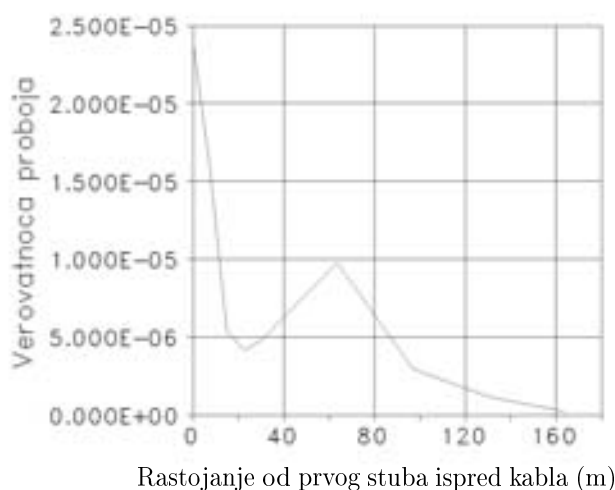
gde su:

Δd – dužina deonice između tačaka i i $i+1$, koja se deli sa 1000 da bi se sve veličine svele na km ,

$N_{T_i,1god}$ – godišnji broj kvarova transformatora usled udara groma u i -tu deonicu voda,

$n_{1god,100km}$ – godišnji broj pražnjenja u 100 km voda. Ova veličina se deli sa 100 da bi se sračunao broj pražnjenja po 1 km vazdušnog voda.

Pri sračunavanju očekivanog godišnjeg broja kvarova se povećava verovatnoća pražnjenja u stub za 30 %. Očekivani godišnji broj proboja izolacije transformatora usled pražnjenja u pojedine deonice voda ispred postrojenja dat je u četvrtoj koloni. Pošto se godišnji broj kvarova računa za udare u deonicu između dve tačke na vodu, pa ovaj rezultat važi za celu



Slika 8.36: Verovatnoća proboja izolacije transformatora u funkciji mesta udara groma

i-tu deonicu. Zato se u četvrtoj koloni pojavljuje jedna vrednost manje od broja posmatranih tačaka u koje se po pretpostavci događaju pražnjenja.

Ukupan očekivani godišnji broj kvarova transformatora se dobija sabiranjem broja kvarova usled pražnjenja u pojedine raspone unutar graničnog rastojanja. Kada se izračuna, dobija se:

$$N_{T,1god} = \sum_{i=1}^9 N_{T_i,1god} = 6,42 \cdot 10^{-7} (1/god) \quad (8.114)$$

Očekivano vreme između kvarova N_{god} ili **MTBF** se dobija kao recipročna vrednost očekivanog godišnjeg broja kvarova, odnosno:

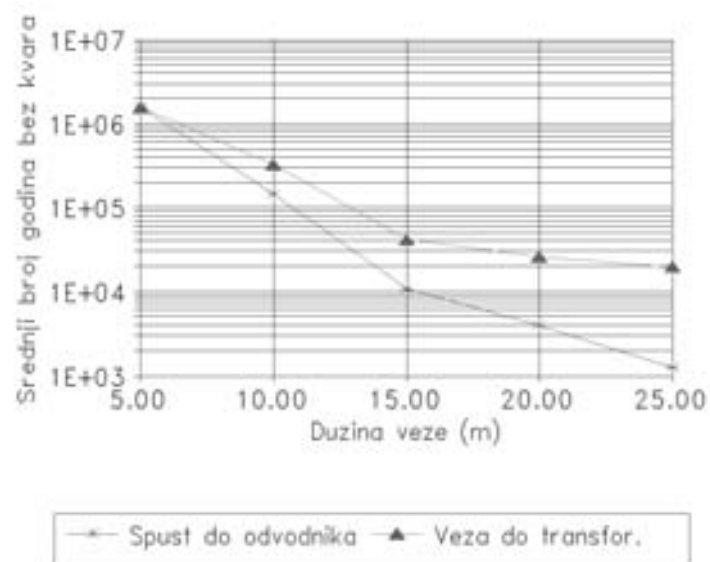
$$N_{god} = \frac{1}{N_{T,1god}} = 1,56 \cdot 10^5 (god) \quad (8.115)$$

8.10.4 Uticaj mesta postavljanja odvodnika prenapona

Izvršena je analiza osetljivosti rizika proboja transformatora od dužine spusta od faznog provodnika do odvodnika, odnosno dužine veze između odvodnika prenapona i transformatora.

Na slici 8.37 prikazani su rezultati analize. Varirano je rastojanje spusta od faznog provodnika do zemlje pri nepromenljivoj dužini veze između odvodnika i transformatora od

5 m, a takodje je varirano rastojanje od spusta do transformatora pri nepromenljivoj dužini spusta od 6 m. Može se uočiti da obe dužine imaju značajan uticaj na srednji broj godina bez kvara (MTBF), stim što spust od faznog provodnika do odvodnika ima veći uticaj.



Slika 8.37: Uticaj dužine spusta do odvodnika i dužine veze do transformatora na srednji broj godina bez kvara