

Poglavlje 8

Rizik kvara usled atmosferskih prenapona

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 atmosferskog 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 rizik kvara izolacije.

U praksi se najčešće određuje rizik kvara izolacije energetskih transformatora u postrojenju ili na stubnim transformatorskim stanicama, usled atmosferskih pražnjenja u prilazne nadzemne vodove, mada se često vrši procena rizika kvara mernih transformatora, kablovskih završnica ili opreme u gasom izolovanim postrojenjima (SF₆ postrojenja). Drugi problem koji se postavlja u praksi je da se proceni godišnji broj preskoka na vodovima.

8.1 Metoda opasnih parametara

8.1.1 Metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje

Metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje skraćeno ćemo zvati **VSS**. Ovom metodom se određuje verovatnoća premašenja amplitude i strmine struje atmosferskih pražnjenja koje izazivaju kvar izolacije analiziranog objekta. Proračun prelaznog procesa

usled atmosferskog udara se vrši linearno rastućim strujnim talasom čija amplituda nije ograničena (odnosno vreme čela struje nije ograničeno), što je dato sledećom relacijom:

$$i(t) = S \cdot t \quad (8.1)$$

gde je S strmina čela struje, a t vreme mereno od trenutka nailaska talasa na posmatranu tačku pražnjenja. Strmina struje S se izražava u kA/ μ s, a vreme u μ s.

Proračun se ponavlja za veći broj strmina čela strujnih talasa atmosferskog pražnjenja ravnomerno raspoređenih od neke minimalne strmine S_{min} do maksimalne strmine S_{max} . Vrednosti za ove granične strmine struja atmosferskog pražnjenja se biraju tako da je verovatnoća pojavljivanja strmine čela manje od S_{min} , odnosno veće od S_{max} manja od 2%.

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 atmosferskog pražnjenja koja izaziva kvar izolacije izračunava se iz posmatrane strmine čela talasa i vremena do kvara t_j , odnosno:

$$I_j = S_j \times t_j \quad (8.2)$$

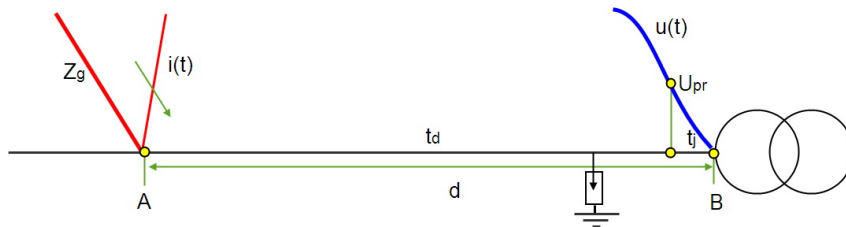
Vreme do kvara izolacije t_j zavisi od tipa pražnjenja u vod. Razlikujemo sledeće slučajeve za koje se primenjuju različiti načini izračunavanja vremena do proboja izolacije analiziranog elementa t_j :

- proračun rizika kvara izolacije opreme u postrojenju usled atmosferskog udara u vod ispred postrojenja, kada vod nije zaštićen zaštitnim užetom,
- proračun rizika kvara izolacije opreme u postrojenju usled atmosferskog udara u vod ispred postrojenja kada je vod zaštićen zaštitnim užetom,
- proračun godišnjeg broja preskoka na izolaciji vodova bez zaštitnog užeta usled atmosferskih pražnjenja,
- proračun godišnjeg broja preskoka na izolaciji vodova sa zaštitnim užetom usled atmosferskih pražnjenja,

8.1.2 Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod bez zaštitnog užeta

Ako se računa rizik kvara izolacije elemenata postrojenja (posebno energetskog transformatora) usled direktnog udara atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, onda je t_j

relativno 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. Absolutno vreme od trenutka atmosferskog udara u vod do proboja izolacije je duže za vreme neophodno za prostiranje talasa od mesta udara A do posmatrane tačke B na udaljenosti d u kojoj se traži rizik proboja izolacije. Ovo vreme je označeno kao t_d . Proces je ilustrovan na slici 8.1.



Slika 8.1: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj analize objekta u postrojenju kada talas dolazi po vodu bez zaštitnog užeta

Naponski talas prouzrokovan linearno rastućom strujom $i(t)$ putuje od od tačke udara A do tačke B, gde je postavljen objekat čiji se rizik kvara izolacije određuje, za vreme t_d . U tački B određuje se napon $u(t)$. U trenutku t_j od nailaska talasa u tačku B, napon $u(t)$ prevazilazi podnosivi napon izolacije U_{pr} . Vreme do proboja izolacije t_j je vreme od nailaska talasa na objekat do postizanja napona na objektu koji izaziva proboj. Ovo vreme je potpuno nezavisno od vremena putovanja od mesta udara A do tačke u kojoj je objekat B. Amplituda struje dovoljna za postizanje probojnog napona izolacije U_{pr} pri delovanju strmine talasa S_j je:

$$I_j = S_j \cdot t_j \quad (8.3)$$

Ukoliko obeležimo oznakom $t_o = 0$ trenutak atmosferskog udara u elemenat nadzemne elektroenergetske mreže (referentno vreme), a vreme putovanja od tačke udara do mesta na kome se posmatra rizik kvara izolacije je t_d , tada se računa vreme proboja izolacije t_j kao

$$t_j = t_{jo} - t_d \quad (8.4)$$

gde je:

t_j -relativno vreme postizanja probojnog napona u odnosu na trenutak nailaska talasa na objekat na kome se izračunava rizik preskoka,

t_{jo} -absolutno vreme postizanja probojnog napona u odnosu na trenutak atmosferskog udara u nadzemnu elektroenergetsku mrežu,

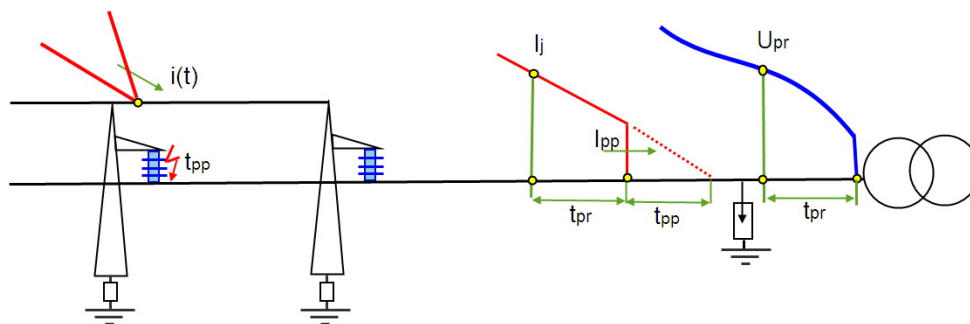
t_d -vreme prostiranja od mesta udara do objekta na kome se izračunava rizik preskoka.

Par vrednosti $(S_j; I_j)$ čine jednu tačku krive opasnih parametara. Za strmine čela struje $S(j)$, $(j = 1, \dots, n)$ se postupak ponavlja i dobijaju se parovi strmina struje i odgovarajuće amplitude struje pri kojima dolazi do kvara izolacije. Proračun prelaznog procesa se prekida za posmatranu strminu struje $S(j)$ 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. Svako pražnjenje sa amplitudom struje iznad te krive izaziva proboj izolacije. Ukoliko amplituda struje u atmosferskog kanalu pražnjenja pređe određenu graničnu vrednost (usvaja se da je to vrednost koja može da bude prevaziđena sa 0.1% verovatnoće), proračun se prekida, a smatra se da je potrebna struja za izazivanje proboda izolacije beskonačno velika $I(j) = \infty$. Posle toga započinje se proračun za sledeću vrednost strmine struje S_{j+1} .

8.1.3 Kriva opasnih parametara za postrojenje usled udara u vod sa zaštitnim užetom

Proračun amplitude struje koja dovodi do proboda izolacije objekta, ako se atmosfersko pražnjenje odvija zaštitno uže voda ispred postrojenja, u ovom slučaju je složenije. Na ovom mestu će biti opisana dva postupka proračuna struje I_j dovoljne da izazove postizanja probojnog napona U_{pr} pri delovanju linearnog talasa strmine S_j .

Pojednostavljeni postupak Ovaj postupak je pogodan za slučaj kada su otpornosti uzemljenja stubova male. U tom slučaju proces proračuna potrebne amplitude struje pražnjenja ilustrovan je na slici 8.2. Ovaj postupak je opisan u [7].



Slika 8.2: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj objekta u postrojenju kada talas dolazi po vodu sa zaštitnim užetom

Oznake na slici 8.2 imaju sledeće značenje:

t_{pp} –vreme potrebno da linearni strujni talas poraste do vrednosti koja izaziva povratni preskok,

I_{pp} –amplituda struje pražnjenja koja izaziva povratni preskok,

U_{pr} –probojni napon izolacije objekta,

t_{pr} –vreme potrebno da linearni strujni talas poraste do vrednosti koja izaziva proboj izolacije na posmatranom objektu,

I_j –amplituda struje pražnjenja koja izaziva proboj na posmatranom objektu pri delovanju strujnog talasa strmine S_j .

Ako se posmatra proces pražnjenja na uzemljene delove voda (zaštitno uže ili vrh stuba) koji izaziva povratni preskok na izolaciji voda, stvara se naponski talas koji se prostire po faznom provodniku do postrojenja, gde može da izazove kvar izolacije. Vreme do proboja izolacije t_j računa iz sledećeg izraza:

$$t_j = t_{pp} + t_{pr} \quad (8.5)$$

Vreme do proboja izolacije 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 8.5. Linearno rastuće čelo talasa strmine S_j treba da ima trajanje najmanje t_j da bi se na posmatranoj izolaciji uspostavio napon dovoljan da izazove proboj izolacije. Posle proboja izolacije proračun se prekida i započinje novi proračun sa strminom strujnog talasa S_{j+1} .

Da bi uopšte moglo da dođe do povratnog preskoka, napon mora da postigne vrednost preskočnog napona izolacije voda, što se postiže posle vremena t_{pp} . Napon na stubu, ukoliko je otpor uzemljenja mali, može i dalje da raste, izazivajući dalji porast napona na faznom provodniku posle povratnog preskoka.

Usled povratnog preskoka dolazi do pojave naglog skoka napona na faznom provodniku. Od tog trenutka potrebno je da prođe još vreme t_{pr} da napon poraste do probojnog napona izolacije. U realnom sistemu talasni oblik na transformatoru je izobličen dejstvom višestrukih refleksija na elementima postrojenja i postojanjem odvodnika prenapona. Amplituda struje dovoljna da izazove preskok izolacije data je izrazom:

$$I_j = S_j \cdot (t_{pr} + t_{pp}) \quad (8.6)$$

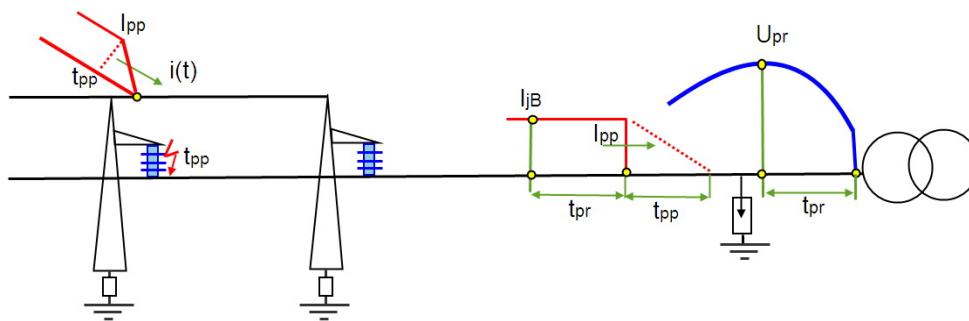
Par vrednosti $(S_j; I_j)$ čine jednu tačku krive opasnih parametara, kao i u predhodnom slučaju.

Tačan postupak Ovaj postupak primene metode opasnih parametara je razvijen u cilju tačnijeg proračuna vremena do proboja izolacije bez obzira na otpornost uzemljenja stubova i vrednost preskočnog napona izolacije stubova. Postupak je opisan u [23]. Za svaku strminu struje atmosferskog pražnjenja S_j proračun prelaznog procesa se odvija u 2 ciklusa. Prvi ciklus obeležen kao postupak *A* identičan je predhodno opisanom **pojednostavljenom postupku**. Struja koja izaziva kvar izolacije u ciklusu *A* je obeležena sa I_{jA} , a vreme potrebno da se postigne ova struja je:

$$I_{jA} = S_j \cdot (t_{jA} + t_{pp}) \quad (8.7)$$

gde je t_{jA} vreme potrebno da napon na razmatranom objektu poraste do probojnog napona U_{pr} .

U drugom ciklusu obeleženom kao *B* proračun se radi na potpuno isti način kao i u slučaju pojednostavljenog postupka, samo struja atmosferskog pražnjenja u kanalu pražnjenja nema neograničeno trajanje čela, nego je vreme čela jednako vremenu potrebnom da struja izazove preskok na izolaciji stuba u trenutku t_{pp} , nakon čega struja ima konstantnu vrednost, kao na slici 8.3. Struja koja izaziva povratni preskok može biti do-



Slika 8.3: Određivanje vremena do kvara izolacije za slučaj objekta u postrojenju kada strujni talas ima konstantnu vrednost nakon nastanka povratnog preskoka

voljna da izazove kvar izolacije na analiziranom objektu, ali se može desiti da ta struja ograničene amplitude ne može da izazove proboj izolacije. Tada usvajamo da je ta struja beskonačno velika.

U slučaju kada je struja dovoljna da izazove proboj izolacije, tada se ona obeležena kao I_{jB} . Amplituda struje koja izaziva proboj u ovom slučaju je:

$$I_{jB} = S_j \cdot t_{pp} \quad (8.8)$$

Struja dovoljna da izaziva kvar izolacije analiziranog objekta jednaka je struji koja izaziva povratni preskok I_{pp} , jer nakon nastanka povratnog preskoka struja više ne raste.

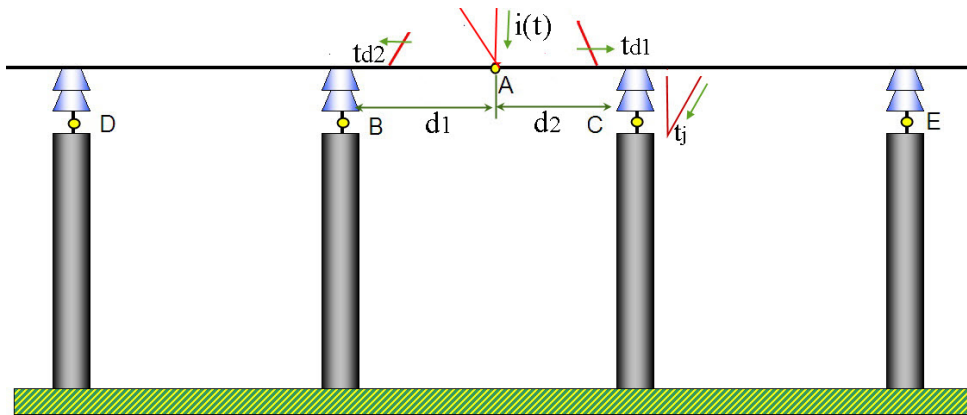
Na kraju se određuje struja koja izaziva proboj na izolaciji objekta kao manja od struja izračunata po postupku *A* i postupku *B*, odnosno.

$$I_j = \min(I_{jA}, I_{jB}) \quad (8.9)$$

Krivu opasnih parametara i u ovom slučaju čini par $(S_j; I_j)$. Svi udari groma čija je amplituda struje I_j za zadatu strminu S_j iznad krive opasnih parametara ugrožavaju izolaciju u posmatranoj tački postrojenja.

8.1.4 Kriva opasnih parametara za vod bez zaštitnog užeta

Kada se određuje godišnji broj preskoka na vodovima bez zaštitnog užeta, tada je objekat na kome se određuje verovatnoća kvara, **izolacija samog voda**. Sam metod detekcije preskoka na izolaciji voda bez zaštitnog užeta je prva pojava napona na tački izolatora koja je sa strane uzemljenja. Na slici 8.4 prikazan je proces pražnjenja u fazu voda bez zaštitnog užeta. Radi jednostavnosti razmatrana je samo jedna faza. Tačke u kojima se detektuje pojava atmosferskog prenapona, što je znak da je došlo do preskoka, su B i C koje su najbliže mestu udara. Struja atmosferskog pražnjenja $i(t)$ je linearno rastuća



Slika 8.4: Određivanje vremena do preskoka na izolaciji voda bez zaštitnog užeta

neograničenog trajanja slično kao kod analize opreme u postrojenju. Od tačke udara A prostiru se po faznim provodnicima dva naponska talasa linearno rastućeg čela čija je vremenska promena:

$$u(t) = \frac{i_G(t)}{4 \cdot Z_f} \quad (8.10)$$

gde je Z_f karakteristična impedansa faznog provodnika, a $i_G(t)$ vremenska promena struje u kanalu groma, koja izaziva upadne komponente struja koja se kreću levo i desno od mesta udara, čije su amplitude $I_{up} = I_G/4$, gde je I_G amplituda struje pražnjenja prema sekciji 7.3.

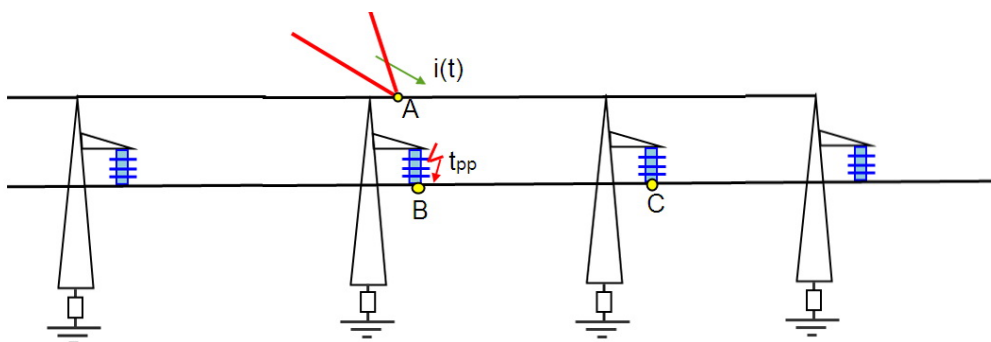
U trenutku t_{d1} stiže talas do desnog stuba. Napon raste linearno do trenutka t_j u odnosu na trenutak atmosferskog udara u vod, kada dolazi do preskoka na izolaciji na stubu C. Naponski talasi stižu do stubova levo ili desno od udara u trenutcima t_{d1} i t_{d2} , a u zavisnosti koji stub je bliži tački udara A, prvo nastaje na tom stubu preskok. Trenutak t_j prvog preskoka pri strmini struje pražnjenja S_j definiše amplitudu struje koja izaziva preskok na izolaciji (u našem slučaju desnog stuba), pod pretpostavkom da je ovaj stub bliži tački udara:

$$I_j = S_j \cdot (t_j - t_{d1}) \quad (8.11)$$

Prilikom proračuna vreme t_j je absolutno vreme mereno u odnosu na trenutak kada se događa atmosferski udar u vod i kada započinje proces proračuna. Na ovaj način formiran je par tačaka $(S_j; I_j)$ krive opasnih parametara. Kada nastane prvi preskok na stubu bližem mestu udara, smatra se da je nastao kvar na vodu i prekida se proračun. Započine se nov proračun sa sledećom strminom čela S_{j+1} .

8.1.5 Kriva opasnih parametara za vod sa zaštitnim užetom

Određivanje godišnjeg broja preskoka na vodovima sa zaštitnim užetom je identično postupku koji se primenjuje kod vodova bez zaštitnog užeta, jedina razlika je u tački u kojoj se detektuje preskok na izolaciji voda. U ovom slučaju prati se prva pojava napona na tački izolatora koja je sa strani faznog provodnika. Na slici 8.5 prikazan je proces pražnjenja u zaštitno uže voda. Radi jednostavnosti razmatrana je samo jedna faza. Tačke u kojima se detektuje pojava atmosferskog prenapona, što je znak da je došlo do preskoka, su B i C koje su najbliže mestu udara.



Slika 8.5: Određivanje vremena do preskoka na izolaciji voda sa zaštitnim užetom

Kada dođe do preskoka sa konzola najbližih stubova prema faznom provodniku, pojavljuje se u tačkama B ili C naponi. Trenutak t_{pp} povratnog preskoka u odnosu

na trenutak nailaska talasa na posmatrani izolator, odnosno $t_j = (t_{pp} - t_d)$ u odnosu na referentni trenutak udara u vod, pri strmini struje pražnjenja S_j , definiše amplitudu struje koja izaziva preskok na izolaciji stuba na kome je preskok prvo nastao:

$$I_j = S_j \cdot (t_{pp} - t_d) \quad (8.12)$$

Par parametara $(S_j; I_j)$ definišu jednu tačku krive opasnih parametara.

8.1.6 Varijacija strmine i amplitude struje

Pored predhodno opisane metode formiranja krive opasnih parametara tako što se varira strmina struje **VSS** i određuje amplituda struje koja izaziva preskok, razvijema je metoda po kojoj se variraju strmina i amplituda struje **VSAS**.

Proračun 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} dovoljno mala, na primer 2%. Talasni oblik struje može da bude trougaoni, sa linearno rastućim strmim čelom i linearno opadajućim začeljem relativno dugog trajanja, mada se mogu primenjivati dvostruko eksponencijalni talasi i talasi drugih oblika, koji se mogu naći, na primer u [13].

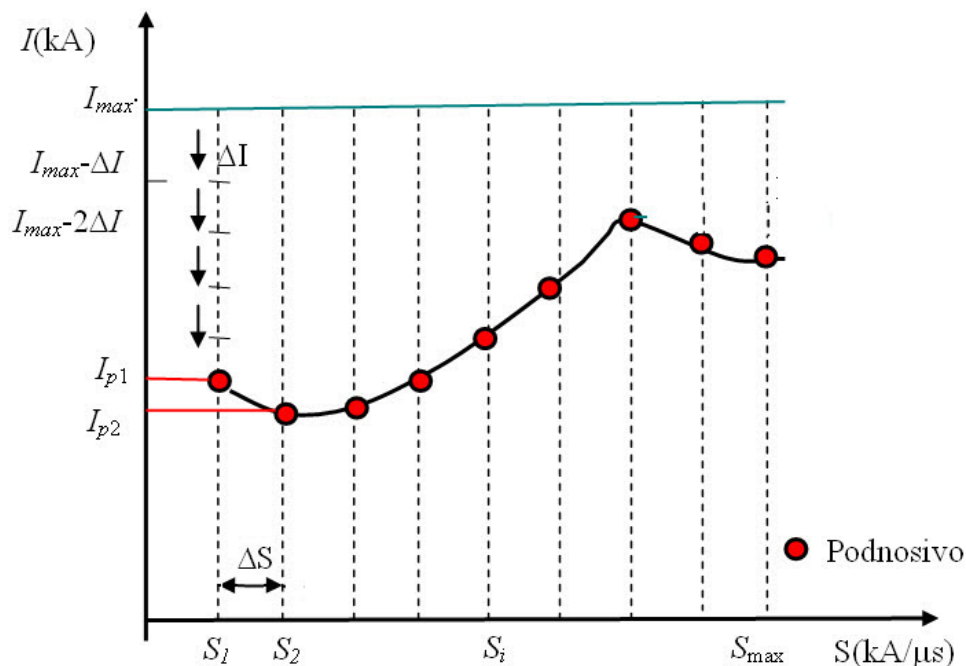
Za svaku strminu S_j se varira amplituda struje pražnjenja, počevši od dovoljno velike amplitude, koja sigurno izaziva kvar izolacije $I_{j,1} = I_{max}$. Za svaku amplitudu i strminu struje se simulira prelazni proces. Ukoliko dolazi do proboja, struja se smanjuje za vrednost ΔI , odnosno:

$$\begin{aligned} I_{j,2} &= I_{j,1} - \Delta I \\ I_{j,3} &= I_{j,2} - \Delta I \\ &= \\ I_{j,m} &= I_{j,m-1} - \Delta I \end{aligned} \quad (8.13)$$

Proračun se ponavlja sve dok se ne dogodi da izolacija posmatranom objektu izdrži atmosferski prenapon pri struji $I_{j,n}$. Tada se usvaja da je predhodna amplituda struje koju izolacija nije izdržala granična struja, odnosno:

$$I_j = I_{j,n} + \Delta I \quad (8.14)$$

Amplituda struje I_j zajedno sa strminom čela S_j čini par opasnih parametara označen kružićem na dijagramu. Zatim se povećava strmina za $S_{j+1} = S_j + \Delta S$ i ponavlja se proračun prelaznog procesa. Prikaz krive opasnih parametara dat je na slici 8.6.



Slika 8.6: Metoda variranja i strmine i amplitude struje atmosferskog pražnjenja

Na ovaj način se formiraju parovi tačaka $(S_j; I_j)$ krive opasnih parametara.

Osnovna razlika između metode opasnih parametara sa variranjem strmine struje i sa variranjem i strmine i amplitude struje je u sledećim karakteristikama:

- Metoda **VSS** je približna jer podrazumeva da naponski talas linearno raste na objektu čiji se rizik kvara istražuje, što realno nije ispunjeno zbog uticaka kapacitivnosti transformatora i višestrukih refleksija. Jedino pri analizi broja ispada vodova je to ispunjeno.
- Metoda **VSAS** primenljiva je za sve slučajeve analiza (analiza ugroženosti vodova i postrojenja se vrše na isti način).
- Metoda **VSS** je značajno brža od metode **VSAS**. Po obe metode broj varijacija strmina je isti, n_s , ali kod **VSAS** taj broj se množi brojem varijacija amplituda struje n_I , koji može biti različit za različite strmine.

Trajanje proračuna metodom **VSAS** se može skratiti sledećim postupkom:

1. Prvi proračun se radi pod sledećim uslovima:

- (a) Početna vrednost struje pražnjenja I_{poc} treba da bude značajno veća od očekivane struja koje izazivaja proboj izolacije.
- (b) Usvajanjem velikog koraka smanjivanja struje ΔI (na primer 10 kA), što omogućava približno određivanje kritične struje koja izaziva kvar.
- (c) Može se koristiti metoda opasnih parametara sa variranjem strmine struje **VSS** da bi se odredila maksimalna struja pražnjenja I_{max} koja izaziva kvar izolacije.

2. Drugi proračun se radi pod sledećim uslovima:

- Početna vrednost struje pražnjenja se izračunava na osnovu predhodno izračunate maksimalne struje uvećane za korak proračuna $I_{poc} = I_{max} + \Delta I$
- Korak smanjivanja struje je značajno manji $\Delta I_a = \Delta I/n$, na primer 1 kA.

8.1.7 Uprošćena metoda prema IEC standardu

Predložena je metoda prema [13] po kojoj se varira samo amplituda struje, a usvaja se funkcionalna veza između amplitude i strmine struje.

$$T_m = a \times I_m^b \quad (8.15)$$

gde su empirijske konstante date izrazom:

$$\begin{aligned} a &= 0.154 \\ b &= 0.624 \end{aligned} \quad (8.16)$$

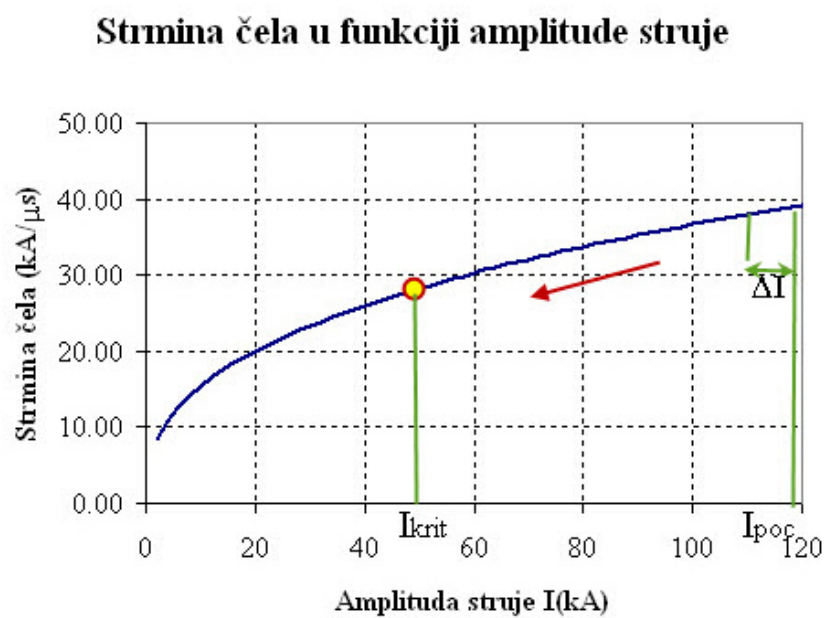
Na osnovu izračunatog vremena trajanja čela, za svaku amplitudu struje atmosferskog pražnjenja I_j određuje se strmina čela struje S_j :

$$S_j = \frac{I^{1-b}}{a} \quad (8.17)$$

Na slici 8.7 prikazana je zavisnost strmine od amplitude, kao i način određivanja kritične amplitude.

Proračun kritičnih parametara se svodi na smanjivanje struje od početne dovoljno velike vrednosti I_{poc} koja sigurno izaziva kvar izolacije, sa korakom ΔI do vrednosti amplitude struje I_{krit} pri kojoj ne dolazi do kvara izolacije. Par (S_{krit}, I_{krit}) čini kritične parametre definisane samo jednom vrednošću struje.

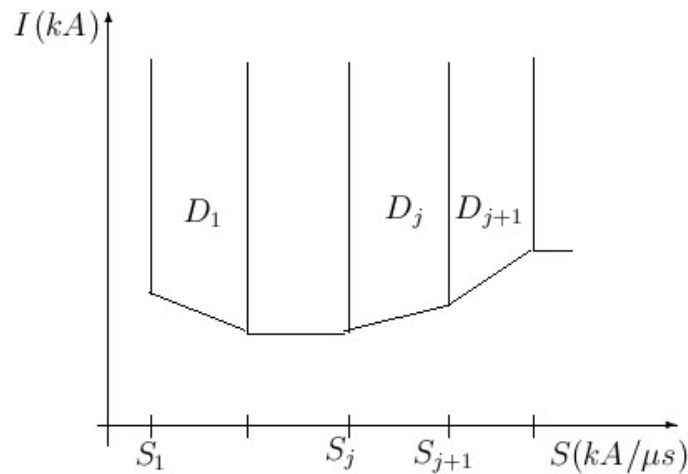
Proračuni se rade sa talasom linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja.



Slika 8.7: Zavisnost strmine od amplitude, kao i način određivanja kritične amplitude

8.2 Proračun verovatnoće pojave kritičnih parametara

Na slici 8.8 prikazan je oblik krive opasnih parametara. Za strmine struja manje od S_1 smatra se da je struja koja izaziva proboj izolacije $I_1 = \infty$.



Slika 8.8: Kriva opasnih parametara atmosferskih pražnjenja

Verovatnoća kvara se određuje integraljenjem funkcije gustine raspodele strmine struje groma u oblasti iznad krive opasnih parametara, odnosno:

$$P = \int_D \omega(I, S) dI dS \quad (8.18)$$

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:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.19)$$

Oznake u izrazu 8.19 imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.20)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.21)$$

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,

σ_{lnI} – standardno odstupanje logaritma struje groma,

σ_{lnS} – standardno odstupanje logaritma strmine čela struje groma,

ρ – koeficijent korelacije između amplitude i strmine struje groma.

Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma date su u tabeli 8.1, prema tabeli 6.2.

Tabela 8.1: Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele parametara struje groma

I_{sr} (kA)	S_{sr} (kA / μ s)	σ_{lnI}	σ_{lnS}	ρ
30	14	0,68	0,55	0,38

Vrednosti iz tablice 8.1 su dobijene analizom rezultata izmerenih na televizijskim tornjevima 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 8.8.

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 rešenje integrala 8.18. Numeričko izračunavanje integrala 8.18 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:

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \int_{x(y)}^{\infty} \omega(x, y) dx dy \quad (8.22)$$

Transformacijom izraza u eksponentu u relaciji 8.19 dobija se sledeći izraz za gustinu raspodele $\omega(x, y)$:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{(x-\rho y)^2}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.23)$$

Može se uvesti nova promenljiva z definisana na sledeći način:

$$z = \frac{x - \rho y}{\sqrt{1 - \rho^2}} \quad (8.24)$$

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

$$\omega(y, z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{y^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.25)$$

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

$$P_{D_i} = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \omega(y) \int_{z(x,y)}^{\infty} \omega(z) dz dy. \quad (8.26)$$

gde su:

$$\omega(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (8.27)$$

$$\omega(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (8.28)$$

Sada se prvi integral u izrazu 8.26 može rešiti trapeznim pravilom, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i,x)}^{\infty} \omega(z) dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1},x)}^{\infty} \omega(z) dz \right\} \quad (8.29)$$

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

$$P_{D_i} = \frac{\Delta y}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} Q\left(\frac{x_i - \rho y_i}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} Q\left(\frac{x_{i+1} - \rho y_{i+1}}{\sqrt{1 - \rho^2}}\right) \right\} \quad (8.30)$$

U izrazu 8.30 funkcija $Q(z)$ ima sledeće značenje:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.31)$$

odnosno:

$$Q(z) = 0,5 - \Phi(z) \quad (8.32)$$

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

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (8.33)$$

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 se može zanemariti zato što je verovatnoća pojava strmina talas od maksimalne strmine S_{max} zanemarljiva.

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

$$P = \sum_{i=1}^n P_{D_i} \quad (8.34)$$

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.

8.3 Elektrogeometrijski model kod atmosferskog udara

Osnovna pretpostavka u elektrogeometrijskom modelu je da je dužina poslednjeg skoka skokovitog lidera srazmerna amplitudi struje pražnjenja. Naime, neposredno pre poslednjeg skoka se javljaju uzlazni strimeri sa objekata na zemlji i silazni strimeri iz glave skokovitog lidera. Njihovim razvojem stvara se povezni lider koji obrazuje kanal glavnog pražnjenja. Ukoliko je električno polje izazvano prisustvom glave skokovitog lidera dovoljno jako, doći će do spajanja silaznih i uzlaznih strimera i obrazovaće se glavno pražnjenje. Ako polje nije dovoljno jako, tada će skokoviti lider imati još jedan skok u slobodan prostor, pre finalnog skoka do objekta na zemlji. Maksimalno rastojanje koje skokoviti lider može da pređe u svom poslednjem skoku naziva se **udarnim rastojanjem** i obeležava sa $R_u(m)$. Očigledno je da dužina udarnog rastojanja zavisi od električnog polja usled prisustva glave skokovitog lidera u blizini objekata na zemlji. Intenzitet električnog polja je srazmeran količini elektriciteta koju nosi kanal skokovitog lidera, a očekivana amplituda struje pražnjenja takođe zavisi od količine naelektrisanja u kanalu skokovitog lidera. U [52] je predložen sledeći izraz koji daje vezu između napona glave skokovitog lidera neposredno pred zadnji skok $V_l(MV)$ i amplitude struje glavnog pražnjenja u idealno uzemljen objekat $I_o(kA)$:

$$V_l = 3,7 \cdot I_o^{2/3} \quad (8.35)$$

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja izolacionih razmaka sklopnim naponima, za koje se smatra da su po obliku slični naponima između glave skokovitog lidera i zemlje pre poslednjeg skoka, došlo se u [52] do izraza:

$$R_u = 1,4 \cdot V_l^{1,2} \quad (8.36)$$

Zamenom se dobija opšti izraz za udarno rastojanje u funkciji amplitude struje glavnog pražnjenja:

$$R_u = k \cdot I_o^n \quad (8.37)$$

gde su k i n empirijske konstante koje prema [52] imaju vrednost $k = 6,72$, a $n = 0,8$. Razni autori su davali različite empirijske vrednosti za konstante k i n . Vrednost konstante k se kreće od 6 do 10, a n od 0,65 do 0,8. U [53] se predlaže izraz za udarno rastojanje koji zavisi od visine voda, što uzima u obzir uticaj intenziteta električnog polja na provodnicima i zaštitnom užetu na proces poslednjeg skoka. Na osnovu većeg broja fotografija atmosferskih pražnjenja i simultanog snimanja struja empirijski se došlo do numeričkih podataka o konstantama koje definišu udarno rastojanje.

Generalni izraz za udarno rastojanje za istaknute objekte (stubove, gromobranske štapove, tornjeve), ima sledeći oblik:

$$R_u = I_o^{0.64} \cdot H^{(0.66+2 \cdot I_o \cdot 10^{-4})} \quad (8.38)$$

gde su:

H —visina objekta,

I_o —očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat.

Izraz 8.38 važi za objekte visine do 500 m i za struje atmosferskih pražnjenja do 200 kA.

Za praktičnu primenu za objekte čija je visina u opsegu 10 m do 60 m prema [53], može se koristiti pojednostavljeni izraz:

$$R_u = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (8.39)$$

Izraz 8.39 se odnosi na istaknute objekte. Fazni provodnici i zaštitna užad predstavljaju horizontalne cilindrične objekte za koje je raspodela električnog polja drugačija nego kod istaknutih objekata. Na osnovu laboratorijskih istraživanja opisanih u [66] se uvodi za horizontalne provodnike smanjenje udarnog rastojanja na 80 % od udarnog rastojanja istaknutih objekata. Posle uvođenja ove korekcije izraz za udarno rastojanje faznih provodnika i zaštitnog užeta ima oblik:

$$R_u = 0,67 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (8.40)$$

Obično se usvajaju identična udarna rastojanja za fazne provodnike i za zaštitnu užad, mada ima autora koji uvode izvesne razlike u udarnim rastojanjima zbog većeg intenziteta električnog polja na zaštitnim užadima zbog njihovog manjeg preseka. Usvajanjem identičnih udarnih rastojanja za fazne provodnike i zaštitnu užad se dobijaju kritičniji rezultati.

Ukoliko je dalekovod okružen drvećem ili drugim objektima na kojima može doći do pojačavanja intenziteta polja, tada ti objekti ekraniraju vod i smanjuje se atraktivna zona voda, dok okolni objekti imaju svoju atraktivnu zonu.

Za primenu elektroteometrijskog modela važno je poznavanje udarnog rastojanja od glave skokovitog lidera do zemlje. Obično se usvajaju nešto manje vrednosti udarnog rastojanja prema ravnoj površini zemlje u odnosu na sistem faznih provodnika ili zaštitnu užad:

$$R_z = k_z \cdot R_u \quad (8.41)$$

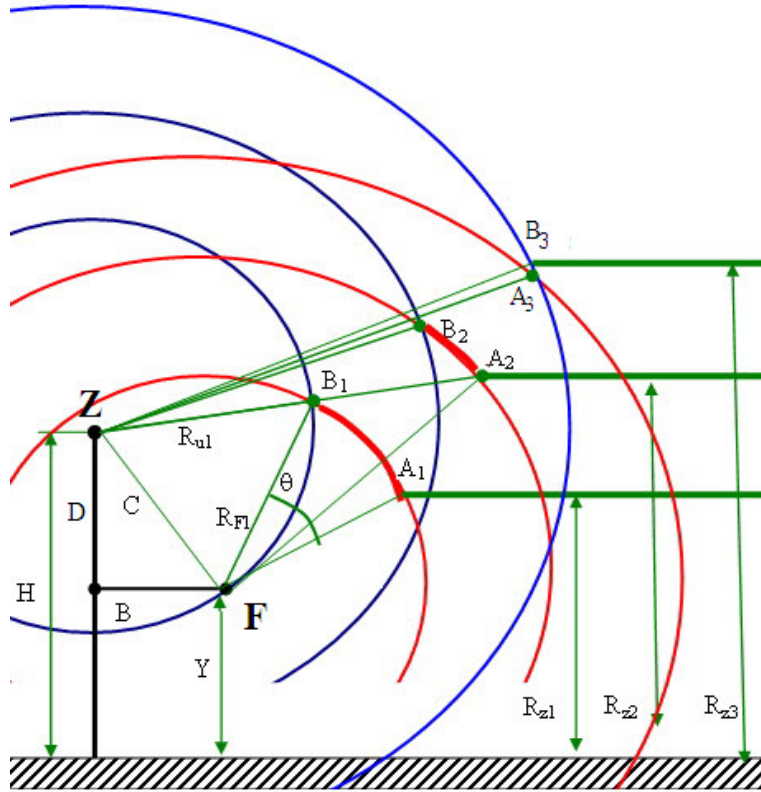
gde su:

R_z —udarno rastojanje prema zemlji u m,

$k_z = 0,64 \div 1$ —korekcija udarnog rastojanja prema zemlji.

Na slici 8.9 prikazana je dispozicija dalekovodnog stuba za koji se određuje zaštitna zona zaštitnog užeta za slučaj voda sa jednim, odnosno za slučaj spoljašnjeg provodnika voda sa dva zaštitna užeta.

Oznake na slici 8.9 imaju sledeće značenje:



Slika 8.9: Geometrija stuba za objašnjenje elektro-geometrijskog modela

H – efektivna visina zaštitnog užeta,

Y – efektivna visina faznog provodnika,

F – fazni provodnik,

Z – zaštitno uže,

R_{u1} – udarno rastojanje do faznog provodnika, odnosno zaštitnog užeta za slučaj amplitude struje pražnjenja I_{o1} ,

R_{z1} – udarno rastojanje do zemlje za slučaj amplitude struje pražnjenja I_{o1} ,

C – rastojanje između zaštitnog užeta i faznog provodnika,

B – horizontalna projekcija rastojanja faznog provodnika od zaštitnog užeta,

D –vertikalna projekcija rastojanja faznog provodnika od zaštitnog užeta.

Tačke A_1, A_2 i A_3 definisane su presekom kruga sa centrom u tački F u centru faznog provodnika i poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za odgovarajuće amplitude

struje I_{o1} , I_{o2} i I_{o3} sa horizontalnom pravom na visini koja je jednaka udarnom rastojanju prema zemlji za odgovarajuću amplitudu struje.

Tačke B_1, B_2 i B_3 definisane su presekom kruga sa centrom u tački F u centru faznog provodnika, poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za odgovarajuće amplitude struje I_{o1} , I_{o2} i I_{o3} sa krugom u centru zaštitnog užeta u tački Z , poluprečnika koji je jednak udarnom rastojanju za iste amplitude struje.

Luk A_1B_1 predstavlja presek cilindrične površine sa koje se očekuje atmosfersko pražnjenje u fazni provodnik pri struji groma I_{o1} . Svako atmosfersko pražnjenje čija je očekivana struja I_{o1} , a čija se glava skokovitog lidera nađe u kružnom isečku FA_1B_1 uvek dovodi do pražnjenja u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta.

Obično se šrafirana površina definisana lukom A_1B_1 naziva izloženom površinom faznog provodnika za amplitudu struje pražnjenja I_{o1} . Za amplitudu struje pražnjenja I_{o2} koja je veća od I_{o1} izložena površina faznog provodnika definisana je kraćim lukom A_2B_2 , a za još veću struju I_{o3} definisana je još manjim lukom A_3B_3 .

Na osnovu slike 8.9 se može zaključiti da sa povećanjem amplitude struje pražnjenja izložena površina označena šrafiranim lukom postaje sve manja i manja. To znači da postoji granična amplituda struje pražnjenja preko koje je izložena površina faznog provodnika jednaka nuli, što znači da je udar u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta pri toj i većim amplitudama struja nemoguć.

Efektivne visine zaštitnog užeta i faznog provodnika koje uvažavaju uticaj ugiba duž raspona se izračunavaju prema tablici 8.3. Oznake u tablici 8.3 imaju sledeće značenje:

Tabela 8.2: Efektivne visine zaštitnog užeta i faznog provodnika u zavisnosti od reljefa terena

Vrsta terena	Efektivna visina zaštitnog užeta	Efektivna visina faznog provodnika
Ravno tlo	$H = H_{max} - 2/3f_u$	$Y = Y_{max} - 2/3f_p$
Valovito tlo	$H = H_{max}$	$Y = Y_{max}$
Brdovito tlo	$H = H_{max} - 2/3f_u + 2/3f_z$	$Y = Y_{max} - 2/3f_p + 2/3f_z$

H_{max} —maksimalna visina zaštitnog užeta na mestu vešanja na stubu,

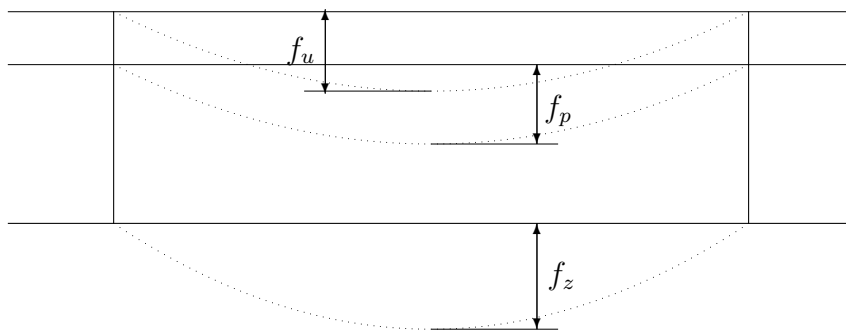
Y_{max} —maksimalna visina faznog provodnika na mestu vešanja na stubu,

f_u —ugib zaštitnog užeta,

f_p —ugib faznog provodnika,

f_z -ekvivalentni ugib zemlje koji uzima u obzir parametre terena.

Na slici 8.10 objašnjen je pojam ekvivalentnog ugiba zemlje. U slučaju ravničarskog



Slika 8.10: Objašnjenje ekvivalentnog ugiba zemlje f_z , ugiba faznog provodnika f_p i ugiba zaštitnog užeta f_u

terena horizontalna površina u odnosu na koji se računa ekvivalentna visina faznog i zaštitnog užeta poklapa se sa stvarnom površinom provodnika. U slučaju valovitog tla ekvivalentni ugib zemlje identičan je sa ugibom provodnika, odnosno zaštitnog užeta, tako da možemo da smatramo kao da fazni provodnik i zaštitno uže uopšte nemaju ugib u odnosu na zemlju, jer se ekvivalentni ugib zemlje, faznog provodnika i zaštitnog užeta međusobno kompenzuju. U slučaju brdovitog terena povećanje visine zbog udolina na zemlji je takvo da se mora uzeti u obzir ekvivalentni ugib zemlje, koji povećava efektivnu visinu provodnika i zaštitnog užeta.

8.4 Kriterijum preskoka na izolaciji voda

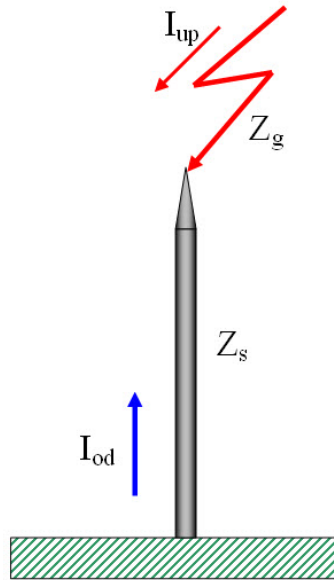
Po pojednostavljenom postupku procene ugroženosti faznog provodnika od pražnjenja mimo zaštitnog užeta, prvo se određuje minimalna struja atmosferskog pražnjenja koja može da izazove preskok na izolaciji na najbližem stubu.

Prilikom direktnog atmosferskog pražnjenja u fazni provodnik, struja koja se prostire po kanalu groma I_g se deli na dva dela koji se prostiru levo i desno od mesta udara. Pri tome amplituda naponskog talasa koji se prostire po faznom provodniku ima vrednost:

$$U = Z_g \frac{I_g}{2} \quad (8.42)$$

Umesto stvarne struje groma I_g po kanalu groma uvodi se pojam **očekivane struje groma u dobro uzemljeni objekat**. Očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat se dobija pri registraciji atmosferskih pražnjenja na uzemljenim stubovima i tornjevima, na kojima se vrši sistematsko praćenje parametara atmosferskih pražnjenja.

Ukupna struja po kanalu groma se može rastaviti na dve komponente struje. Jedna komponenta se kreće u vidu putujućeg talasa od oblaka ka objektu pražnjenja, a druga komponenta, koja se odbija od uzemljivača, kreće se ka oblaku. Ukupna struja se dobija superpozicijom, kao na slici 8.11.



Slika 8.11: Tumačenje određivanja struje groma u dobro uzemljene objekte

Smatra se da je karakteristična impedansa stuba Z_s po svojoj vrednosti bliska karakterističnoj impedansi kanala groma Z_g . U tom slučaju po kanalu groma dolazi upadni talas amplitude I_{up} koji se prostire bez izobličenja po stubu, dolazi do uzemljivača stuba i totalno se odbija, jer je otpor uzemljenja stuba mnogo manji nego karakteristična impedansa stuba (bar 20 puta). Zbog toga je ukupna amplituda struje groma u dobro uzemljeni objekat:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (8.43)$$

odnosno:

$$I_m \approx 2I_{up} \quad (8.44)$$

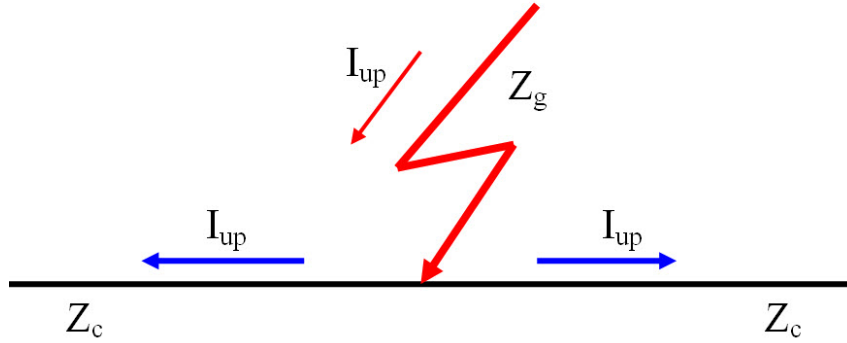
Ako je poznata amplituda struje I_m u dobro uzemljeni objekat, tada se može odrediti vrednost upadne komponente struje po kanalu groma:

$$I_{up} \approx \frac{I_m}{2} \quad (8.45)$$

Vidi se da je upadna komponenta struje približno jednaka polovini ukupne struje groma u dobro uzemljeni objekat.

Ako je do pražnjenja došlo u fazni provodnik, tada se može smatrati da je karakteristična impedansa kanala groma približno jednaka polovini karakteristične impedanse

faznog provodnika. Od mesta udara groma protežu se fazni provodnici na obe strane, pa strujni talas nailazi na ekvivalentan fazni provodnik čija je karakteristična impedansa jednaka polovini karakteristične impedanse faznog provodnika. Zbog približno iste karakteristične impedanse kanala groma i ekvivalentnog faznog provodnika, od tačke udara groma ne dolazi do refleksije strujnog talasa jer je koeficijent odbijanja jednak nuli. Struja groma se deli na dve grane, prema slici 8.12.



Slika 8.12: Tumačenje određivanja amplitude strujnog talasa kod udara u fazni provodnik

Po faznim provodnicima se prostire strujni talas čija je amplituda:

$$I_f = \frac{I_{up}}{2} = \frac{I_m}{4} \quad (8.46)$$

Vidi se da se po faznim provodnicima prostire talas čija je amplituda jednaka četvrtini amplitude struje u dobro uzemljeni objekat. Prenaponski talas koji nastaje na faznim provodnicima ima amplitudu:

$$U_f = Z_c I_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (8.47)$$

Pri prostiranju ovoga talasa duž voda dolazi do njegovog prigušenja i izobličenja usled gubitaka na vodu i na povratnom putu kroz zemlju i usled korone. Ovaj talas može da izazove preskok prema konzoli stuba ukoliko vrednost prenapona premaši vrednost preskočnog napona izolacije na stubu. Minimalna (granična) struja groma koja izaziva prenapon koji premašuje udarni podnosivi napon izolacije U_{iz} je:

$$I_{gran} \geq \frac{4U_{pod}}{Z_c} \quad (8.48)$$

Ova vrednost napona treba da bude veća ili jednaka (granična vrednost) od podnosivog napona izolacije, odnosno $U_f > U_{pod}$ da bi došlo do preskoka. Odatle se može odrediti granična struja groma I_{gran} koja izaziva napon jednak podnosivom naponu izolacije.

$$I_{gran} = \frac{4 \cdot U_{pod}}{Z_c} \quad (8.49)$$

Za izračunatu graničnu struju pražnjenja se određuje granično udarno rastojanje:

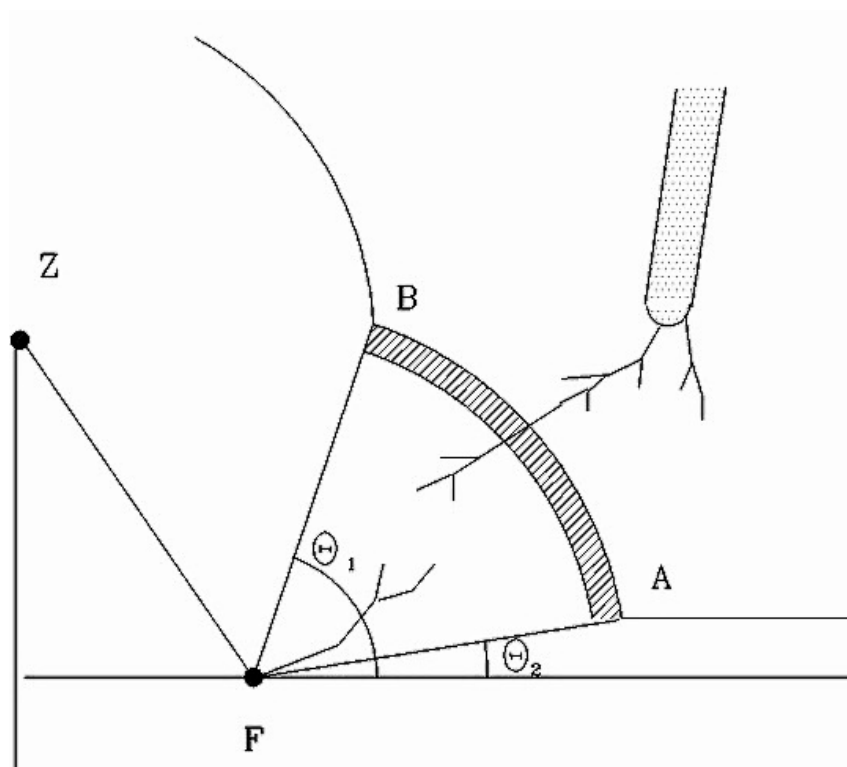
$$R_{gran} = kI_{gran}^n \quad (8.50)$$

Kada se nacrtaju izložene površine faznog provodnika i zaštitnog užeta sa poluprečnikom R_{gran} , kao i horizontalna površina na visini koja je jednaka graničnom udarnom rastojanju prema zemlji, može se videti ugroženost faznog provodnika od pražnjenja mimo užeta na osnovu dužine luka AB koji definiše izloženu površinu faznog provodnika za graničnu struju koja izaziva peskok.

8.4.1 Verovatnoća prodora groma mimo užeta

Bitno pojednostavljenje proračuna uz nešto kritičnije rezultate se dobija uvođenjem pretpostavke da do usmeravanja lidera dolazi neposredno pred poslednji skok.

Na slici 8.13 prikazan je skokoviti lider koji se zaustavio ispred izložene površine faznog provodnika, na rastojanju koje je veće od udarnog rastojanja. Sa vrha skokovitog lidera kreću strimeri. Oni su najintenzivniji upravo u pravcu izložene površine faznog provodnika, tako da sa najvećom verovatnoćom dolazi do razvoja pražnjenja upravo u tom pravcu.



Slika 8.13: Hipoteza o usmeravanju lidera pred izloženom površinom

U ovom slučaju upadni ugao lidera poklapa se sa uglom potega od centra faznog provodnika do tačke na izloženoj površini kroz koju prodire lider.

U ovom slučaju broj pražnjenja u izloženu površinu se dobija na osnovu sledećeg izraza:

$$N = N_G R \int_{\Theta_2}^{\Theta_1} d\Theta = N_G R (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (8.51)$$

U ovom slučaju broj pražnjenja je srazmeran samo veličini luka $\widehat{AB}$ koji definiše izloženu površinu faznog provodnika, dok je uticaj upadnih uglova potpuno zanemaren, a

gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje se izjednačava sa gustinom pražnjenja u pravcu normale na izloženu površinu. R predstavlja udarno rastojanje za određenu struju pražnjenja, a N_G je godišnja gustina pražnjenja po km^2 .

Ovakav pojednostavljeni pristup daje nešto veći broj pražnjenja od tačnijeg modela koji uvažava upadne uglove lidera.

Pod verovatnoćom prodora groma mimo zaštitnog užeta se podrazumeva odnos broja pražnjenja u fazni provodnik u prisustvu zaštitnog užeta i broja pražnjenja bez zaštitnog užeta.

$$P = \frac{N_u}{N_{bu}} \quad (8.52)$$

gde su:

N_u —broj pražnjenja u fazni provodnik zaštićen užetom,

N_{bu} —broj pražnjenja u fazni provodnik bez zaštitnog užeta.

Na slici 8.14 prikazan je bočni presek izložene površine faznog provodnika, zaštitnog užeta i površine zemlje. Pri tome je razmatran opšti slučaj kod koga postoji određeni nagib površine zemlje θ_z u odnosu na horizontalu. U tački A se nalazi presek izložene površine faznog provodnika i zaštitnog užeta, a u tački B presek izložene površine faznog provodnika i zemlje. Ugao θ_1 definiše ugao potega od centra faznog provodnika do gornje granice izložene površine faznog provodnika u tački B . Ugao θ_2 definiše ugao potega od centra faznog provodnika do donje granice izložene površine faznog provodnika u tački A .

Uglovi θ_1 i θ_2 određuju veličinu izložene površine faznog provodnika. Ovi uglovi se mogu odrediti iz geometrijskih odnosa:

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (8.53)$$

gde su:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c}{2R_u}\right) \quad (8.54)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left[\frac{Y \cos(\theta_z) - R_z}{R_u}\right] + \theta_z \quad (8.55)$$

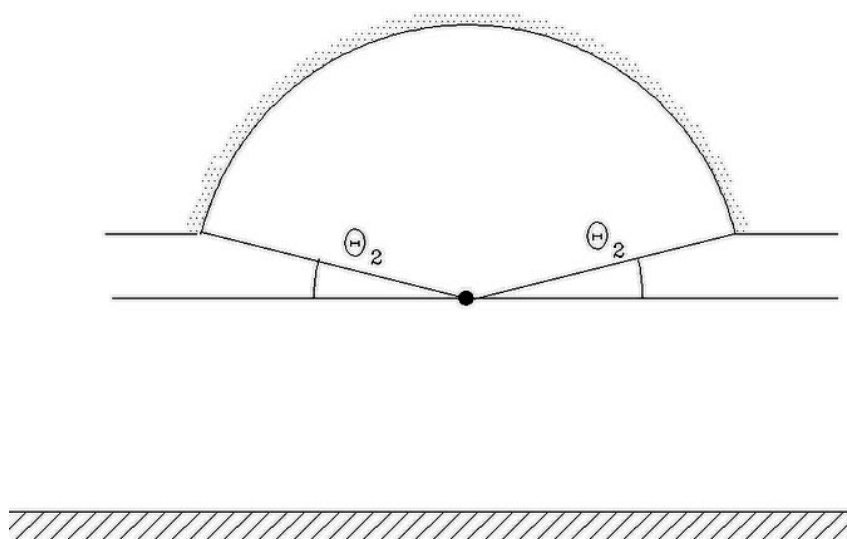
α —zaštitni ugao.

Može se uočiti da uglovi θ_1 i θ_2 zavise od geometrije stuba, ali zavise i od udarnog rastojanja prema fazi ili zaštnom užetu R_u i prema zemlji R_z . Za svaku amplitudu struje pražnjenja I_o postoje različiti uglovi θ_1 i θ_2 . Izložena površina je srazmerna kružnom luku čija je dužina:

$$\widehat{AB} = (\theta_1 + \theta_2) \cdot R_u \text{ za } \theta_2 < 0 \quad (8.56)$$

Na slici 8.15 prikazana je izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta.

Atraktivna površina faznog provodnika



Slika 8.15: Izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta

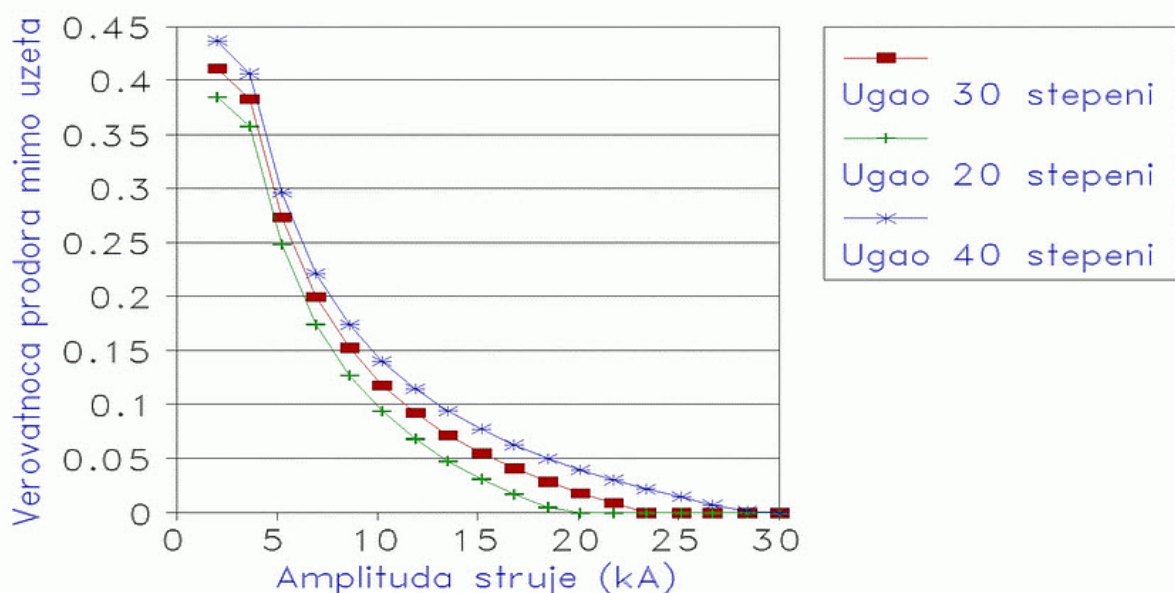
U posmatranom modelu su uzete sledeće aproksimacije:

- Pri definisanju izložene površine faznog provodnika nije uziman u obzir uticaj susednih faznih provodnika, koji jednim delom ekraniraju posmatrani provodnik,
- Usvojeno je da se skokoviti lider uvek približava normalno na izloženu površinu, mada se on može približavati pod različitim uglovima. Na ovaj način se dobija nešto veća verovatnoća prodora mimo zaštitnog užeta nego kada se uzima slučajni ugao približavanja skokovitog lidera.
- Teorijski je moguće da udarno rastojanje ispunjava uslov $R_u \leq c/2$, gde je c rastojanje između faznog provodnika i zaštitnog užeta. U ovom slučaju fazni provodnik nije zaštićen. U praksi se ovakav slučaj ne može pojaviti jer su udarna rastojanja uvek znatno veća.

Ukoliko je ispunjen uslov da je stepen izloženosti faznog provodnika $x \leq 0$, to znači da je dalekovod apsolutno zaštićen. U tom slučaju se proglašava da je $x = 0$. Koeficijent izloženosti zavisi od amplitude struje groma i smanjuje se sa povećanjem amplitude. Smatra se da je fazni provodnik potpuno izložen kada je $x = 1$.

Za ilustraciju elektrogeometrijske metode izvršena je analiza uticaja promene zaštitnog ugla i visine stuba na verovatnoću prodora pražnjenja različitih amplituda struja. Amplitude struje pražnjenja su varirane od 2 kA do 30 kA i određivana je verovatnoća prodora groma za svaku od tih struja.

Na slici 8.16 prikazana je zavisnost verovatnoće prodora groma mimo zaštitnog užeta u funkciji amplitude struje. Efektivna visina zaštitnog užeta je $H=40$ m, a efektivna visina faznog provodnika je $Y=34$ m. Zaštitni ugao je variran po sledećim koracima: $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$.



Slika 8.16: Verovatnoća prodora groma za zaštitne uglove od $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$

Za određivanje rizika kvara izolacije usled atmosferskih pražnjenja mimo zaštitnog užeta primenjuje se sledeći izraz:

$$R = \int_D \omega(I, I') x(I) dI \quad (8.60)$$

gde su:

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

$x(I)$ - koeficijent izloženosti pri amplitudi struje groma I ,

D – oblast opasnih parametara (amplitude i strmine struje groma).

Na ovaj način koeficijent izloženosti utiče na smanjenje verovatnoće pražnjenja mimo zaštitnog užeta, a samim tim i na smanjenje rizika kvara izolacije usled pražnjenja mimo užeta.

8.4.2 Procena verovatnoće pražnjenja mimo zaštitnog užeta

Pri modelovanju prodora groma mimo zaštitnog užeta način modelovanja upadnog ugla lidera u zadnjem skoku prema faznom provodniku može da ima izvesnog uticaja na rezultate.

a) Skokoviti lider prilazi faznom provodniku pod slučajnim uglom

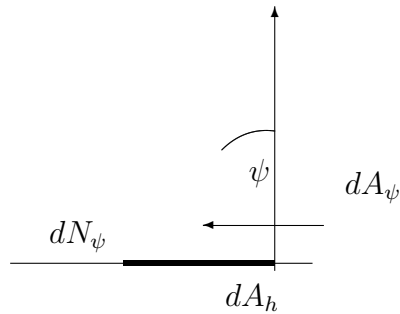
Model sa slučajnim upadnim uglom skokovitog lidera predstavlja najsloženiji model, na osnovu kojeg se mogu izvesti jednostavniji. Neka je upadni ugao lidera prema vertikali obeležen uglom ψ . Ako je poznata godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje N_G , tada je broj pražnjenja dN_ψ u elementarnu površinu dA_ψ koja je pod uglom ψ nagnuta u odnosu na horizontalnu ravan zemlje, prema slici 8.17:

$$dN_\psi = \frac{N_G dA_\psi}{\cos \psi} \quad (8.61)$$

gde su:

$dA_\psi = dA_h \cos \psi$ —elementarna nagnuta površina,

dA_h —horizontalna površina zemlje u koju bi bio isti broj pražnjenja pod upadnim uglom ψ kao u nagnutu elementarnu površinu dA_ψ .



Slika 8.17: Skica elementarne površine u koju se odvija pražnjenje

Upadni ugao lidera na izloženu površinu objekta je slučajna veličina koja može biti opisana nekom gustinom raspodele $g(\psi)$. U [52, 53] se preporučuje zakon raspodele u obliku trigonometrijske funkcije sledećeg oblika:

$$g(\psi) = K_m \cos^m(\psi) \quad (8.62)$$

gde je m empirijski eksponent, a K_m se određuje tako da bude ispunjen uslov:

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} K_m \cos^m(\psi) d\psi = 1 \quad (8.63)$$

jer se smatra da upadni ugao lidera mora biti u opsegu:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (8.64)$$

Na taj način se dobija konstanta K_m :

$$K_m = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^m(\psi) d\psi} \quad (8.65)$$

Verovatnoća da će upadni ugao lidera biti u opsegu $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$ data je izrazom:

$$P_{\psi_1}^{\psi_2} = \int_{\psi_1}^{\psi_2} K_m \cos^m(\psi) d\psi \quad (8.66)$$

Autori u [52, 53] predlažu da koeficijent m bude između 1 i 2. Do ovog zaključka se došlo na osnovu studije u kojoj je praćen broj pražnjenja mimo užeta.

U tablici 8.3 date su celobrojne vrednosti za koeficijent m i odgovarajuće konstante K_m koje su od praktičnog interesa.

U tablici 8.3 oznaka $\delta(\psi)$ ima sledeće značenje:

$$\delta(\psi) = \begin{cases} \infty & \text{ako je } \psi = 0 \\ 0 & \text{ako je } \psi \neq 0 \end{cases} \quad (8.67)$$

Pojedini slučajevi u tablici imaju sledeće značenje:

1. Ravnomerna raspodela upadnih uglova,
2. Kosinusna raspodela upadnih uglova,
3. Kvadratna kosinusna raspodela upadnih uglova,
4. Vertikalni udari $\psi = 0$.

Na slici 8.18 prikazana je izložena površina jednog faznog provodnika definisana uglovima Θ_1 i Θ_2 prema horizontali i udarnim rastojanjem R .

Na slici 8.19 prikazana je uvećana elementarna izložena površina dA_Θ definisana uglom $d\Theta$.

Oznake na slikama 8.18 i 8.19 imaju sledeće značenje:

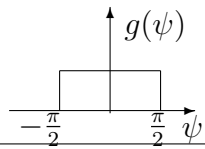
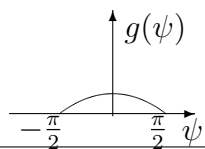
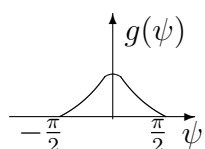
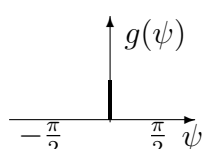
1	$m = 0$	$K_m = \frac{1}{\pi}$	$g(\psi) = \frac{1}{\pi}$	
2	$m = 1$	$K_m = \frac{1}{2}$	$g(\psi) = \frac{1}{2} \cos \psi$	
3	$m = 2$	$K_m = \frac{2}{\pi}$	$g(\psi) = \frac{1}{\pi} \cos^2 \psi$	
4	$m = \infty$	$K_m \rightarrow \infty$	$g(\psi) = \delta(\psi)$	

Tabela 8.3: Vrednosti parametara raspodele upadnih uglova lidera

Θ_1 i Θ_2 —Uglovi koji definišu izloženu površinu,

Θ —proizvoljan ugao ($\Theta_2 \leq \Theta \leq \Theta_1$) za koji se definiše elementarna izložena površina,

R —udarno rastojanje,

ψ —upadni ugao lidera u odnosu na vertikalu.

Elementarna podužna izložena površina faznog provodnika definisana je centralnim uglom $d\Theta$:

$$dA_\Theta = R d\Theta \quad (8.68)$$

Elementarna podužna izložena površina koja je normalna na pravac nailaska skokovitog lidera obeležena je sa dA_ψ :

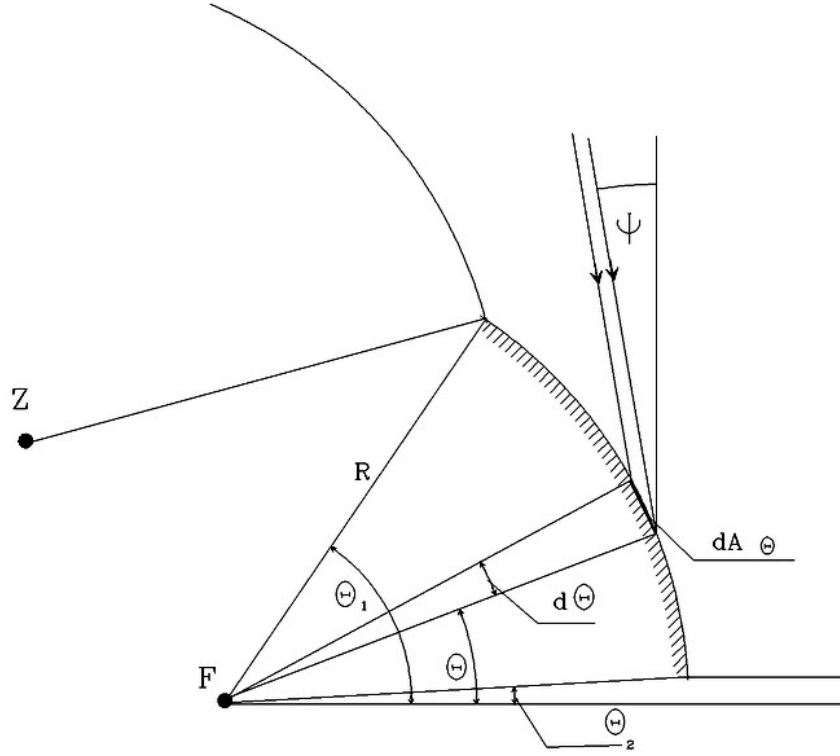
$$dA_\psi = dA_\Theta \sin(\Theta - \psi) \quad (8.69)$$

Godišnji broj pražnjenja u elementarnu površinu dA_ψ u funkciji godišnje gustine pražnjenja N_G je:

$$dN_\psi = N_G \frac{dA_\psi}{\cos \psi} \quad (8.70)$$

Posle zamene 8.69 i 8.68 u 8.70 se dobija:

$$dN_\psi = N_G \frac{R \sin(\Theta - \psi) d\Theta}{\cos \psi} \quad (8.71)$$



Slika 8.18: Uvažavanje upadnog ugla lidera u poslednjem skoku

Znajući da je verovatnoća pražnjenja groma u elementarnom opsegu uglova $d\psi$ prema vertikali data izrazom:

$$P(\psi) = g(\psi) d\psi \quad (8.72)$$

dobija se ukupan broj pražnjenja za sve upadne uglove iz opsega $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$:

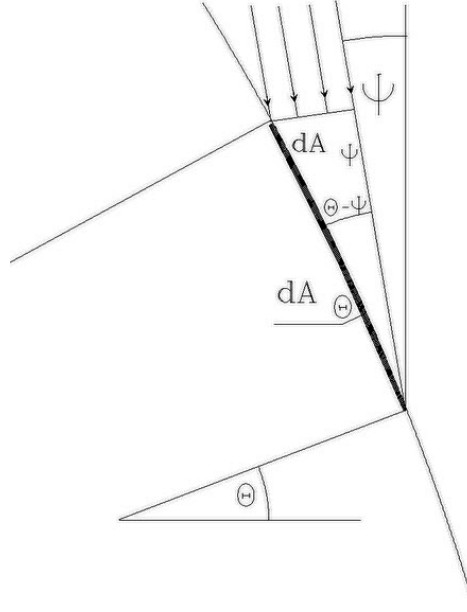
$$dN = N_G \left\{ \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi \right\} R d\Theta \quad (8.73)$$

Ukupan broj pražnjenja za celu izloženu površinu se dobija integraljenjem od graničnih uglova Θ_2 do Θ_1 , odnosno:

$$N = N_G R \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi d\Theta \quad (8.74)$$

Granični upadni uglovi lidera u poslednjem skoku ψ_1 i ψ_2 zavise od centralnog ugla Θ . Ukoliko bi fazni provodnik bio usamljen u prostoru, ovi uglovi bi imali vrednosti $\psi_1 = \pi/2$ i $\psi_2 = -\pi/2$. To znači da ne postoje silazni skokoviti lideri koji bi se u zadnjem skoku usmeravali naviše. Granični upadni ugao ψ_2 ima uvek vrednost $-\pi/2$, dok je granični upadni ugao ψ_1 potrebno odredjivati u funkciji ugla Θ kada postoji zaštitno uže. Pri tome se mogu razlikovati dva slučaja:

- Slučaj kada je centralni ugao $\Theta > \alpha$, gde je α zaštitni ugao dalekovoda,



Slika 8.19: Uvećan detalj elementarne izložene površine

- Slučaj kada je ugao $\Theta < \alpha$.

Na slici 8.20 prikazana su ova dva slučaja upadnih uglova, kao i granični slučaj kada je posmatrani centralni ugao Θ jednak zaštitnom uglu α .

Kada je $\Theta < \alpha$, lider se približava tački A_1 pod uglom $\psi = \Theta$. Ako bi se lider približavao pod većim uglom, on bi već ranije prošao kroz izloženu površinu faznog provodnika. Drugi granični ugao je uvek $\psi_2 = -\pi/2$ zbog pretpostavke da silazni lider ne može u poslednjem skoku da se kreće naviše.

Ako se lider približava pod takvim uglom da je $\theta > \alpha$, tada se određuje granični ugao ψ_2 na osnovu slike 8.21.

Sa slike se može videti da postoji sledeći odnos uglova:

$$\psi_1 + \beta_1 + \beta_2 - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (8.75)$$

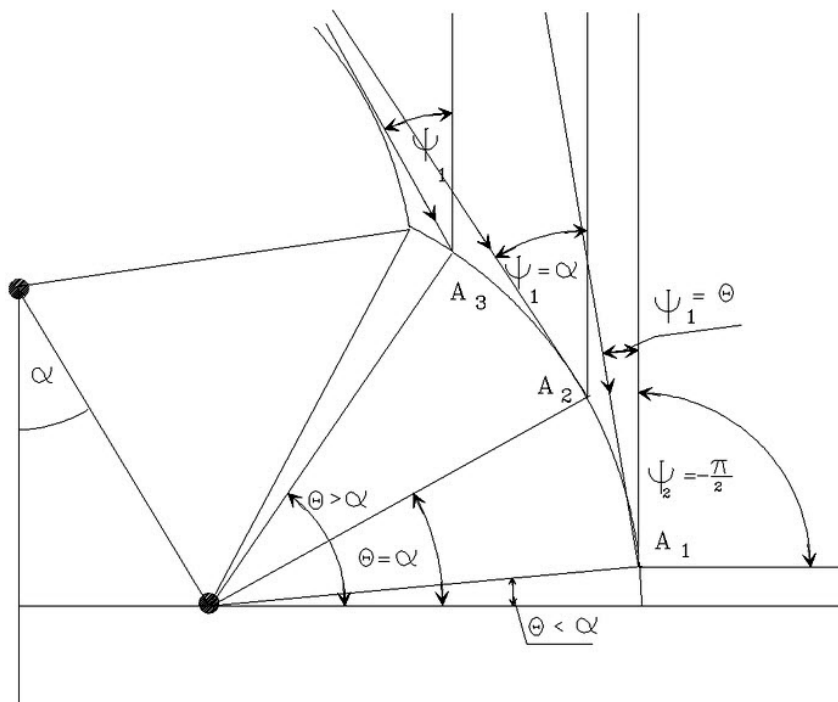
odakle se dobija:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_1 - \beta_2 \quad (8.76)$$

gde su:

$$\beta_1 = \arctan \frac{X_3}{X_2} \quad (8.77)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{R}{\sqrt{X_1^2 - R^2}} \quad (8.78)$$



Slika 8.20: Dva različita upadna ugla lidera i graničan slučaj

Duž X_1 se određuje na osnovu kosinusnog pravila za trougao ZFA :

$$X_1 = \sqrt{C^2 + R^2 - 2 R C \cos \gamma} \quad (8.79)$$

gde se ugao γ određuje iz relacije:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \Theta + \alpha \quad (8.80)$$

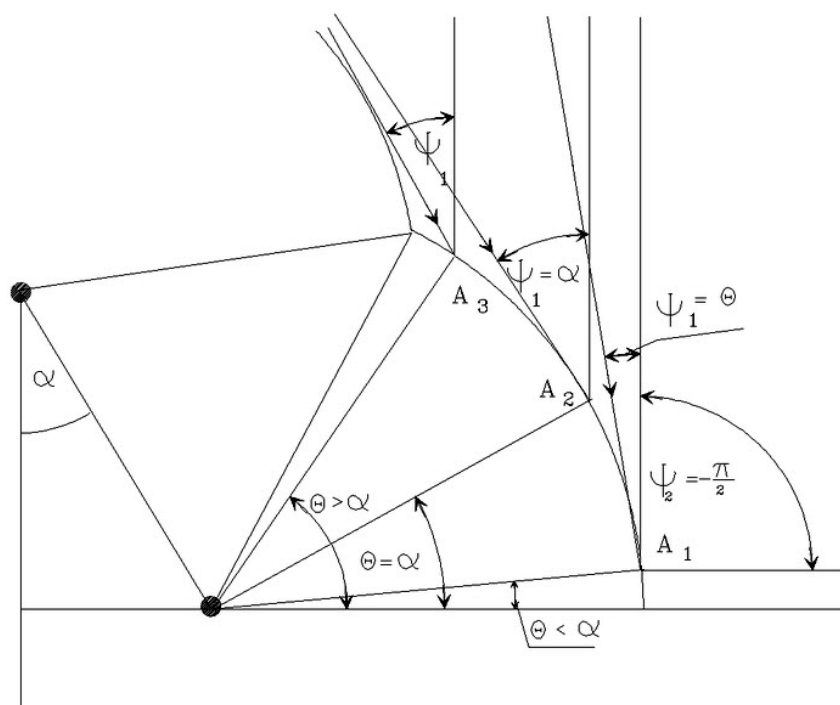
Duž X_2 se određuje na sledeći način:

$$X_2 = R \cos \gamma \quad (8.81)$$

Duž X_3 se određuje na sledeći način:

$$X_3 = C - R \cos \gamma \quad (8.82)$$

Za sve upadne uglove lidera $\psi > \psi_1$ lider prvo preseca zonu izloženosti zaštitnog užeta, tako se pražnjenje odvija u zaštitno uže. Zato su jedino pražnjenja sa upadnim uglovima lidera $\psi \leq \psi_1$ opasna za fazni provodnik jer se glava lidera pred poslednji skok nalazi u prostoru ispod izložene površine faznog provodnika.

Slika 8.21: Određivanje graničnog ugla π_2 kada je $\Theta > \alpha$

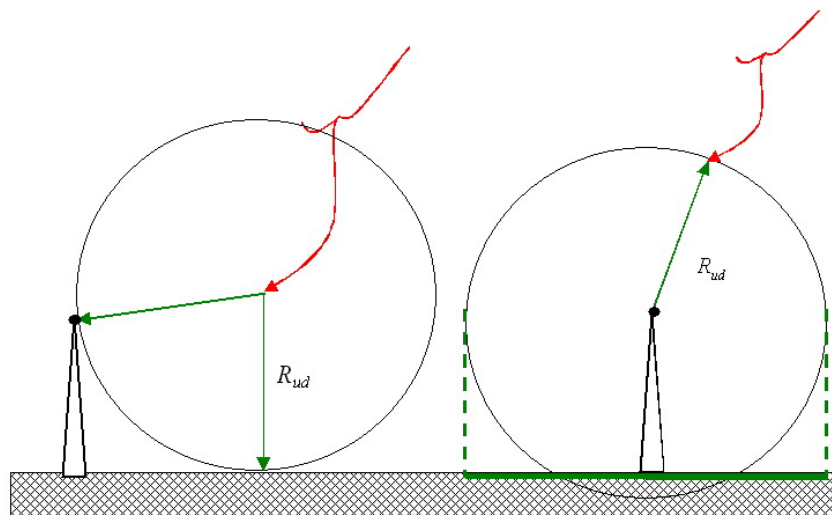
8.4.3 Uticaj mesta udara groma na rizik kvara izolacije

Broj pražnjenja u nadzemne vodove (incidencija pražnjenja)

U analizi broja preskoka na izolaciji nadzemnih vodova veoma veliki značaj ima godišnji broj pražnjenja u vod dužine 100 km. Ova veličina se određuje na bazi atraktivne zone voda (površina ravne zemlje ispod voda u koju bi se odvijala pražnjenja kada voda ne bi bilo). Postoje dva moguća pristupa proračunu atraktivne zone voda:

- strujno nezavisni pristup,
- strujno zavisni pristup.

Kod strujno nezavisnog pristupa se usvaja da je udarno rastojanje (rastojanje poslednjeg skoka skokovitog lidera pre konačnog udara u objekat na zemlji) zavisno jedino od visine objekta. Na slici 8.22 objašnjen je pojam udarnog rastojanja. Na slici 8.22



Slika 8.22: Objašnjenje definicije atraktivne zone voda

levo prikazan je krug sa centrom u vrhu skokovitog lidera u trenutku pred poslednji skok. Poluprečnik kruga označen sa R_{ud} predstavlja rastojanje koje skokoviti lider može da pređe u poslednjem skoku. Ovo rastojanje se naziva udarnim rastojanjem i prema elektro-geometrijskom modelu opisanom u [43] može se izraziti u obliku:

$$R_{ud} = kI^a \quad (8.83)$$

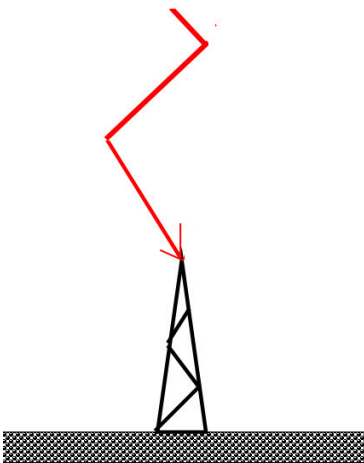
gde su:

k i a –empirijske konstante. Vrednosti konstanti k i a su različite prema raznim autorima.

$I(kA)$ – očekivana struja pražnjenja, odnosno ona struja koja će se pojaviti nakon završetka poslednjeg skoka skokovitog lidera i uspostavljanja glavnog pražnjenja.

Na slici 8.22 (desno) objašnjeno je određivanje atraktivne zone voda. Umesto opisanje kružnice poluprečnika R_{ud} sa centrom u tački na vrhu skokovitog lidera neposredno pred poslednji skok, nacrtana je kružnica poluprečnika koji odgovara udarnom rastojanju R_{ud} sa centrom na mestu najvišeg provodnika voda (zaštitnog užeta ili najvišeg provodnika ako je vod bez zaštitnog užeta). Projekcija kružnice na ravnu zemljinu površinu ispod voda ima širinu $2 \cdot R_{ud}$ i predstavlja širinu atraktivne zone.

Na dužinu poslednjeg skoka, odnosno udarno rastojanje R_{ud} , pored intenziteta električnog polja koje deluje sa vrha skokovitog lidera usled količine elektriciteta unutar njegovog kanala, veliki uticaj ima i visina objekta na zemlji, sa kojeg se može pojaviti povezni lider, čiji je značaj veći kod objekata veće visine. Smatra se da kod objekata preko 60 m postaje dominantniji uticaj uzlaznog lidera od silaznog, pa se češće javljaju uzlazna pražnjenja. Na slici 8.23 je objašnjen nastanak poveznog lidera.



Slika 8.23: Objašnjenje nastanka poveznog lidera

Izračunavanje udarnog rastojanja je detaljno objašnjeno u poglavlju 8.3.

Da bi se u inženjerskim proračunima pojednostavio postupak, izvršeno je određivanje udarnog rastojanja za srednju vrednost amplitude struje glavnog pražnjenja od 35 kA prema [13, 66]. Izračunavanje udarnog rastojanja urađeno je pomoću izraza 8.39. Na taj način je dobijen strujno nezavistan model udarnog rastojanja.

$$R_{ud} = 14 \cdot H^{0,6} \quad (8.84)$$

Ako se posmatra vod sa dva zaštitna užeta na međusobnom rastojanju b , atraktivna zona voda dužine d za atmosferska pražnjenja iznosi:

$$A_d = d \cdot (b + 2 \cdot R_{ud}) \times 10^{-3} \quad (8.85)$$

gde je b razmak između zaštitnih užadi izražen u [m], a A_d se izražava u km^2 .

Atraktivna površina voda dužine 1 km obeležena kao A_{1km} se izražava u km^2 . Atraktivna površina svedena na $d=100$ km voda iznosi:

$$A_{100km} = 0,1 \cdot (b + 2 \cdot R_{ud}) \quad (8.86)$$

Ukoliko je vod sa jednim zaštitnim užetom, tada je $b = 0$. Ukoliko je vod bez zaštitnih užadi, tada je b horizontalno rastojanje između najudaljenijih faznih provodnika.

Godišnja gustina atmosferskih pražnjenja N_G za određenu teritoriju predstavlja godišnji broj pražnjenja u horizontalnu površinu zemlje od 1 km^2 . Godišnja gustina pražnjenja se danas određuje pomoću sistema za lokaciju atmosferskih pražnjenja, koji se primenjuje i u našoj zemlji. Za područja za koje još ne postoje rezultati akvizicije podataka iz sistema za lokaciju atmosferskih pražnjenja, u upotrebi je izraz za određivanje godišnje gustine pražnjenja na osnovu godišnjeg broja grmljavinskih dana (kerauničkog nivoa T_d) prema [6, 67].

$$N_G = 0,04 \times T_d^{1.25} \quad (8.87)$$

Konačan izraz za broj atmosferskih pražnjenja u vod dužine 100 km u toku jedne godine je po strujno nezavisnom modelu:

$$N_{100km,1god} = N_G \cdot A_{100km,1god} \quad (8.88)$$

gde je:

$$A_{100km,1god} = 0,1 \cdot (b + 28 \cdot H^{0.6}) \quad (8.89)$$

U slučaju strujno zavisnog modela izraz za godišnji broj udara u vod dužine 100 km ima oblik ima identičan oblik kao 8.88, ali se atraktivna zona voda računa po sledećem izrazu:

$$A_{100km,1god} = 0,1 \cdot (b + 84 \cdot H^{0.6} I^{0.74}) \quad (8.90)$$

Na osnovu 8.88 može se odrediti godišnji broj pražnjenja na 100 km voda po strujno nezavisnom modelu, a po 8.90 po strujno zavisnom. Preporučuje se korišćenje strujno nezavisnog modela zbog bolje primenljivosti na širi dijapazon struja pražnjenja.

Obuhvatanje ugiba provodnika

U slučaju analize vodova sa dugačkim rasponima, ugib provodnika može da ima uticaj na godišnji broj pražnjenja u vod.

Efektivna visina voda je postupak koji je predložen prilikom uvođenja Elektrogeometrijskog modela [52]. Predloženi postupak je omogućavao približno uzimanje u obzir konfiguracije terena podelom terena na ravne, brdovite i planinske. Kod brdovitih i planinskih terena uziman je u obzir "ugib terena", odnosno visinu podnožja stuba u odnosu na najnižiu tačku površine zemlje između stubova. Uobičajena praksa u procesu koordinacije izolacije je da se uzimaju srednji geometrijski parametri vodova u odnosu na ravnu površinu zemlje. Efektivna visina voda se u tom slučaju izračunava na sledeći način:

$$H_{ef} = H - \frac{2}{3}f \quad (8.91)$$

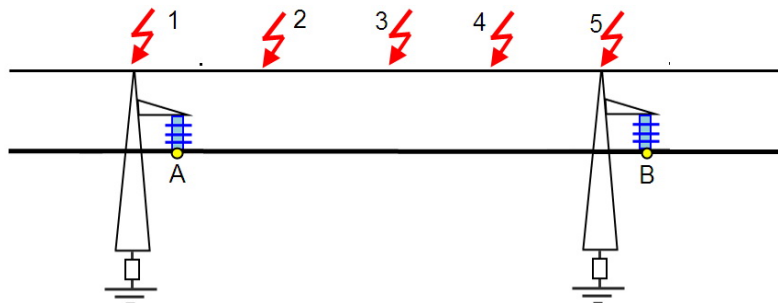
gde su:

H –visina vešanja najvišeg provodnika na stubu,

H_{ef} –efektivna visina provodnika pomoću koje se izračunava atraktivna zona voda,

f –maksimalni ugib provodnika na sredini raspona.

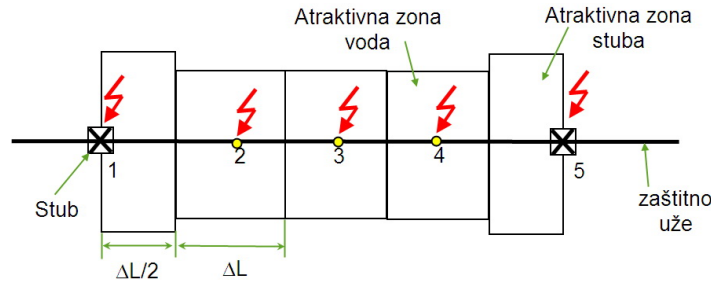
U dosadašnjoj praksi proračuna godišnjeg ispada vodova [43] raspon je deljen na n segmenata, od kojih se prvi i poslednji odnose na segmente neposredno uz stub, a ostali su na rasponu, kao na slici 8.24. Razmatraju se pražnjenja u vrh stuba ili u njegovu neposrednu blizinu, kao i na $n-2$ lokacije duž raspona i u stub na drugom kraju raspona. Iskustveno se došlo do optimalnog broja lokacija pražnjenja $n=5$. Zahvaljujući sistematskom variranju



Slika 8.24: Variranje mesta atmosferskog udara u vod duž raspona

mesta udara duž raspona može se obuhvatiti smanjenje verovatnoće nastanka preskoka kada do udara dolazi na sredini raspona, jer oba stuba dele struju pražnjenja, u odnosu

na slučaj kada do udara dolazi u stub ili u njegovu blizinu. Osnovna pretpostavka kod primenjene metode je da kada se jedan raspon podeli na $n - 1$ segmenata, tada se pretpostavlja da je verovatnoća preskoka konstantna bez obzira u kom delu segmenta dužine ΔL je došlo do udara. Na slici 8.25 prikazane su atraktivne zone pojedinih segmenata. Smatra se da je nešto veća verovatnoća pražnjenja u stub nego u raspon, pa se zato pove-



Slika 8.25: Uvođenje korekcije atraktivne zone usled dalekovodnih stubova

ćava za korekcionni faktor K_s atraktivna zona stuba u odnosu na raspon. Broj pražnjenja u segmente raspona dužine ΔL je:

$$N_{\Delta L,1 \text{ god}} = N_G \cdot A_{\Delta L} \quad (8.92)$$

gde je:

$$A_{\Delta L} = \frac{\Delta L}{1000} \cdot (b + 28 \cdot H^{0,6}) \quad (8.93)$$

Usvojen je koeficijent korekcije atraktivne zone stuba $K_s = 1.2$. Posmatrana dužina segmenta uz stub je $0.5 \cdot \Delta L$, zbog toga što druga polovina segmenta pripada drugom rasponu. Atraktivna zona polovine segmenta raspona uz stub je:

$$A_{\Delta L/2} = 0,5 \cdot K_s \cdot \frac{\Delta L}{1000} \cdot (b + 28 \cdot H^{0,6}) \quad (8.94)$$

Tačan model ugiba na rasponu je uveden da bi se povećala tačnost proračuna atraktivne zone voda, uvažavajući promenu visine najvišeg provodnika duž raspona. Ovaj model nije toliko važan za određivanje ugroženosti vodova od atmosferskih pražnjenja, odnosno određivanje broja preskoka usled atmosferskih pražnjenja na 100 km voda, već kod analize ugroženosti opreme u postrojenjima. U nekim slučajevima je geometrija raspona od prvog stuba ispred transformatorske stanice do ulaznog portala takva da postoji velika razlika u visini stubova. Otpori uzemljenja prvog stuba voda i ulaznog portala takođe mogu da budu veoma različiti.

Fazni provodnici i zaštitna užad usled težine dobija oblik lančaniće, koja se može matematički opisati jednačinom lančaniće u sledećem obliku:

$$y = A_0 \cdot \cosh\left(\frac{x - C_1}{A_0}\right) + C_2 \quad (8.95)$$

gde su:

x – rastojanje posmatrane tačke na rasponu od leve tačke vešanja [m],

y – visina tačke na rasponu u odnosu na tlo [m],

A_0 – vrednost konstante koja se izračunava preko sledećeg izraza:

$$A_0 = \frac{d^2}{8 \cdot f} \quad (8.96)$$

C_1 i C_2 – Konstante koje se izračunavaju preko sledećih izraza:

$$C_1 = \frac{d - 2 \cdot A_0 \cdot \log(B + \sqrt{B^2 + 1})}{2} \quad (8.97)$$

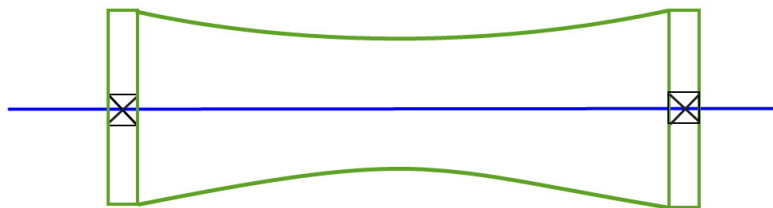
$$C_2 = H_1 - A_0 \cdot \cosh(B) \quad (8.98)$$

gde je:

$$B = \frac{H_1 - H_2}{2 \cdot A_0 \cdot \sinh(-\frac{d}{2 \cdot A_0})} \quad (8.99)$$

H_1 i H_2 –visina tačke vešanja užeta na početku i na kraju posmatranog raspona.

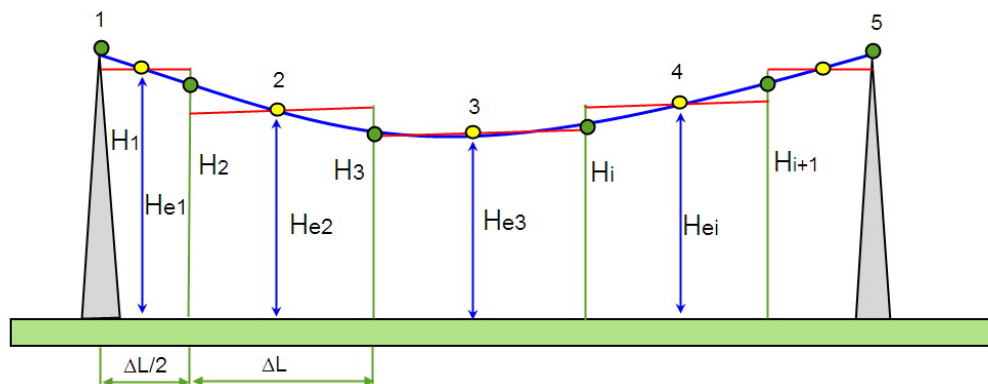
Na slici 8.26 prikazana je atraktivna zona voda kada se uzme u obzir uticaj ugiba provodnika, smatrajući da je atraktivna zona vrha stuba nešto veća nego atraktivna zona užeta na rasponu zbog geometrije stuba. Prilikom proračuna ugroženosti nadzemnog voda



Slika 8.26: Izgled atraktivne zone voda vodeći računa o uticaju ugiba provodnika

od atmosferskih prenapona lokacija atmosferskog pražnjenja se ne varira kontinualno duž raspona, već se proračun vrši za n diskretnih tačaka udara, kao na slici 8.25

Proračun se radi kao da se udar dogodio u sredinu segmenta dužine ΔL , smatrajući da je razlika u prenaponima mala ako se kvar dogodio bilo gde duž segmenta ΔL . Zbog toga se kompletan raspon deli na n segmenata i za svaki segment se određuje atraktivna



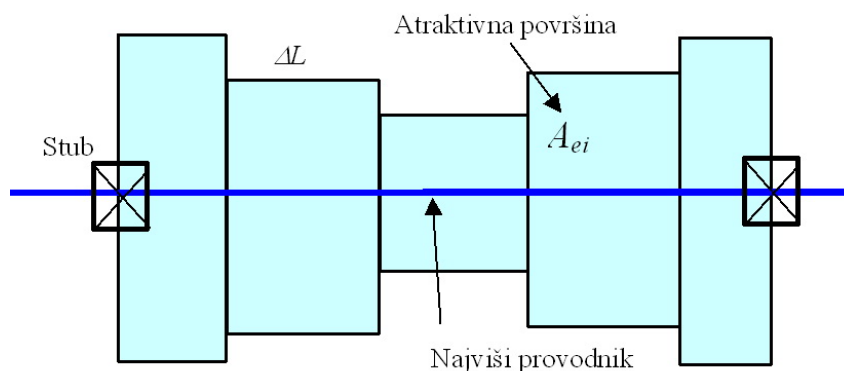
Slika 8.27: Određivanje srednje visine povodnika za svaki segment raspona

zona, zanemarujući promenu visine provodnika duž segmenta ΔL , već modelujući visinu provodnika da se menja stepenasto, kao na slici 8.27.

Srednja visina provodnika na segmentu raspona i se određuje kao aritmetička sredina visina graničnih tačaka segmenata raspona, odnosno:

$$H_{ei} = \frac{H_i + H_{i+1}}{2} \quad (8.100)$$

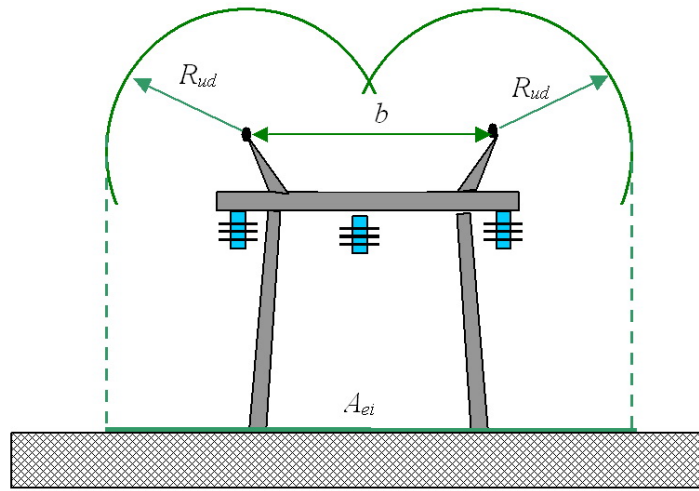
Na slici 8.28 prikazane su atraktivne zone koje odgovaraju pojedinim srednjim visinama segmenata raspona H_{ei} .



Slika 8.28: Atraktivne zone pojedinih segmenata raspona

U slučaju kada je vod sa dva zaštitna užeta, atraktivna zona se računa na osnovu 8.93 za segment na rasponu, odnosno 8.94 za segment uz stub, uzimajući u obzir i razmak dva zaštitna užeta, kao na slici 8.29

Opisanim postupkom se modeluje atmosfersko pražnjenje u pojedinim tačkama duž raspona, uzimajući u obzir oblik lančаницe najvišeg faznog provodnika.



Slika 8.29: Određivanje atraktivne zone voda sa dva zaštitna užeta

Metodom opasnih parametara se određuje rizik da pri udara groma na sredini segmenta raspona dođe do preskoka na izolaciji voda ili proboja unutrašnje izolacije transformatora. U realnom sistemu je mesto udara groma slučajna veličina, čija učestanost zavisi od atraktivne površine segmenta voda koji se razmatra.

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 i -tu deonicu raspona nadzemnog voda dužine ΔL , uzima se srednja visina posmatrane deonice raspona H_{ei} i određuje atraktivna zona deonice $A_{\Delta Li}$ za i -tu deonicu raspona. Metodom opasnih parametara može se izračunati verovatnoća pojave amplitude struje I pri različitim strminama S iznad krive opasnih parametara. Za i -tu deonicu raspona je verovatnoća pojave parametara atmosferskih pražnjenja koji premašuju kritične usvojena da je konstantna na celoj deonici dužine ΔL i iznosi P_i . P_i predstavlja verovatnoću preskoka usled atmosferskog pražnjenja u sredinu i -te deonice raspona.

Godišnji broj preskoka na deonici i dužine ΔL usled atmosferskih prenapona je:

$$N_{1god,\Delta Li} = P_i \cdot A_{\Delta Li} \cdot N_G \quad (8.101)$$

gde je:

N_G -godišnji broj udara groma po km^2 , odnosno godišnja gustina pražnjenja.

$A_{\Delta Li}$ -atraktivna površina i -tog segmenta raspona.

P_i -verovatnoća kvara izolacije (preskoka ili proboja) pri atmosferskom pražnjenju u i -ti segment voda.

Godišnji broj udara u stub i njegovu okolinu se uvećava zbog povećane atraktivne zone stuba, koja se uzima u obzir pomoću koeficijenta privlačenja stuba K_s . U proračunima je usvojeno da je $K_s = 1, 2$. Kada se računa broj pražnjenja u stub, tada se dužina posmatranog segmenta uzima upola manja nego što je to za raspon, jer druga polovina segmenta pripada susednom rasponu. Broj udara u stub, odnosno u njegovu okolinu na dužini $0,5 \cdot \Delta L$ iznosi:

$$N_{1god,0.5\Delta L} = 0,5 \cdot A_1 K_s \cdot N_G \quad (8.102)$$

U izrazu 8.102 veličina A_1 predstavlja atraktivnu zonu stuba i segmenta raspona uz stub dužine $0.5\Delta L$. To je atraktivna površina u okolini stuba u kojoj atmosferska pražnjenja imaju isti efekat kao da su se dogodila u vrh stuba. To znači da bilo koji udar groma unutar površine A_1 izaziva proticanje struje kroz stub i refleksije talasa od uzemljivača kao da se udar dogodio u sam vrh stuba.

Izraz za srednji godišnji broj preskoka na jednom rasponu voda dužine L , koji je podeljen na n_L deonica, ima oblik:

$$N_{1god,L} = (0,5 \cdot P_{s1} K_s A_1 + \sum_{i=2}^{n_L-1} P_i A_i + 0,5 \cdot P_{sn_L} K_s A_{n_L}) \cdot N_G \quad (8.103)$$

gde su:

P_{s1}, P_{sn_L} – verovatnoća preskoka usled atmosferskih pražnjenja u tačke 1 i n_L na vrhovima stubova koji definišu raspon,

A_1, A_{n_L} – atraktivne zone stubova koji definišu raspon,

P_i – verovatnoća preskoka usled atmosferskih pražnjenja u tačku i na rasponu,

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

Sumiranjem broja preskoka usled pražnjenja u sve deonice voda dobija se ukupna verovatnoća preskoka usled udara groma u zaštitno užu ili u stub na celoj dužini voda $L_v = \sum L_j$, gde je L_j dužina j -tog raspona voda, izražena u [km].

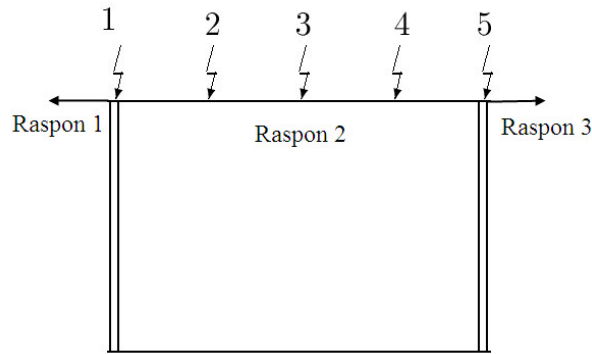
$$N_{1god,L_v} = \sum_{j=1}^m N_{1god,L_j} \quad (8.104)$$

gde je m ukupan broj raspona voda.

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

$$N_{1god,100km} = \frac{100N_{1god,L_v}}{L_v} \quad (8.105)$$

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 8.30. Pokazuje se da je za tačnost proračuna koja je u tehnički prihvatljivim granicama dovoljno uzeti 5 tačaka, kao na slici 8.30.



Slika 8.30: Variranje mesta udara duž raspona voda identičnih karakteristika stubova

Levo i desno od analiziranog raspona potrebno je dodati beskonačno dugačke provodnike koji se modeluju koncentrisanim otpornicima čija je otpornost jednaka karakterističnoj impedansi provodnika. U slučaju kratkih raspona potrebno je susedne raspone modelovati uzimajući u šemu i susedne stubove. Što je otpornost uzemljenja stubova veća i dužina raspona kraća, potrebno je uzeti veći broj raspona u model. Minimalan broj raspona se može empirijski odrediti za određenu otpornost uzemljenja stuba, probajući više varijanti determinističkim postupkom.

8.4.4 Proračun broja godina bez kvara transformatora

Na veoma sličan način se može vršiti proračun ugroženosti transformatora od nailazećih talasa po vodovima usled povratnog preskoka na prilazu postrojenju. Raspon j dužine L_j ispred postrojenja se deli na $n_L - 1$ elementarnih deonica. Verovatnoća kvara izolacije transformatora se računa za udare gromova u n_L tačaka koje ograničavaju elementarne deonice dužine $\Delta L = L_j / (n_L - 1)$. Srednji godišnji broj kvarova transformatora $N_{Tj,1god}$ za atmosferska pražnjenja unutar posmatranog raspona j može se izračunati primenom

trapeznog pravila u sledećoj formi:

$$N_{Tj,1god} = \left[0,5 \cdot K_s \cdot A_1 \cdot P_{s1} + \sum_{i=1}^{n_L-1} A_i \cdot P_i + 0,5 \cdot K_s \cdot A_{n_L} \cdot P_{sn_L} \right] \cdot \frac{N_G}{100} \quad (8.106)$$

gde su:

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

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

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

$$N_{T,1god} = \sum_{j=1}^m N_{Tj,1god} \quad (8.107)$$

gde su:

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

m – 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 udari velikih amplituda struja groma izazivaju preskoke pri prostiranju 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:

$$N_{god} = \frac{1}{N_{T,1god}} \quad (8.108)$$

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

8.4.5 Verovatnoća pražnjenja mimo zaštitnog užeta

Prilikom određivanja verovatnoće atmosferskog pražnjenja mimo zaštitnog užeta se za svaku graničnu vrednost struje groma I koja izaziva kvar izolacije, može primenom elektrometrijskog 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 (amplitude struje I i strmine struje S koji izazivaju kvar izolacije), što se množi verovatnoćom da se takvi parametri pojave prodorom groma mimo zaštitnog užeta.

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

Proračun izraza 8.109 numeričkim putem za logaritamsko-normalnu raspodelu amplituda i strmina struja groma može se uraditi modifikacijom izraza 8.29 množenjem svake promenljive x koja predstavlja normalizovanu vrednost amplitude struje sa odgovarajućom verovatnoćom prodora te struje kroz gromobransku zaštitu, odnosno:

$$P_{D_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{y_i^2}{2}} \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz + e^{-\frac{y_{i+1}^2}{2}} \int_{z(y_{i+1}, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \right\} \quad (8.110)$$

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

$$I(i) = \int_{z(y_i, x)}^{\infty} \omega(z) X dz \quad (8.111)$$

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:

$$I(i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[\frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j) + \frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} X(j+1) \right] \times \left[\frac{x(j+1) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} - \frac{x(j) - \rho y(i)}{\sqrt{1 + \rho^2}} \right] \quad (8.112)$$

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 prođe 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 prođu 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 8.111 mora rešavati numerički, a u ostalim slučajevima se može rešavati analitički primenom Laplasove funkcije 8.32.

8.4.6 Rizik kvara izolacije po uprošćenoj IEC metodi

U slučaju primene uprošćene IEC metode za određivanje kritičnih parametara određuje se samo jedna kritična tačka definisana amplitudom struje iznad koje nastaju kvarovi izolacije I_g . Ovoj amplitudi struje odgovara kritična strmina čela S_g . Verovatnoća premašenja kritične amplitude se može odrediti primenom izraza za kumulativnu verovatnoću Gausove raspodele prema 6.8, odnosno kao komplementarna verovatnoća premašenja struje u obliku:

$$\overline{P(x)} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (8.113)$$

gde je: $x = \frac{\ln \frac{I_g}{I_{sr}}}{\sigma_{lnI}}$

8.4.7 Numerički postupak integraljenja gustine raspodele

Za numerički proračun integrala logaritamskom-normalbe raspodele se mogu koristiti standardne funkcije koje se nalaze u numeričkim paketima, na primer programima MatLab, Fortran, Microsoft Excel i drugi.

Verovatnoća dostizanja temene vrednosti struje I_g , odnosno normalizovane promenljive x :

$$P(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{ERF}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (8.114)$$

gde je ERF funkcija greske, standardna funkcija većine numeričkih paketa, odnosno:

$$\operatorname{ERF}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (8.115)$$

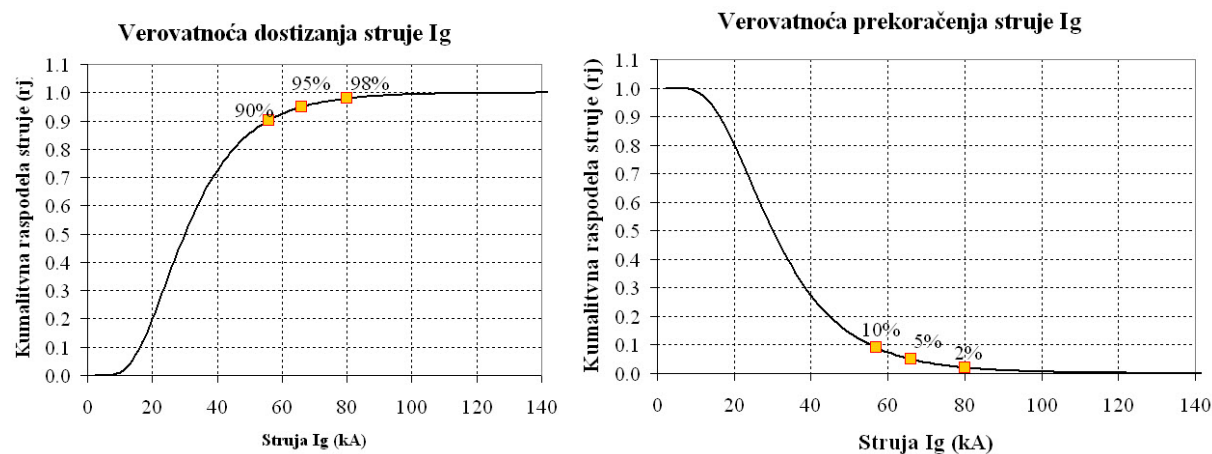
Normalizovana promenljiva x ima značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I_g}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.116)$$

Komplementarna funkcija greške je:

$$\operatorname{ERFC}(x) = 1 - \operatorname{ERF}(x) \quad (8.117)$$

Na slici 8.31 prikazane su log-normalne kumulativne krive dostizanja vrednosti struje pražnjena I_g (levo) i prevazilaženja struje I_g (desno).



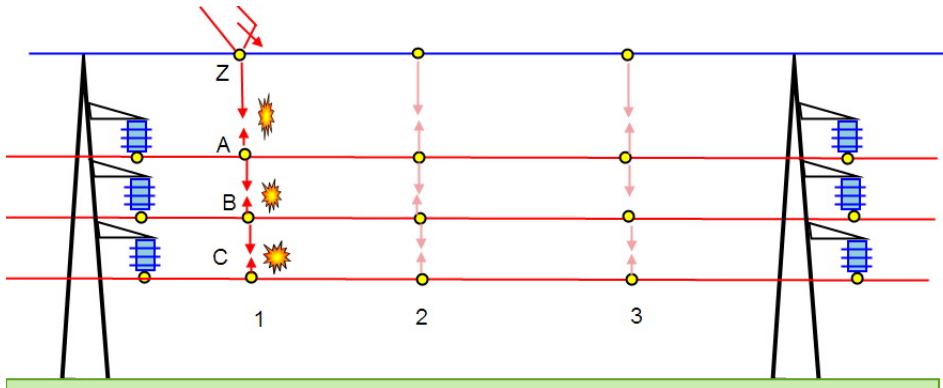
Slika 8.31: Kumulativna logaritamsko-normalna kriva dostizanja struje pražnjenja (levo) i kriva prekoračenja struje I_g (desno)

Za koordinaciju izolacije je povoljnije koristiti krivu verovatnoće prekoračenja struje, jer ona pokazuje verovatnoću da će struja preći vrednost dozvoljene struje i izazvati kvar izolacije.

Oznake 90 %, 95 % i 98 % pokazuju struje koje mogu biti dostignute sa 90 %, 95 % i 98 % verovatnoće, na slici levo. Na slici desno oznake 10 %, 5 % i 2 % označavaju struje koje mogu biti prevaziđene sa verovatnoćama 10 %, 5 % i 2 %.

8.4.8 Analiza uticaja mesta udara kod trofaznih vodova

U slučaju analize trofaznih vodova mogu se razlikovati jednopolni kvarovi i višefazni kvarovi usled preskoka prouzrokovanih atmosferskim pražnjenjima u nadzemne vodove. U slučaju jednopolnih kvarova može se tehnikom jednopolnog APU-a električni luk usled preskoka ugasiti i kvar eliminisati posle kratke beznaponske pauze i na taj način trajan kvar pretvoriti u prolazan kvar. U slučaju višefaznih kvarova tehnika jednopolnog APU-a ne može eliminisati kvar sa lukom koji je nastao preskokom usled atmosferskih pražnjenja. Da bi se višefazni preskok isključio mora se primeniti trofazno APU, koje ima znatno veći uticaj na pogon elektroenergetskog sistema kada se primenjuje u visokonaponskim mrežama. Analiza atmosferskih prenapona na trofaznim nadzemnim vodovima se vrši da bi se utvrdio procenat jednofaznih preskoka u odnosu na ukupan broj preskoka. Osim toga, moguće je odvojeno računati broj preskoka na rasponu i broj preskoka na izolaciji stubova. Ukoliko se primene odvodnici prenapona na vodovima, tada oni nemaju bitan uticaj na broj preskoka na rasponu. Na slici 8.32 prikazan je model trofaznog voda na kome se varira mesto udara atmosferskog pražnjenja. Osnovna pretpostavka na modelu trofaznog



Slika 8.32: Model trofaznog voda na kome se varira mesto udara atmosferskog pražnjenja

voda na slici 8.32 je da će na rasponu uvek doći do preskoka baš u tački atmosferskog pražnjenja. Kada razlika potencijala između zaštitnog užeta (tačka Z) i faze A poraste iznad podnosivog preskočnog napona, određenog po nekoj od metoda opisanih na strani 237, tada nastaje preskok pri struji i_{iA} pri delovanju linearnog talasa strmine S_i koja se određuje iz izraza:

$$i_{iA} = S_i \cdot t_{iA} \quad (8.118)$$

gde je t_{iA} vreme potrebno da talas strmine S_i poraste iznad podnosivog napona između tačaka Z i A , odnosno da budu zadovoljeni uslovi da nastane preskok. Nakon preskoka sa zaštitnog užeta ka fazi A , naponska razlika između faza A i B raste dok ne budu zadovoljeni uslovi za nastanak preskoka, u vremenskom trenutku t_{iB} merenog od atmosferskog pražnjenja, odnosno posle vremena Δt_{AB} od nastanka preskoka sa zaštitnog užeta ka fazi

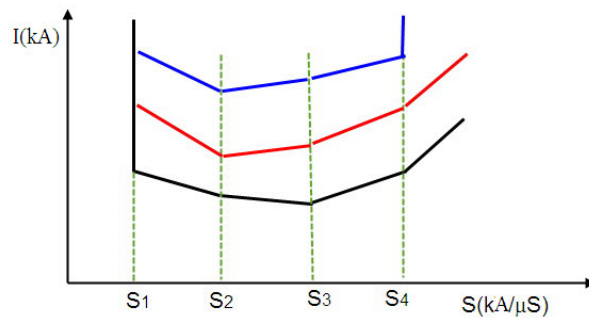
A. Struja koja izaziva preskok na fazi B je:

$$i_{iB} = S_i \cdot (t_{iA} + \Delta t_{AB}) \quad (8.119)$$

Posle preskoka ka fazi B raste razlika napona između faza B i C . Ukoliko budu ispunjeni uslovi za preskok, posle vremena Δt_{BC} merenog od trenutka preskoka sa faze A na fazu B , struja koja izaziva preskok na fazi C je:

$$i_{iC} = S_i \cdot (t_{iA} + \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC}) \quad (8.120)$$

Znajući potrebne struje koje izazivaju preskok od zaštitnog užeta ka fazi A , od faze A do faze B i od faze B do faze C , mogu se formirati 3 krive opasnih parametara, gde svakoj strmini talasa S_i odgovaraju 3 vrednosti struje i_{iA} , i_{iB} i i_{iC} . Na slici 8.33 prikazane su 3 krive opasnih parametara koje odgovaraju kvarovima na fazama A , B i C .



Slika 8.33: Tri krive opasnih parametara koje odgovaraju kvarovima na fazama A , B i C

Prilikom atmosferskog udara u zaštitno uže, javljaju se putujući talasi ka stubovima koji ograničavaju posmatrani raspon. Ukoliko do povratnog preskoka prema fazi A dođe na najbližem stubu u trenutku $t_{ipA} < t_{iA}$, to znači da će do preskoka na fazi A doći prvo na stubu, pa tek kasnije na rasponu. U tom slučaju se verovatnoća povratnog preskoka računa u odnosu na struju koja izaziva preskok:

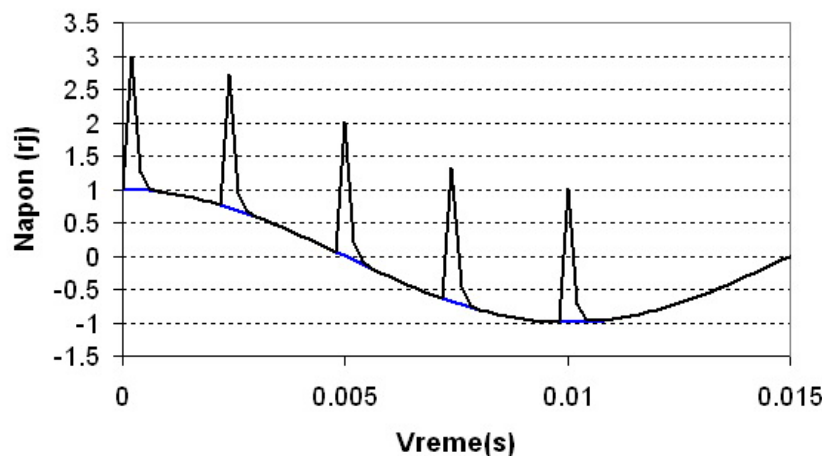
$$I_{ipA} = S_i \cdot (t_{iA}) \quad (8.121)$$

Pod **mestom kvara** podrazumeva se kvar na stubu ili na rasponu. Kada se vrši proračun metodom opasnih parametara strminom S_i , prvi put dođe do kvara na fazi J , ($J = 1, 2, 3$) na stubu, deklarise se da je kvar na fazi J izazvala struja I_{ipJ} usled povratnog preskoka, bez obzira što daljom simulacijom može nastati kvar na rasponu. Kada nastanu kvarovi na sve 3 faze, proračun za strminu talasa S_i se prekida započinje proračun sa novom strminom S_{i+1} . Na ovaj način se formira kriva opasnih parametara. Pri formiranju krive opasnih parametara se razdvajaju krive opasnih parametara za povratne preskoke na stubovima i krive opasnih parametara za tačke na rasponu. Tačka atmosferskog pražnjenja se sistematski varira, a mesto preskoka na rasponu se uvek poklapa sa tačkom atmosferskog pražnjenja.

8.4.9 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. 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. 8.34.



Slika 8.34: Slučajni trenutak atmosferskog pražnjenja u okviru periode radnog napona

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:

$$U_{rad_i} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \cos \Theta_i \quad (8.122)$$

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.

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 u kojoj se trenutna vrednost napona menja od maksimalne do minimalne, 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.

$$N_u = \frac{\sum_1^n N_{\Theta_i}}{n} \quad (8.123)$$

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.

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

Na ovom mestu je data jednostavna analitička metoda za grubu procenu broja preskoka na vodovima ili broja kvarova izolacije opreme usled atmosferskih pražnjenja. Metoda je bazirana na primeni eksponencijalnog zakona raspodele parametara struje groma

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

$$U_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (8.124)$$

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 zanemare-nog radnog napona u trenutku pražnjenja kriterijum preskoka ima oblik:

$$Z_c \frac{I_m}{4} > U_{iz} \quad (8.125)$$

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

Iz izraza 8.125 se dobija kritična struja koja izaziva preskok.

$$I_m > \frac{4 U_{iz}}{Z_c} \quad (8.126)$$

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

$$\overline{P}(I_m) = e^{-I_m/a} \quad (8.127)$$

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,

$\bar{P}(I_m)$ –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 prevaziđena, odnosno:

$$P(U_{iz}) = e^{-\frac{4}{Z_c^a} U_{iz}} \quad (8.128)$$

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

$$n_{1god,100km} = 2 \times 3 H 10^{-3} 100 N_G = 0,6 H N_G \quad (8.129)$$

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:

$$N_p = 2 \times 3 H 10^{-3} 100 N_G P(U_{iz}) = 0,6 H N_G e^{-\frac{4}{Z_c^a} U_{iz}} \quad (8.130)$$

U izrazu 8.130 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:

$$N_{isp} = (1 - \eta) \cdot N_p \quad (8.131)$$

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

8.4.11 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 40% pražnjenja mogu tretirati kao da su se dogodila u vrh stuba, a ostalih 60 % 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:

$$I_{st} = K_{st} \cdot I_g \quad (8.132)$$

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:

$$I_{st} = 0,5 K_{st} I_g \quad (8.133)$$

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:

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot I_{st} + L_{st} \cdot S_{st} \quad (8.134)$$

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

$$U_{iz} < R_{uz} \cdot K_{st} \cdot I_g + L_{st} \cdot K_{st} \cdot S_g \quad (8.135)$$

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 8.135 može pisati u sledećoj formi:

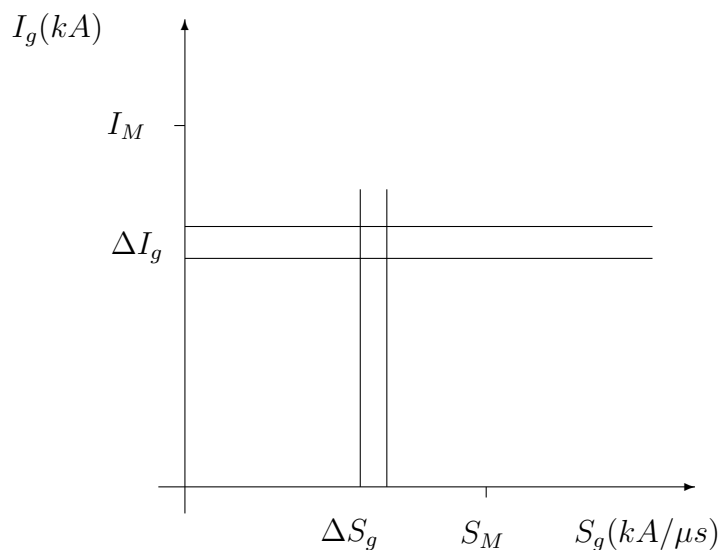
$$\frac{I_g}{I_M} + \frac{S_g}{S_M} > 1 \quad (8.136)$$

gde su:

$$I_M = \frac{U_{iz}}{R_{uz}K_{st}} \quad (8.137)$$

$$S_M = \frac{U_{iz}}{L_{st}K_{st}} \quad (8.138)$$

Na osnovu kriterijuma povratnog preskoka koji je dat izrazom 8.136 formirana je kriva opasnih parametara, koja je prikazana na slici 8.35. Sva atmosferska pražnjenja čija je



Slika 8.35: Kriva opasnih parametara za slučaj udara groma u vrh stuba

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:

$$dP = \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.139)$$

gde su:

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

$$\omega_1(I) = -\frac{1}{a} e^{-\frac{I}{a}} \quad (8.140)$$

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

$$\omega_2(I) = -\frac{1}{b} e^{-\frac{S_g}{b}} \quad (8.141)$$

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

$$P_{ps} = \int_D \omega_1(I_g) \cdot \omega_2(S_g) \cdot \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.142)$$

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 8.142 se dobija:

$$P_{ps} = \int_0^{I_M} \int_i^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g + \int_{I_M}^\infty \int_0^\infty \frac{1}{ab} e^{-\frac{I}{a}} e^{-\frac{S_g}{b}} \delta I_g \cdot \delta S_g \quad (8.143)$$

U izrazu 8.143 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:

$$P_{ps} = \frac{bI_M e^{-S_M/b} - aS_M e^{-I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.144)$$

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 8.144 sada postaje:

$$\frac{I_g}{2 \cdot I_M} + \frac{S_g}{2 \cdot S_M} > 1 \quad (8.145)$$

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

$$P_{pr} = \frac{bI_M e^{-2S_M/b} - aS_M e^{-2I_M/a}}{bI_M - aS_M} \quad (8.146)$$

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:

$$N_{pp} = 6 N_G H_{ef} \cdot 10^{-3} d [P_{st} P_{ps} + P_{ras} P_{pr}] \quad (8.147)$$

gde su:

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

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

Izraz 8.147 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:

$$N_{pp100km} = N_{pp} \frac{100}{d} \quad (8.148)$$

8.5 Monte - Karlo simulacija

8.5.1 Teorijsko objašnjenje

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 analizi uticaja atmosferskih prenapona na izolaciju uvažavaju metodom izvlačenja slučajnih brojeva. Za određeni 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:

$$R = \frac{N_{kvar}}{N_{uk}} \quad (8.149)$$

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 8.150:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (8.150)$$

gde su:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{\ln I}} \quad (8.151)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{\ln S}} \quad (8.152)$$

slučajne promenljive raspoređene po normalnom zakonu raspodele.

Slučajna veličina x koja je raspoređena po normalnom zakonu se može izvlačiti metodom slučajnih brojeva. Slučajna vrednost amplitude struje groma se u tom slučaju dobija iz izraza 8.151:

$$I = I_{sr} e^{x \sigma_{\ln I}} \quad (8.153)$$

Ako se uvede promenljiva $z = \frac{y - \rho x}{\sqrt{1 - \rho^2}}$ koja se može smatrati nezavisnom slučajnom veličinom raspoređenom 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:

$$y = z\sqrt{1 - \rho^2} + \rho x \quad (8.154)$$

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

$$S = S_{sr} e^{y \sigma_{ln S}} \quad (8.155)$$

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 takođe može simulirati izvlačenjem slučajne ravnomerno raspoređene veličine b iz intervala $[0, 1]$. Deonica od stuba do mesta udara Δd_1 dobija se kao:

$$\Delta d_1 = b d_j \quad (8.156)$$

a deonica od mesta udara do drugog stuba:

$$\Delta d_2 = (1 - b) d_j \quad (8.157)$$

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:

$$P(U_{t_i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_{t_i}} e^{-\frac{[u - U_{50\%}(t)]^2}{2\sigma^2}} du \quad (8.158)$$

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:

$$U_{t_i} = x \cdot \sigma + U_{50\%}(t) \quad (8.159)$$

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 8.159.

8.5.2 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:

$$\overline{X_n} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (8.160)$$

predstavlja rizik kvara izolacije računat po izrazu 8.149.

Prema **centralnoj graničnoj teoremi** [71], 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:

$$\frac{\overline{X_n} - M(X)}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (8.161)$$

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:

$$P \left\{ |M(X) - \overline{X_n}| < \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right\} \approx \gamma \quad (8.162)$$

gde su:

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

Φ -tablična funkcija normalne raspodele u kumulativnom obliku,

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (8.163)$$

β -parametar od koga zavisi nivo poverenja.

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \overline{X_n})^2} \quad (8.164)$$

U tablici 8.5.2 date su vrednosti parametara β za nekoliko karakterističnih vrednosti nivoa poverenja γ prema [81].

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

Tabela 8.4: Vrednost parametra β za različite nivoe poverenja

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

$$\overline{X}_n - \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq M(X) \leq \overline{X}_n + \beta \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8.165)$$

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 [81]:

$$n \geq \left\{ \frac{\beta}{\varepsilon} \right\}^2 \frac{1 - \overline{X}_n}{\overline{X}_n} \quad (8.166)$$

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.