

Poglavlje 6

Atmosferska pražnjenja u nadzemne vodove

Atmosferska pražnjenja svojim dejstvom mogu da izazovu prekid prenosa električne energije, što je posebno izraženo kod vodova nižih nazivnih napona. Način dejstva atmosferskog pražnjenja na izolaciju nadzemnog voda zavisi od njegove konstrukcije. Svi nadzemni vodovi se mogu podeliti na tri grupe sa stanovišta ponašanja pri atmosferskim pražnjenjima:

- vodovi na čelično-rešetkastim ili armirano-betonskim stubovima bez zaštitnog užeta,
- vodovi na čelično-rešetkastim ili armirano-betonskim stubovima sa zaštitnim užetom,
- vodovi na drvenim stubovima bez zaštitnog užeta.

Vodovi na drvenim stubovima sa zaštitnim užetom se ne grade u našoj zemlji.

Kod vodova sa čelično-rešetkastim ili armirano-betonskim stubovima bez zaštitnog užeta atmosfersko pražnjenje može da ugrozi izolaciju na tri načina:

- direktnim pražnjenjem u fazni provodnik,
- pražnjenjem u vrh stuba koje izaziva preskok preko izolacije ka faznom provodniku (povratni preskok),
- pražnjenjem u okolinu voda koje izaziva indukovane prenapone na faznim provodnicima.

Kod voda na drvenim stubovima bez zaštitnog užeta atmosfersko pražnjenje može da ugrozi izolaciju na dva načina:

- direktnim pražnjenjem u fazni provodnik,
- pražnjenjem u okolinu voda koje izaziva indukovane prenapone na faznim provodnicima.

Kod vodova sa zaštitnim užadima se mogu razlikovati tri slučaja:

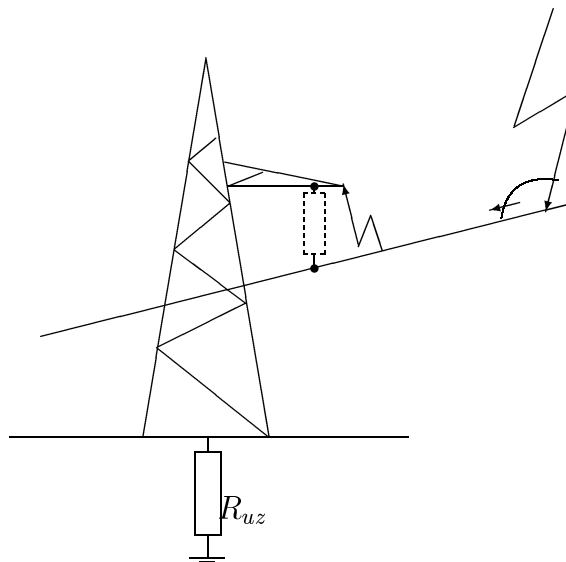
- pražnjenje u zaštitno uže ili vrh stuba, što izaziva preskok preko izolacije ka faznom provodniku (povratni preskok),
- pražnjenje mimo zaštitnog užeta u fazni provodnik,
- pražnjenje u okolinu voda koje izaziva indukovane prenapone na faznim provodnicima.

6.1 Vod sa provodnim stubovima bez zaštitnog užeta

6.1.1 Objašnjenje pojave

Pražnjenje u fazni provodnik nastupa vrlo često kod vodova bez zaštitnih užadi, dok je kod vodova sa zaštitnim užadima ova pojava znatno redja i biće opisana kasnije. Na slici 6.1 prikazana je skica stuba sa faznim provodnikom u koji je došlo do pražnjenja, dok ostale konzole i fazni provodnici nisu ucrtani zbog preglednosti slike.

Atmosfersko pražnjenje izaziva prenaponske talase koji se prostiru na obe strane od mesta pražnjenja duž faznog provodnika. Kada prenaponski talas dodje do stuba, tada može da se javi preskok izmedju faznog provodnika i konzole stuba ukoliko je amplituda prenaponskog talasa veća od podnosivog napona izolacije voda. Ako se preskok pojavi, tada nakon nestanka prenapona kroz jonizovani kanal najčešće nastavlja da protiče struja usled postojanja radnog napona, obrazujući električni luk. Električni luk se obično ne gasi sam od sebe, nego je potrebno vod isključiti radi dejonizacije prostora u kome je goreo električni luk. U tu svrhu se može koristiti prekidač koji ima sistem za isključenje sa brzim automatskim ponovnim uključenjem (APU). Primenom APU-a se vod na kratko isključuje sa beznaponskom pauzom koja je manja od 1 s i posle pauze ponovno uključuje. Ukoliko je kvar trajan, tada se vrši konačno isključenje. Većina potrošača (posebno termički potrošači),



Slika 6.1: Skica stuba na kome nastupa preskok usled pražnjenja u fazni provodnik

ne osećaju smetnje usled dejstva APU-a, tako da se taj vid zaštite može smatrati efikasnim sredstvom eliminisanja smetnji usled atmosferskih pražnjenja u vodove.

Ponekad se električni luk usled atmosferskog pražnjenja ponovo javlja posle brzog ponovnog uključenja, a ponekad atmosfersko pražnjenje izaziva i trajan kvar na izolaciji voda (proboj izolatora). Takav slučaj nazivamo neuspešnim APU-om. Uspešnost APU-a zavisi od trajanja beznaponske pauze, kvaliteta izolacije, visine radnog napona, načina obavljanja isključenja (monofazno ili trofazno) i drugih faktora.

Kod mreža srednjih napona prekidači imaju samo jedan pogonski mehanizam za sva tri pola, pa se isključenje sa automatskim ponovnim uključenjem uvek radi trofazno. Kod mreža visokog napona najčešće su prekidači sa posebnim pogonom za svaki pol. U tom slučaju se može operacija APU-a vršiti monofazno ili trofazno. Monofazno APU je pogodnije, jer izaziva manje poremećaje u sistemu, izaziva niže prenapone i snabdevanje električnom energijom se delimično obavlja preko druge dve faze. Međutim, kod mreža visokog napona dolazi do indukovanja elektromotorne sile za vreme beznaponske pauze na isključenom provodniku usled elektromagnetske sprege između isključenog provodnika i ostala dva fazna provodnika koja su u pogonu. Indukovana elektromotorna sila može da izazove nastavak proticanja struje kroz ranije formiran kanal električnog luka i pored toga što je provodnik isključen. Ova pojava se naziva **sekundarnim lukom**. Kada postoji opasnost od neuspešnih monofaznih APU-a zbog sekundarnog luka kod dugačkih vodova visokih napona, primenjuje se trofazno APU koje potpuno eliminiše opasnost od sekundarnog luka, ali može da izazove visoke sklopne prenapone.

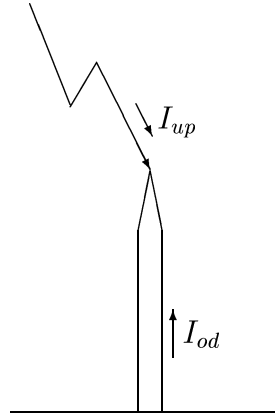
6.1.2 Naprezanje fazne izolacije voda

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:

$$U = Z_g \frac{I_g}{2} \quad (6.1)$$

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 6.2.



Slika 6.2: Tumačenje određivanja struje groma u dobro uzemljene objekte

Smatra se da je karakteristična impedansa stuba po svojoj vrednosti bliska karakterističnoj impedansi kanala groma. 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:

$$I_m = I_{up} + I_{od} \quad (6.2)$$

odnosno:

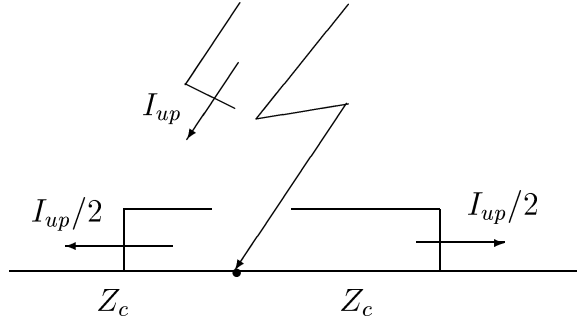
$$I_m \approx 2I_{up} \quad (6.3)$$

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

$$I_{up} \approx \frac{I_m}{2} \quad (6.4)$$

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 6.3. Po faznim provodnicima se prostire strujni talas čija je amplituda:



Slika 6.3: Tumačenje određivanja amplitude strujnog talasa kod udara u fazni provodnik

$$I_f = \frac{I_{up}}{2} = \frac{I_m}{4} \quad (6.5)$$

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:

$$U_f = Z_c I_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (6.6)$$

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 struja groma koja izaziva prenapon koji premašuje udarni podnosivi napon izolacije U_{iz} je:

$$I_m \geq \frac{4U_{iz}}{Z_c} \quad (6.7)$$

U kriterijumu za preskok na izolaciji voda 6.7 nije vodjeno računa o sledećim efektima:

- Slučajnom rasipanju preskočnih napona,
- Superpoziciji radnog napona na faznim provodnicima na atmosferski prenaponski talas,
- Prigušenju i izobličenju talasa.

Uticaj radnog napona na preskok je važan kod vodova nazivnog napona višeg od 110 kV, dok je za ostale vodove zanemarljiv. Ako se ovaj efekat želi uzeti u obzir, tada se izraz 6.6 može modifikovati na taj način što se na prenapon usled atmosferskog pražnjenja superponira trenutna vrednost radnog napona:

$$U_f = Z_c \frac{I_m}{4} + U_m \cos \Theta \quad (6.8)$$

gde su:

U_m – temena fazna vrednost radnog napona voda,

Θ – početna faza radnog napona u trenutku pražnjenja, koja je ravnomerno rasporedjena slučajna veličina u opsegu od 0 do π .

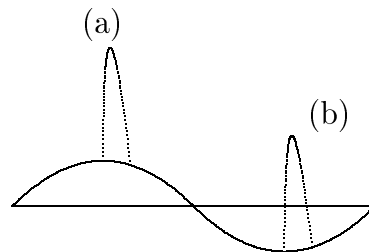
Na slici 6.4 prikazan je uticaj trenutne vrednosti radnog napona na ukupan prenapon. Uočava se da trenutna vrednost radnog napona može da poveća ukupnu vrednost prenapona ako je istog polariteta kao prenaponski talas (slučaj *a*), ili da smanji ukupnu vrednost prenapona ako su suprotnog polariteta (slučaj *b*).

6.1.3 Naprezanje medjufazne izolacije

Pri udaru groma u jedan fazni provodnik na susednim faznim provodnicima se pojavljuju indukovani prenaponi čija je amplituda:

$$U_{ind} = Z_m I_m \quad (6.9)$$

gde su:



Slika 6.4: Uticaj trenutne vrednosti radnog napona na ukupan napon koji napreže izolaciju.
a) Atmosferski prenapon i trenutna vrednost radnog napona su istog polariteta, b) Atmosferski prenapon i trenutna vrednost radnog napona su suprotnog polariteta

U_{ind} – amplituda indukovano prenapona,

Z_m – medjusobna karakteristična impedansa između posmatrana dva provodnika:

$$Z_m = \sqrt{\frac{L_{m1}}{C_{m1}}}$$

L_{m1} – podužna medjusobna induktivnost dva fazna provodnika,

C_{m1} – podužna medjusobna kapacitivnost dva fazna provodnika.

Ako se zameni napon na faznom provodniku usled udara groma iz izraza 6.6 u izraz za indukovani prenapon 6.9, dobija se:

$$U_{ind} = K_m U_f \quad (6.10)$$

gde je K_m koeficijent sprege dva fazna provodnika, koji se izračunava kao:

$$K_m = \frac{Z_m}{Z_c}$$

Koeficijent sprege obično ima vrednost u opsegu $K_m = 0,2 - 0,3$. Napon usled atmosferskog pražnjenja koji napreže medjufaznu izolaciju pri zanemarenoj trenutnoj vrednosti radnog napona ima sledeći oblik:

$$U_L = U_f - U_{ind} = (1 - K_m)U_f \quad (6.11)$$

ili

$$U_L = (1 - K_m) \frac{Z_c I_m}{4} \quad (6.12)$$

Kod udara groma u blizinu stubova veća je verovatnoća da će doći do preskoka između faznog prvodnika i konstrukcije stuba nego između dva fazna provodnika. Jedino u slučaju udara u sredinu raspona postoji verovatnoća nastanka preskoka između dva fazna provodnika i nastanka dvopolnog kratkog spoja. Ovo je znatno verovatnije kod sredjenaponskih vodova kod kojih su međufazna rastojanja manja nego kod visokonaponskih vodova. Medjusobna sprega faznih provodnika smanjuje naprezanje izolacije između faza za 20 % do 30 %.

U slučaju vodova visokog napona potrebno je obuhvatiti uticaj trenutne vrednosti radnog napona na obe faze voda između kojih se određuje ugroženost izolacije.

$$U_L = (1 - K_m) \frac{Z_c I_m}{4} + U_m \cos \Theta - U_m \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (6.13)$$

ili

$$U_L = (1 - K_m) \frac{Z_c I_m}{4} + \sqrt{3} U_m \cos(\Theta + \frac{\pi}{6}) \quad (6.14)$$

Ukoliko je međufazni prenapon U_L viši od podnosivog udarnog međufaznog napona, dolazi do preskoka između faznih provodnika koji predstavlja međufazni kratak spoj.

6.2 Pražnjenje u fazni provodnik voda na drvenim stubovima

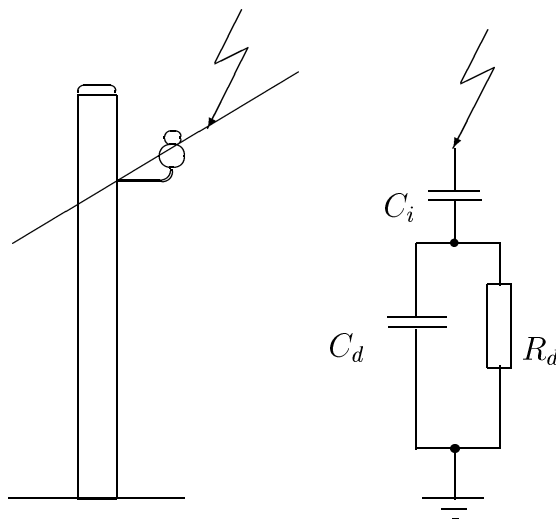
U našoj zemlji se na drvenim stubovima rade vodovi niskog, a znatno redje srednjeg napona, dok se u nekim zemljama primenjuju drveni stubovi i za vodove visokih napona. Prilikom atmosferskog pražnjenja u provodnik voda na drvenim stubovima može doći do preskoka preko izolatora na konzolu, što može da izazove proboj drveta formirajući kanal električnog luka, kroz koji se kasnije zatvara i struja usled radnog napona.

Mogu se razlikovati dva načina ponašanja drvenih stubova u zavisnosti od načina impregnacije:

- Unutrašnjost drvenog stuba je nedovoljno impregnisana, pa sadrži vlagu u unutrašnjim kapilarnim kanalima,
- drveni stub je dobro impregnisan po celoj zapremini drveta.

U slučaju nedovoljne impregnacije unutrašnjosti drvenog stuba pri udaru groma dolazi do preskoka na izolaciji i do provodjenja struje kroz kapilare drvenog jezgra koji sadrže vlagu, koja naglo isparava dovodeći do mehaničkog razaranja drvenog stuba.

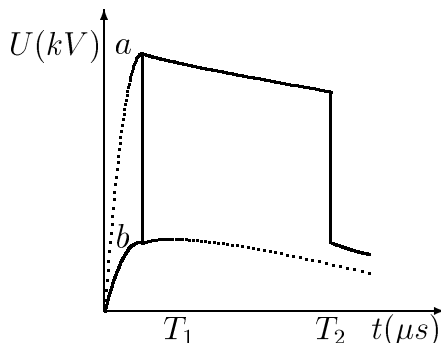
Ako je drveni stub dobro impregnisan, posle preskoka se na izolatoru struja groma provodi kroz ovlažene pukotine neposredno ispod površine drveta. Vodena para stvorena na ovaj način oduvava električni luk nastao proticanjem struje industrijske učestanosti posle preskoka na izolaciji, pa se na ovaj način u nekim slučajevima luk nastao kao posledica delovanja napona industrijske učestanosti gasi sam od sebe. Ova pojava se naziva **samogašenjem električnog luka**. Za razliku od električnog luka u vazduhu, koji emituje svetlost jarko bele boje, luk kroz drvo ima narandžastu boju i nepravilan oblik, izbacujući ponekad sitne opiljke drveta u okolni vazduh. Na slici 6.5 prikazana je zamenska šema drvenog stuba, koja se sastoji od kapacitivnosti izolatora C_i i drveta C_d , otpornosti drvenog stuba R_d . Posle preskoka duž izolatora kapacitivnost C_i je premošćena i struja najvećim delom prolazi kroz nelinearnu otpornost drveta R_d [67]. Na slici 6.6 prikazani su talasni oblici



Slika 6.5: Ekvivalentna električna šema drvenog stuba

punog napona koji deluje na fazni provodnik (b) i napona na drvenom stubu (a). Razlika ova dva napona predstavlja deo napona koji trpi izolator. Tačkastim linijama su označeni talasni oblici napona koji bi se imali kada ne bi bilo preskoka na izolatoru, dok su debljim linijama označeni talasni oblici koji uvažavaju proces preskoka na izolatoru [68].

U trenutku T_1 dolazi do preskoka na izolatoru, tako da se napon na stubu (kriva a) povećava na vrednost punog napona, jer je pad napona na izolatoru jednak nuli. U trenutku T_2 nastupa proboj drvenog stuba izazivajući opadanje ukupnog napona na vrednost koja



Slika 6.6: Talasni oblik napona pri delovanju prenapona na drveni stub. a) talas na faznom provodniku, b) talas na stubu

odgovara padu napona na luku.

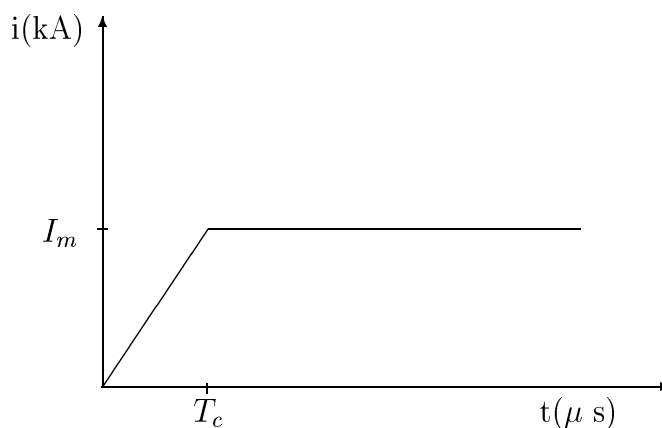
Posle nestanka prenapona i gašenja električnog luka je važno da li se dielektrička izdržljivost jonizovanog prostora oko izolatora i kanala formiranog ispod površine drveta uspostavlja brže od povratnog napona koji deluje na izolaciju usled postojanja radnog napona na vodu. Ukoliko je povratni napon niži od dielektričke izdržljivosti, dolazi do konačnog gašenja luka i prolazni kvar je spontano otklonjen. U suprotnom se luk pali usled delovanja radnog napona i prekidač mora da isključi kvar.

6.3 Pražnjenje u vrh stuba ili zaštitno uže

U slučaju udara groma u vrh stuba ili u zaštitno uže, pri velikoj otpornosti uzemljenja stuba i velikoj amplitudi i strmini struje groma, može se dogoditi da potencijal konzole stuba u odnosu na fazni provodnik poraste iznad podnosivog udarnog napona izolacije. U tom slučaju dolazi do pojave preskoka sa konzole stuba na fazni provodnik, što se naziva **povratnim preskokom**.

Za tumačenje i procenu visine prenapona koji nastaju pri povratnom preskoku mogu se koristiti dva modela stuba. U jednom modelu se stub zamenjuje koncentrisanom induktivnošću, dok se u drugom modelu stub zamenjuje ekvivalentnim kratkim vodom. Pri korišćenju oba modela se unose određene pretpostavke koje pojednostavljaju proračun.

Strujni talas atmosferskog pražnjenja se aproksimira talasom linearno rastućeg čela dužine T_c i konstantnog začelja, kao na slici 6.7.



Slika 6.7: Model talasnog oblika struje pražnjenja

Na ovom mestu će pri analizi pojava kod povratnog preskoka stub biti modelovan pomoću koncentrisane induktivnosti. Ovakav model je nešto jednostavniji za analizu, mada manje tačan od stuba modelovanog pomoću ekvivalentnog voda.

Na slici 6.8 prikazan je pogodjeni stub sa dva raspona i susednim stubovima.

Na slici 6.8 oznake imaju sledeće značenje:

h_s – visina stuba merena od površine zemlje do vrha,

h_k – visina gornje konzole,

h_F – visina faznog provodnika na mestu vešanja,

d_r – rastojanje izmedju susednih stubova,

R_{uz} – otpornost uzemljenja stuba,

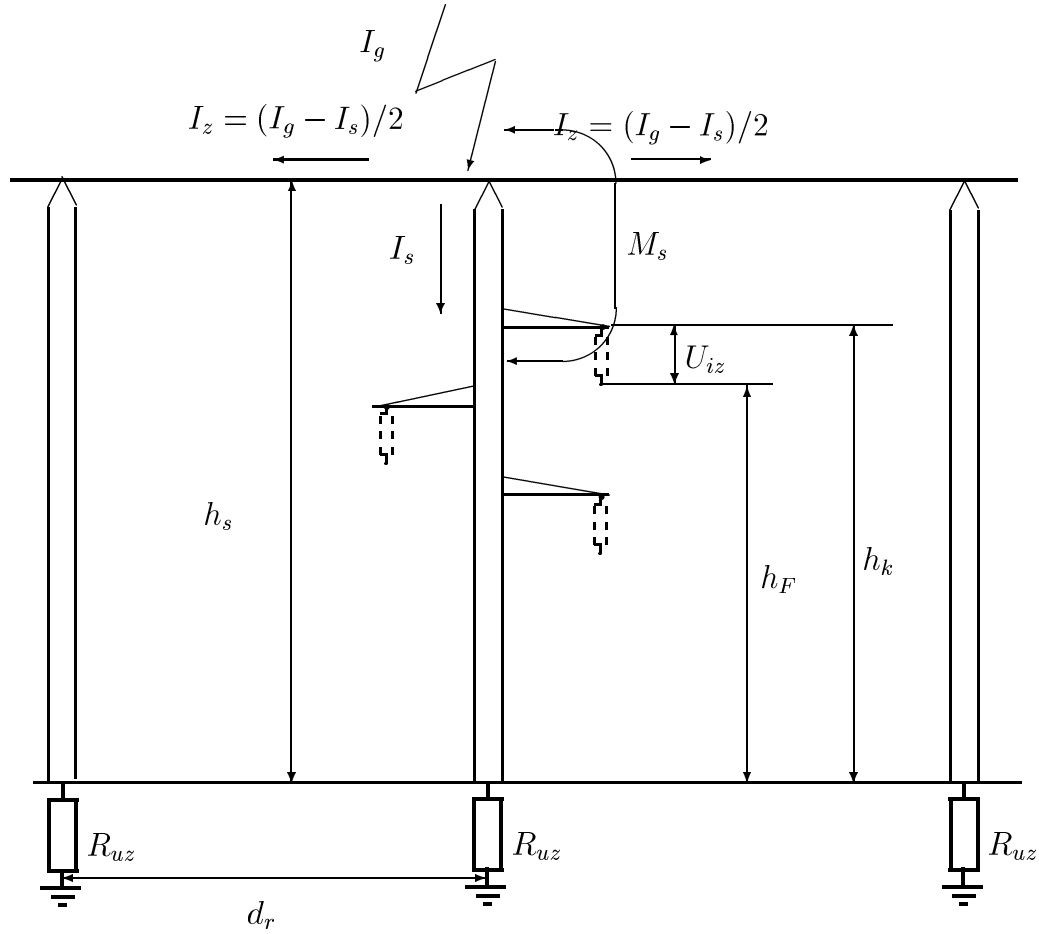
U_{iz} – podnosivi udarni napon izmedju konzole i faznog provodnika,

M_s – medjusobna induktivnost kanala groma i stuba,

I_s – amplituda struje kroz stub,

I_g – amplituda struje groma,

I_z – amplituda struje kroz zaštitno uže.



Slika 6.8: Skica sistema sa pogodjenim stubom i susednim stubovima

Podužna induktivnost pojedinih tipova stubova prema [38] data je u tablici 6.1.

Medjusobna induktivnost izmedju kanala groma i dela stuba koji utiče na potencijal konzole je:

$$M_s = m_s \cdot h_k \quad (6.15)$$

gde je m_s podužna medjusobna induktivnost izmedju kanala groma i stuba čija se vrednost može usvojiti prema [36]:

$$m_s = 0,2 \quad (\mu H/m) \quad (6.16)$$

Maksimalni prenapon na faznoj izolaciji izmedju konzole stuba i faznog provodnika se pojavljuje za vreme uspostavljanja čela talasa. Uslov da na visinu napona na izolaciji stuba ne utiču susedni stubovi je:

$$2 \frac{d_r}{v_o} \leq T_c \quad (6.17)$$

gde su:

Vrsta stuba	$l_s(\mu H/m)$
Portalni stub	0,5
Jelka ili Y metalni stub	0,6
Jelka armirano-betonski stub	0,6
Portalni drveni stub sa dva spusta za uzemljenje	0,7

Tabela 6.1: Podužna induktivnost l_s pojedinih tipova stubova

d_r – rastojanje izmedju pogodjenog i susednog stuba,

v_o – brzina prostiranja talasa po zaštitnom užetu,

T_c – vreme čela struje.

Ako je ispunjen gornji uslov, prenaponski talas će postići maksimalnu vrednost pre nego što se pojavi reflektovani talas sa susednog stuba, koji zbog negativnog koeficijenta refleksije umanjuje napon na pogodjenom stubu.

Amplituda napona na konzoli stuba pogodjenog atmosferskim pražnjenjem u odnosu na udaljenu zemlju kao referentnu tačku, može se izračunati iz sledećeg izraza:

$$U_s = I_s \cdot R_{uz} + l_s \cdot h_k \cdot \frac{I_s}{T_c} + m_s \cdot h_k \cdot \frac{I_g}{T_c} \quad (6.18)$$

U slučaju stuba tipa *jelka* razmatra se ugroženost najvišeg faznog provodnika, dok se kod horizontalne geometrije provodnika posmatra visina zajedničke konzole.

Napon koji napreže faznu izolaciju se sastoji od razlike udarnog napona na konzoli stuba i trenutne vrednosti faznog radnog napona koji vlada na faznom provodniku, odnosno:

$$U_{iz} = U_s - U_m \cos \Theta \quad (6.19)$$

gde su:

U_m – temena fazna vrednost radnog napona,

Θ – slučajni fazni ugao iz opsega $[0, 2\pi]$ koji definiše trenutnu vrednost radnog napona u trenutku pražnjenja.

Najkritičniji trenutak udara je kada su udarni napon na konzoli i trenutna vrednost radnog napona suprotnog polariteta, a radni napon ima maksimalnu vrednost, odnosno:

$$U_{iz_{MAX}} = U_s + U_m \quad (6.20)$$

U izrazu 6.18 može se približno smatrati da je struja kroz stub I_s oko 80 % od ukupne struje u kanalu groma I_g , dok oko 20 % odlazi po zaštitnim užadima na obe strane od pogodjenog stuba.

$$I_s = 0,8 \cdot I_g \quad (6.21)$$

I_g predstavlja struju u dobro uzemljeni objekat koja se dobija na osnovu sistematskog registrovanja parametara atmosferskih pražnjenja.

U slučaju udara groma u vrh stuba bez zaštitnog užeta struja kroz stub je jednaka struji u kanalu groma, odnosno:

$$I_s = I_g \quad (6.22)$$

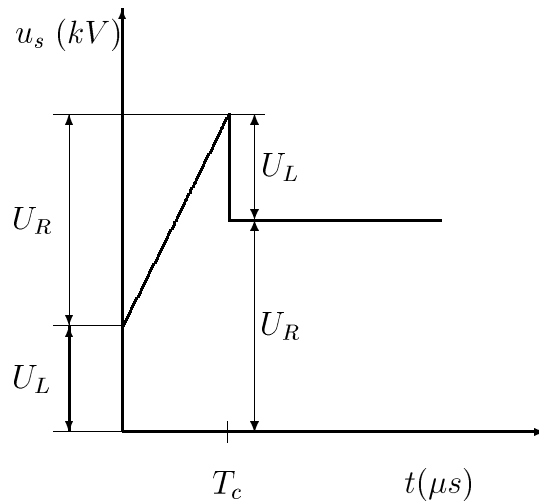
Izraz 6.18 se može koristiti i u ovom slučaju.

Vremenski tok napona na mestu konzole usled strujnog talasa linearno rastućeg čela i konstantnog začelja može se prikazati sledećim analitičkim izrazom:

$$u_s(t) = \begin{cases} \frac{I_s}{T_c} t R_{uz} + l_s h_k \frac{I_s}{T_c} + m_s h_k \frac{I_g}{T_c} & \text{za } t \leq T_c \\ I_s R_{uz} & \text{za } t > T_c \end{cases} \quad (6.23)$$

U vremenskom periodu $t \leq T_c$ za vreme trajanja linearno rastućeg čela talasa, prvi član predstavlja pad napona na uzemljenju stuba, dok drugi i treći član predstavljaju induktivni pad napona na stubu i pad napona na stubu usled elektromagnetske sprege kanala groma i stuba. Može se usvojiti numerička vrednost podužne međusobne induktivnosti kanala groma i stuba u iznosu od $m_s = 0,2 \mu H$ po metru stuba. Posle završetka čela talasa postoji samo konstantan član koji odgovara začelju talasa usled pada napona na uzemljivaču stuba.

Tipičan oblik vremenskog toka napona na konzoli stuba koji je dobijen na bazi modela stuba sa koncentrisanom induktivnošću prikazan je na slici 6.9. Oznake na slici 6.9 imaju



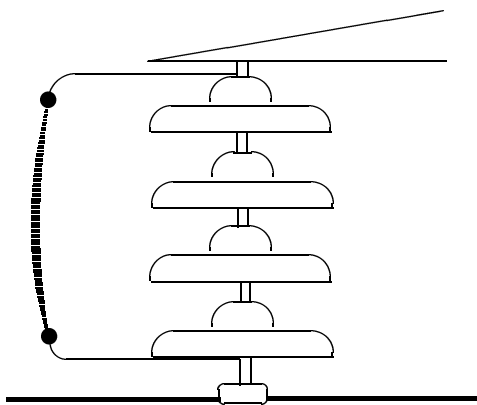
Slika 6.9: Vremenski tok napona na konzoli stuba

sledeće značenje:

U_L –induktivni pad napona na stubu,

U_R –omski pad napona na uzemljivaču.

Ukoliko napon na stubu $u_s(t)$ postane viši od udarnog podnosivog napona izolacije voda, dolazi do preskoka na izolaciji. Električni luk se pojavljuje između metalnih elektroda koje čine zaštitnu armaturu izolatorskog lanca, prema slici 6.10.



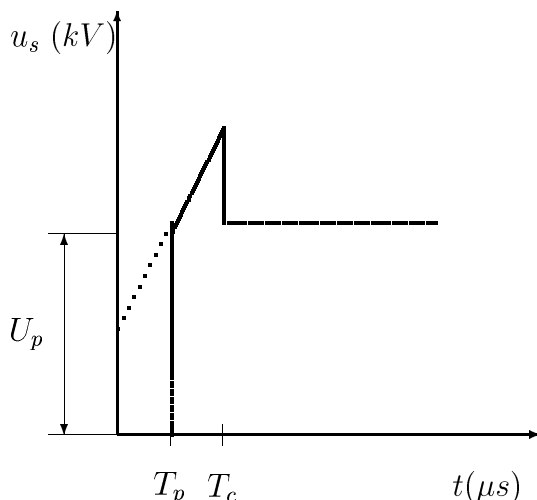
Slika 6.10: Izolatorski lanac sa zaštitnom armaturom u vidu rogova između kojih se pojavio preskok

Zaštitna armatura može da ima oblik rogova, kružnog ili elipsastog prstena ili druge geometrijske figure. Njena uloga je višestruka:

- tačno definiše nivo preskočnog napona,
- omogućava ravnomerniju raspodelu potencijala duž izolatorskog lanca,
- u slučaju preskoka udaljuje električni luk od površine izolatora, sprečavajući na taj način njegovo termičko oštećenje.

Pošto je izolacioni razmak kroz vazduh najkraći između elektroda zaštitne armature, preskok uvek nastupa na armaturi. Posle preskoka na izolaciji prenaponski talas se pojavljuje na faznom provodniku. Ovaj napon gotovo trenutno dobija istu vrednost kao što je napon na konzoli stuba (jer se pad napona na električnom luku može zanemariti), a zatim ovaj talas ima identičnu promenu kao što je promena napona na konzoli. Na slici 6.11 prikazan

je tačkasto talasni oblik napona na konzoli (do trenutka preskoka T_p kada napon između konzole i faznog provodnika postane veći od preskočnog napona U_p) i zajednički napon na konzoli i na faznom provodniku nakon tog trenutka (punom linijom). U trenutku povratnog preskoka



Slika 6.11: Vremenski tok napona na konzoli i faznom provodniku u slučaju povratnog preskoka

preskoka jedan mali deo struje pražnjenja se odvodi po faznom provodniku, pa je zajednički napon na konzoli i na faznom provodniku nešto niži nego kad povratnog preskoka ne bi bilo.

Strmi prenaponski talas nastao povratnim preskokom na stubu u blizini razvodnog postrojenja može da bude opasan za izolaciju opreme u postrojenju. Zato je veoma važno smanjiti otpornost uzemljenja prvih stubova ispred postrojenja. Oprema u postrojenju koja sadrži namotaje kao što su merni transformatori, a posebno energetske transformatori, vrlo je osetljiva na strme prenaponske talase koji naprežu izolaciju između navojaka. Pri povratnim preskocima koji su udaljeni od ulaza u postrojenje dolazi do smanjivanja strmine talasa najviše zbog uticaja korone, a manjim delom usled izobličenja talasa zbog frekvencijski zavisnih parametara voda i povratnog puta kroz zemlju. Zato su pražnjenja koja izazivaju povratne preskoke daleko od postrojenja bezopasna.

Na osnovu proračuna je ustanovljeno da samo udari groma u prva tri stuba, odnosno u zaštitno uže na prva dva raspona ispred postrojenja predstavljaju realnu opasnost za izolaciju energetskog transformatora zaštićenog odvodnikom prenapona za nazivne napone sistema 110 kV i više. Pražnjenja na većim rastojanjima su praktično bezopasna za energetske transformator. Naravno, ovaj zaključak ne važi za drugu opremu, koja je udaljena od odvodnika prenapona koji su postavljeni da štite energetske transformator.

6.4 Indukovani prenaponi

Indukovani prenaponi na faznim provodnicima elektroenergetskog voda su posledica atmosferskih pražnjenja u objekte ili zemlju u blizini voda. Ovaj tip prenapona ugrožava izolaciju vodova srednjeg i niskog napona. Amplituda indukovanih prenapona je uvek znatno niža od podnosivih napona izolacije mreža visokog napona (110 kV i više).

Procena visine i talasnog oblika indukovanih atmosferskih prenapona je znatno složenija od analize prenapona pri direktnim atmosferskim pražnjenjima. Sve teorije koje tumače nastanak indukovanih atmosferskih prenapona na vodovima usled atmosferskih pražnjenja mogu se podeliti u sledeće grupe prema efektu koji se smatra dominantnim:

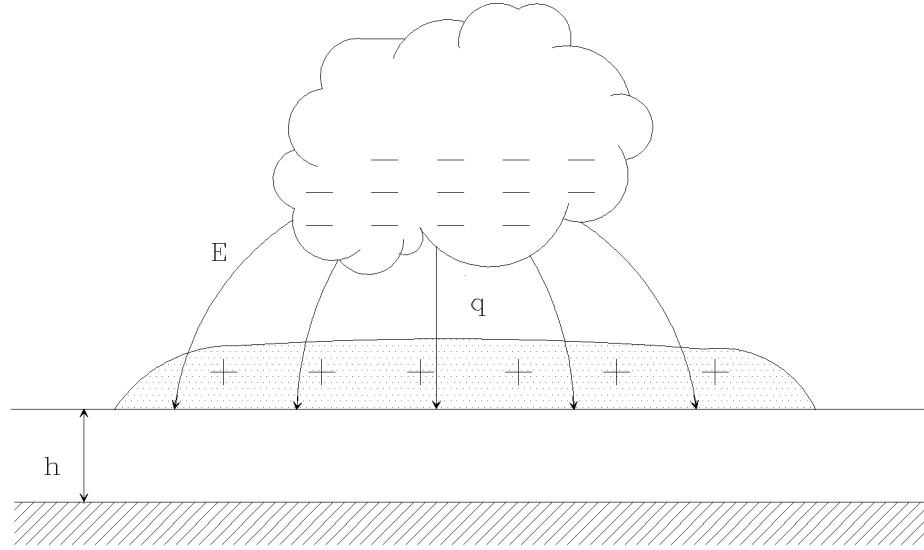
1. Elektrostatički uticaj oblaka
2. Elektrostatički uticaj skokovitog lidera
3. Magnetni uticaj glavnog udara
4. Elektromagnetni uticaj glavnog udara

Na ovom mestu će biti opisane samo teorije elektrostatičkog uticaja oblaka (koja je najstarija) i elektromagnetnog uticaja glavnog pražnjenja koja je najnovija i najkompletnija.

6.4.1 Elektrostatička teorija indukovanih prenapona

U [53] opisana je elektrostatička teorija nastanka indukovanih prenapona, na osnovu koje se mogu veoma jednostavno proceniti vrednosti putujućih prenaponskih talasa na faznim provodnicima nastalih nakon pražnjenja. Na slici 6.12 prikazan je naelektrisani grmljavinski oblak iznad nadzemnog voda visine h .

Usled dejstva električnog polja $\mathbf{E}$ izmedju oblaka i zemlje dolazi do indukovanja električnog naelektrisanja q suprotnog polariteta od naelektrisanja oblaka nad provodnicima voda. Pri tome se pretpostavlja da su fazni provodnici na neki način galvanski vezani za zemlju (preko mernih naponskih transformatora ili energetskih transformatora u postrojenjima na kraju voda ili preko nesavršene izolacije samog voda), što omogućava migraciju naelektrisanja. Na slici 6.12 prikazan je način formiranja indukovanih opterećenja na provodnicima voda usled dejstva oblaka.



Slika 6.12: Indukovano naelektrisanje na provodnicima voda usled elektrostatičkog dejstva oblaka

Posle rasterećenja oblaka usled pražnjenja u zemlju ili između oblaka električna opterećenja nisu više vezana elektrostatičkom indukcijom. Potencijal provodnika na visini h iznad zemlje usled postojanja naelektrisanja dejstvom vektora električnog polja $\mathbf{E}$ iznosi:

$$\varphi = \mathbf{E}h \quad (6.24)$$

Očigledno je da potencijal faznog provodnika u odnosu na zemlju zavisi od jačine električnog polja $\mathbf{E}$ i visine provodnika h iznad zemlje.

Indukovani napon na provodniku voda se može razložiti na dva putujuća talasa koja se prostiru u direktnom i inverznom smeru duž voda. Amplituda oba putujuća talasa je identična i jednaka polovini amplitude indukovanog prenapona φ , odnosno:

$$U_d(v_o t - x) = U_i(v_o t + x) = 0.5 h E \quad (6.25)$$

gde su:

$U_d(v_o t - x)$ –direktni talas koji se prostire ka kraju voda brzinom v_o ,

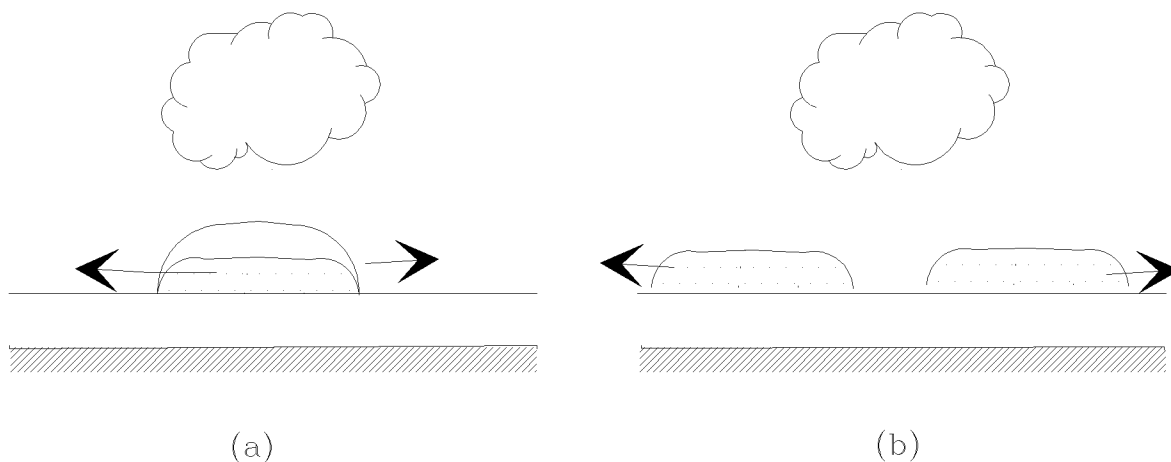
$U_i(v_o t + x)$ –inverzni talas koji se prostire ka početku voda brzinom v_o ,

v_o –brzina svetlosti,

x – posmatrano mesto na vodu,

t -posmatrani vremenski trenutak.

Na slici 6.13 prikazana je raspodela naelektrisanja nakon rasterećenja oblaka u dva različita vremenska trenutka.



Slika 6.13: Prostorna raspodela ukupnog napona i putujućih talasa na vodu u dva različita vremenska trenutka posle rasterećenja oblaka

Ukupni potencijal provodnika u odnosu na zemlju dat je zbirom direktnog i inverznog talasa, kao na slici, odnosno:

$$\varphi(x, t) = U_d(v_o t - x) + U_i(v_o t + x) \quad (6.26)$$

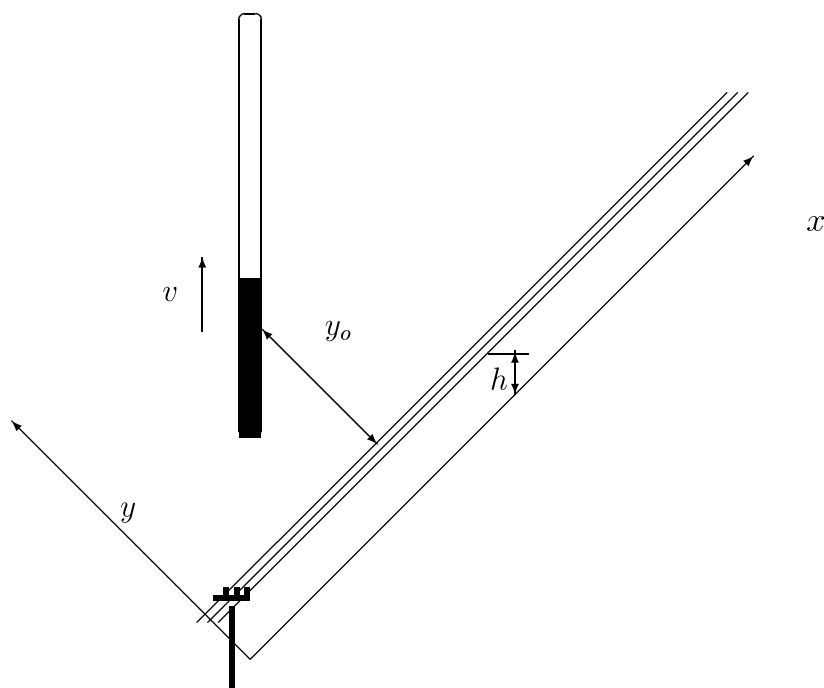
Putujući talasi nastali oslobađanjem indukovanih naelektrisanja se prostiru duž voda, izazivajući naprezanje izolacije, koje može da izazove preskok ako je amplituda talasa veća od podnosivog napon izolacije.

6.4.2 Elektromagnetna teorija indukovanih prenapona

Za procenu amplitude i oblika indukovanih prenapona na osnovu elektromagnetne teorije uticaja glavnog udara uvode se određene pretpostavke prema modelu prikazanom na slici 6.14.

Oznake na slici 6.14 imaju sledeće značenje:

y_o – najkraće rastojanje od mesta udara groma do faznog provodnika,



Slika 6.14: Pojednostavljeni model za proučavanje indukovanih prenapona

h —srednja visina faznog provodnika,

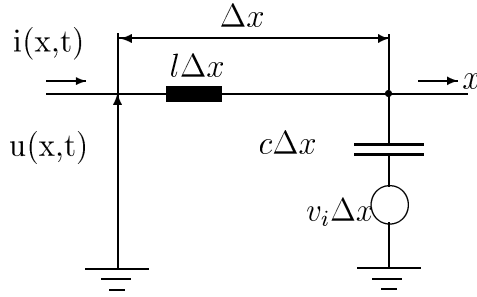
I —amplituda struje glavnog udara,

v —brzina prostiranja naelektrisanja povratnog udara.

Pretpostavke u ovom modelu su sledeće:

- Kanal groma je vertikalalan,
- strujni talas se kreće naviše brzinom v manjom od brzine svetlosti (odnos $\beta = v/v_o < 1$, gde je v_o brzina svetlosti),
- smatra se da je zemlja homogena idealno provodna sredina,
- amplituda struje groma se usvaja da je jednaka dvostrukoj vrednosti amplitude upadnog talasa zbog refleksije od idealno provodne zemlje,
- gubici na vodu se zanemaruju,
- fazni radni napon se zanemaruje u odnosu na indukovane prenapone.

U modelu se pretpostavlja da su sva tri fazna provodnika dovoljno blizu da se na njima indukuju identični prenaponi, pa se svi provodnici zamenjuju jednim na visini h i rastojanju y_o od mesta udara. Vod se može podeliti na elementarne segmente, čija je zamenska šema data na slici 6.15 prema [73].



Slika 6.15: Elementarna deonica voda na kojoj postoji indukujući napon

Na slici 6.15 izvor čija je elektromotorna sila v_i predstavlja indukujući napon na vodu usled dejstva atmosferskog pražnjenja. Prema zamenskoj šemi na slici 6.15 se mogu napisati parcijalne diferencijalne jednačine sa pobudom, sledećeg oblika:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x = l \frac{\partial i}{\partial t} \Delta x \quad (6.27)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = c \frac{\partial (u - v_i)}{\partial t} \Delta x \quad (6.28)$$

gde su:

u –indukovani napon na vodu,

i –indukovana struja,

v_i –indukujući (pobudjujući) napon usled elektromagnetskog dejstva atmosferskog pražnjenja,

l –podužna induktivnost voda,

c –podužna kapacitivnost voda.

U parcijalnim diferencijalnim jednačinama je zanemaren uticaj otpornosti i odvodnosti voda, jer se vod smatra idealnim.

Eliminisanjem struje i iz sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina 6.27 i 6.28 dobija se jedna parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda sledećeg oblika:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 v_i}{\partial t^2} \quad (6.29)$$

Član na desnoj strani predstavlja indukujući napon koji nastaje zbog delovanja atmosferskog pražnjenja u blizinu voda. Ukoliko se pretpostavi da strujni talas atmosferskog pražnjenja ima oblik odskočne funkcije, tada se indukujući napon može izraziti u sledećem obliku:

$$v_i = -\frac{60I_o h}{\beta} \left[\frac{1 - \beta^2}{\sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1 - \beta^2)r^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t - t_o) \quad (6.30)$$

gde su:

I_o –amplituda struje pražnjenja,

h –visina faznog provodnika iznad zemlje,

$\beta = v/v_o$, odnos brzine prostiranja glavnog pražnjenja od zemlje ka oblaku i brzine svetlosti, koji se kreće od 0,1–0,5.

$r = \sqrt{x^2 + y_o^2}$ – udaljenost posmatrane tačke x na vodu od mesta udara,

h_c –srednja visina oblaka,

$t_o = r/v_o$ –trenutak kada se indukovani prenapon prvi put pojavljuje na mestu x na vodu.

Diferencijalna jednačina 6.29 se može rešavati analitički ili numerički.

Analitičko računanje indukovanih prenapona

Analitičko rešavanje diferencijalne jednačine 6.29 prikazano je u [69],[70],[72]. U slučaju odskočne funkcije struje, prema [69] dobija se sledeća vremenska promena napona na mestu x na vodu:

$$u(x, t) = (u_{11} + u_{12} + u_{21} + u_{22})h(t - t_o) \quad (6.31)$$

gde su:

$$u_{11} = \frac{30I_o h(1 - \beta^2)}{\beta^2(v_o t - x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t - x) + \frac{(v_o t - x)x - y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1 - \beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right]$$

$$\begin{aligned}
u_{12} &= -\frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1+k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t - x} \\
u_{21} &= \frac{30I_o h}{\beta^2(v_o t + x)^2 + y_o^2} \left[\beta(v_o t + x) - \frac{(v_o t + x)x + y_o^2}{\sqrt{(v_o t)^2 + \frac{1-\beta^2}{\beta^2}(x^2 + y_o^2)}} \right] \\
u_{22} &= \frac{30I_o h}{\beta} \left(1 - \frac{1}{1+k^2} - \beta^2\right) \frac{1}{v_o t + x} \\
k &= \frac{h_c}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \\
t_o &= \frac{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{v_o} \\
x_o &= \frac{(v_o t - x)^2 - y_o^2}{2(v_o t - x)}
\end{aligned} \tag{6.32}$$

$$\tag{6.33}$$

U slučaju struje proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$ primenjuje se konvolucioni integral u sledećem obliku:

$$u_1(x, t) = i(0)u_o(x, t) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} i(t - \tau) u_o(\tau) d\tau \tag{6.34}$$

gde su:

$u_o(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovano prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom pravougaonog čela,

$u_1(x, t)$ —odziv voda na mestu x usled indukovano prenapona nastalog atmsosferskim pražnjenjem sa strujom proizvoljnog talasnog oblika $i(t)$.

Konvolucioni integral se može analitički rešiti za slučaj talasa linearno rastućeg čela. Posle izvršenog integraljenja dobija se sledeći analitički izraz za indukovani napon na vodu prema [72]:

$$u_1(x, t) = -\frac{30ah}{\beta v_o} \left[(1 - \beta^2)(s_{11} + s_{12} + s_{21} + s_{22}) + s_{13} + s_{23} \right] h(t - t_o) \tag{6.35}$$

gde su:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= \ln(z_{11} + \sqrt{1 + z_{11}^2}) \\
z_{11}(x) &= \frac{x + \beta^2(v_o t - x)}{\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
s_{12} &= \ln(z_{12} + \sqrt{1 + z_{12}^2}) \\
z_{12}(x) &= -\frac{y_o^2 + (2\beta^2 - 1)(v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{(1 - \beta^2)[y_o^2 + \beta^2(v_o t - x)^2]}} \\
s_{13} &= \ln(z_{13} + \sqrt{1 + z_{13}^2}) \\
z_{13}(x) &= \frac{y_o^2 - (v_o t - x)^2}{2(v_o t - x)\sqrt{y_o^2 + h_c^2}} \\
s_{21} &= \ln(z_{21} + \sqrt{1 + z_{21}^2}) \\
z_{21}(x) &= z_{11}(-x) \\
s_{22} &= \ln(z_{22} + \sqrt{1 + z_{22}^2}) \\
z_{22}(x) &= z_{12}(-x) \\
s_{23} &= \ln(z_{23} + \sqrt{1 + z_{23}^2}) \\
z_{23}(x) &= z_{13}(-x) \\
t_o &= \frac{\sqrt{x^2 + y_o^2}}{v_o}
\end{aligned} \tag{6.36}$$

(6.37)

Oznake imaju sledeće značenje:

t_o – trenutak kada talas stiže u posmatranu tačku x voda,

a – strmina čela strujnog talasa u $kV/\mu s$.

Primenom izraza 6.36 može se odrediti talasni oblik indukovano napona u proizvoljnoj tački x neograničeno dugog voda koji je na rastojanju y_o od mesta udara. Članovi s_{11} , s_{12} i s_{13} u kojima figuriše argument $(v_o t - x)$ predstavljaju komponente indukovano napona koji se prostire u pravcu porasta x -koordinate. Članovi s_{21} , s_{22} i s_{23} u kojima figuriše argument $(v_o t + x)$ predstavljaju komponente indukovano napona koji se prostire u pravcu smanjivanja x -koordinate.

Ova metoda se može primenjivati za talasne oblike struja atmosferskih pražnjenja proizvoljnog oblika. U tom slučaju se primenjuje princip superpozicije na više talasa različitih strmina čela, koji se pojavljuju u različitim trenucima.

Numeričko računanje indukovanih napona na vodu

Parcijalne diferencijalne jednačine 6.27 i 6.28 se mogu rešavati numeričkim putem, podelom voda na elementarne deonice čija je zamenska šema data na slici 6.15.

Ako se u izraze 6.27 i 6.28 zameni da je brzina prostiranja:

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} \text{ i } Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

tada se parcijalne diferencijalne jednačine mogu transformisati u sledeći oblik:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} Z \frac{\partial i}{\partial t} \quad (6.38)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o Z} \left[\frac{\partial(u - v_i)}{\partial t} \right] \quad (6.39)$$

Ako se napon i struja u tački x na vodu izraze preko direktnih, odnosno inverznih talasa:

$$u = u_d + u_i$$

$$i = \frac{u_d}{Z} - \frac{u_i}{Z}$$

tada se izrazi 6.38 i 6.39 mogu napisati u sledećoj formi:

$$\frac{\partial u_d}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t}$$

$$\frac{\partial u_d}{\partial x} - \frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} - \frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t}$$

Gornji sistem jednačina se može rešiti sabiranjem, odnosno oduzimanjem, nakon čega se dobija:

$$-\frac{\partial u_d}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_d}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (6.40)$$

$$-\frac{\partial u_i}{\partial x} = -\frac{1}{v_o} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{2v_o} \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (6.41)$$

Analitičko rešenje parcijalnih diferencijalnih jednačina 6.40 i 6.41 predstavljaju dva putujuća talasa koji se prostiru duž voda u suprotnim smerovima. Vrednost napona pojedinih talasa se može izračunati metodom konačnih razlika, ako se izaberu ekvidistantne tačke po vremenskoj i prostornoj koordinati:

$$x_j = x_o + j\Delta x \text{ za } j = 1, 2, \dots, J$$

$$t_k = t_o + k\Delta t \text{ za } k = 1, 2, \dots, K \quad (6.42)$$

gde je J ukupan broj tačaka na vodu, a K broj vremenskih trenutaka u kojima se naponi računaju.

Parcijalni izvodi direktnog naponskog talasa u_d mogu se približno izraziti preko konačnih razlika:

$$\frac{\partial u_d}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} \quad (6.43)$$

$$\frac{\partial u_d}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \quad (6.44)$$

Na isti način se izražavaju i parcijalni izvodi inverznog naponskog talasa u_i , vodeći računa jedino o suprotnom smeru prostiranja. Zbog toga koordinata $j+1$ predstavlja tačku iz prethodnog koraka proračuna.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x}(j, k-1) = \frac{u_i(j+1, k-1) - u_i(j, k-1)}{\Delta x} \quad (6.45)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}(j, k-1) = \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \quad (6.46)$$

U prethodnim izrazima je usvojen sledeći skraćeni način obeležavanja napona u funkciji vremenske, odnosno prostorne koordinate:

$$u_d(x_j, t_k) = u_d(j, k)$$

$$u_i(x_j, t_k) = u_i(j, k)$$

Ovakav način obeležavanja je pogodan za direktnu primenu pri numeričkom modelovanju pojava.

Posle zamene parcijalnih izvoda predstavljenih preko konačnih razlika u parcijalne diferencijalne jednačine 6.40 i 6.41, dobija se sledeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{u_d(j, k-1) - u_d(j-1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_d(j, k) - u_d(j, k-1)}{\Delta t} \\ &+ \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ \frac{u_i(j, k-1) - u_i(j+1, k-1)}{\Delta x} &= -\frac{1}{v_o} \frac{u_i(j, k) - u_i(j, k-1)}{\Delta t} \\ &+ \frac{1}{2v_o} \frac{v_i(j, k) - v_i(j, k-1)}{\Delta t} \end{aligned}$$

Ako se usvoji da prostorni korak Δx odgovara vremenskom koraku Δt , odnosno da za jedan vremenski korak talas predje jedan prostorni korak $\Delta x = \pm v_o \Delta t$ u direktnom, odnosno inverznom smeru, tada se gornji sistem jednačina može napisati u jednostavnijoj formi:

$$u_d(j, k) = u_d(j-1, k-1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k-1)] \quad (6.47)$$

$$u_i(j, k) = u_i(j+1, k-1) + \frac{1}{2} [v_i(j, k) - v_i(j, k-1)] \quad (6.48)$$

U slučaju struje groma linearno rastućeg čela i linearno opadajućeg začelja se indukujući napon u funkciji vremena $V_i(t)$ može izračunati kao zbir dve komponente:

$$V_i = V_{i1} + V_{i2} \quad (6.49)$$

gde su:

- V_{i1} –komponenta usled dejstva čela talasa,
- V_{i2} –komponenta usled dejstva začelja talasa.

$$\begin{aligned} V_{i1} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_1 \left[\frac{1-\beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t)}{f(t_o)} - \frac{t-t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t-t_o) \\ V_{i2} &= -\frac{60h_v}{\beta} s_2 \left[\frac{1-\beta^2}{\beta v_o} \ln \frac{f(t-T_f)}{f(t_o)} - \frac{t-T_f-t_o}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] h(t-T_f-t_o) \end{aligned} \quad (6.50)$$

Oznake u izrazu 6.50 imaju sledeće značenje:

$$f(t) = \beta v_o t + \sqrt{(\beta v_o t)^2 + (1-\beta^2)r^2}$$

$s_1 = I_{max}/T_c$ – strmina čela struje,

$s_2 = I_{max}/(2T_z - T_c)$ – strmina začelja struje,

$r = \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}$ – udaljenost tačke na vodu date koordinatama (x, y) od udara groma sa koordinatama (x_o, y_o) ,

$\beta = v/v_o$ – odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti,

I_{max} – temena vrednost struje goma,

T_c – vreme čela talasa,

T_z – vreme začelja talasa,

h_c – visina oblaka,

h_v – visina provodnika voda.

Na početku i kraju voda treba definisati granične uslove. Granični uslovi na početku i kraju voda se definišu relacijom prelamanja talasa po diskretnoj metodi. Talasi indukovani napona $U_d(j, k)$ i $U_i(j, k)$ koji se kreću ka početku, odnosno kraju voda tretiraju se kao upadni talasi za te tačke. Ukoliko su u graničnim tačkama vezani vodovi po kojima se ne vrši indukovanje prenapona, ili se nalaze drugi elementi koji se modeluju ekvivalentnim vodovima, tada se u graničnim tačkama vrši proračun napona uvažavajući indukovane talase kao upadne, kao i sve ostale talase koji dolaze u te granične tačke. Na taj način se može primeniti jedinstveni postupak za modelovanje indukovanih prenapona i procesa prostiranja talasa u složenoj mreži. Korak proračuna se i u ovom slučaju bira da bude manji ili jednak vremenu prostiranja po najkraćem vodu u sistemu.

Na slici 6.16 prikazan je talasni oblik napona na vodu čiji su provodnici visine 20 m iznad ravne površine tla. Udar groma se dogodio u zemlju na rastojanju 100 m od voda. Odnos brzine povratnog udara i brzine svetlosti je $\beta = 0,3$. Vod je tretiran kao beskonačno dugačak, a napon je računat u tački koja je na mestu najbliže tački udara (tačka 1), 200 m desno od te tačke (tačka 2) i 400 m desno od te tačke (tačka 3).

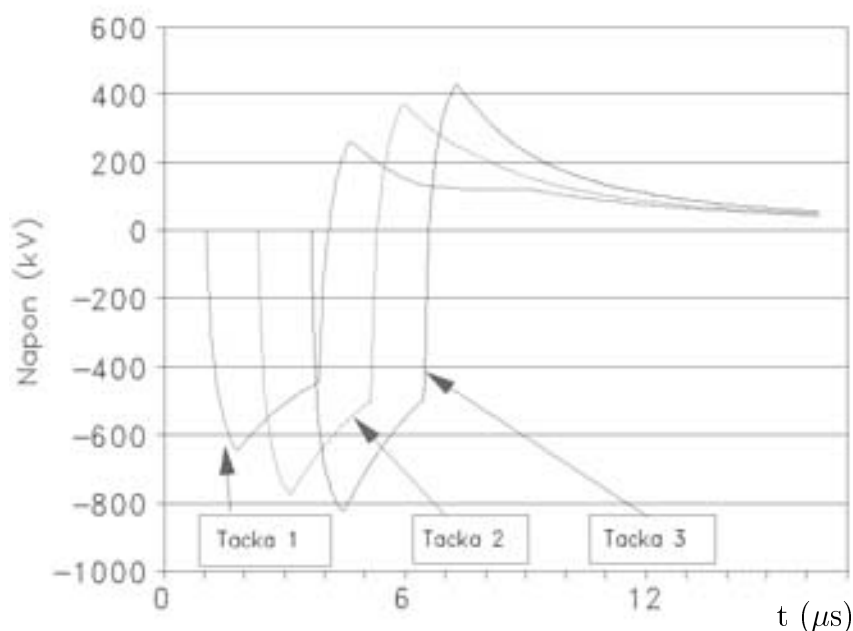
Može se uočiti da je indukovani talas napona bipolarnog karaktera, (u početnom periodu je negativan, a kasnije pozitivan), i da ima tendenciju porasta amplitude sa udaljavanjem od mesta udara. To je posledica superpozicije indukovanih talasa na mestu koje je bliže mestu udara koji se prostire po vodu, na koji se nadgrađuju talasi koji se indukuju u tačkama koje su dalje od mesta udara.

6.4.3 Procena visine indukovanih prenapona

Numerički proračuni daju talasni oblik prenapona, na osnovu koga se može detaljno sagledati ugroženost izolacije, vodeći računa o njenoj volt-sekundnoj karakteristici, prisustvu odvodnika prenapona, uticaja kapacitivnosti pojedine opreme itd. Medjutim, za grubu procenu maksimalne vrednosti indukovanih prenapona se može koristiti jednostavan empirijski izraz [56]:

$$U_{Max} = k \frac{I_m h}{y_o} \quad (6.51)$$

gde su:



Slika 6.16: Talasni oblik indukovanih napona računat u tački 1 koja je najbliža mestu udara, tački 2 koja je 200 m udaljena i tački 3 koja je 400 m udaljena od mesta najbližeg tački udara

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

h —visina faznog provodnika (m),

y_o —udaljenost mesta udara groma od voda (m),

I_m —amplituda struje pražnjenja.

Gornji izraz može da posluži za grubu procenu prenapona, ali se može koristiti i za procenu godišnjeg broja ispada usled indukovanih prenapona, o čemu će kasnije biti više reči.

6.4.4 Procena uticaja zaštinog užeta

Eksperimentalno je utvrđeno da zaštino uže ima povoljan uticaj smanjujući indukovane prenapone na faznim provodnicima. Ovaj uticaj se obuhvata kroz empirijski koeficijent sprege izmedju faznog provodnika i uzemljenog provodnika. On ima vrednost 0.3 do 0.4 za sred-njenaponske mreže i 0,6-0.9 za niskonaponske mreže sa uzemljenim neutralnim provodnikom

na svakom stubu. Indukovan prenapon se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$U_{ind} = U_{ind_o}(1 - k_s) \quad (6.52)$$

gde je:

U_{ind} – indukovan prenapon na faznom provodniku kada se uvažava uticaj sprege,

U_{ind_o} – indukovan prenapon na faznom provodniku kada se ne uvažava uticaj sprege,

k_s – koeficijent sprege.

Kada su bliski fazni provodnik i uzemljeni provodnik, kao što je to slučaj kod niskonaponskih vodova sa uzemljenim neutralnim provodnikom na svakom stubu, indukovana struja u neutralnom provodniku gotovo potpuno poništava uticaj fluksa koji indukuje elektromotornu silu na faznom provodniku, pa se zato indukovani prenapon redukuje na veoma nisku vrednost.

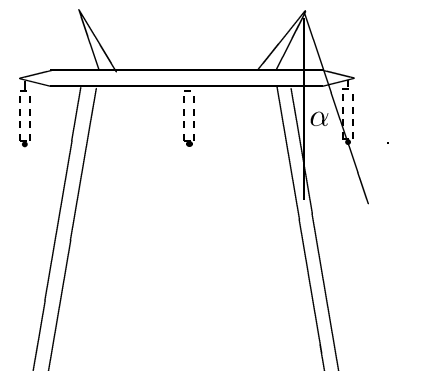
6.5 Atmosferska pražnjenja mimo zaštitnog užeta

Zaštitno (gromobransko, zemljovodno) uže se postavlja iznad faznih provodnika dalekovoda zbog zaštite od direktnih atmosferskih pražnjenja u fazne provodnike. Položaj zaštitnog užeta je od velike važnosti za stepen zaštite od atmosferskih pražnjenja. Danas se u tehničkim preporukama kao kriterijum za zaštitu faznih provodnika od atmosferskih pražnjenja koristi zaštitni ugao. Na slici 6.17 definisan je zaštitni ugao za vod sa horizontalnim rasporedom provodnika i dva zaštitna užeta. To je ugao koji zaklapa vertikalna linija koja prolazi kroz centar zaštitnog užeta i linija koja spaja centre faznog provodnika i zaštitnog užeta. Na identičan način se definiše zaštitni ugao za druge geometrije voda. Zaštitni ugao obeležen je sa α . Klasični kriterijum za procenu efikasnosti zaštite pomoću zaštitnog užeta je da zaštitni ugao treba da bude manji ili jednak od propisanog ugla, koji je prema trenutno važećim preporukama za našu zemlju $\alpha = 30^\circ$ bez obzira na nazivni napon voda.

Zaštitno uže ne pruža apsolutnu zaštitu od prodora groma mimo njega i pražnjenja u fazni provodnik. Verovatnoća prodora groma mimo zaštitnog užeta se može proceniti primenom formule Burgsdorfa [80], u sledećem obliku:

$$\log P = \frac{\alpha\sqrt{h}}{A} - B \quad (6.53)$$

gde su:



Slika 6.17: Definicija zaštitnog ugla u slučaju voda sa horizontalnim rasporedom provodnika.

P –verovatnoća prodora groma mimo zaštitnog užeta,

h –efektivna visina zaštitnog užeta iznad zemlje,

α –zaštitni ugao,

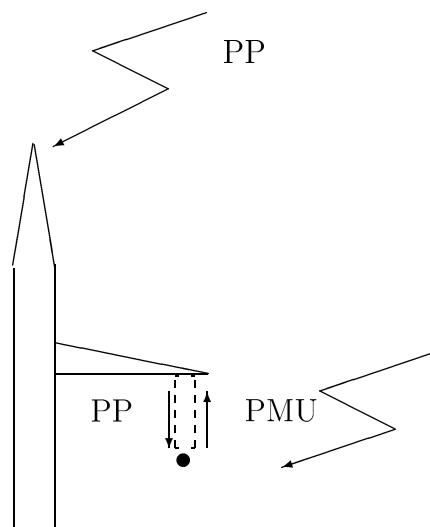
A –empirijska konstanta koja se usvaja da je 90,

B –empirijska konstanta koja se usvaja da je 4.

Gornji izraz daje verovatnoću prodora groma mimo užeta, s tim što posmatrani udar groma ne mora uvek izazvati preskok na izolaciji.

Na slici 6.18 objašnjeni su mogući putevi preskoka koji ugrožavaju izolaciju voda. Do udara groma može doći u vrh stuba ili u zaštitno uže, što zbog povećanja potencijala stuba može dovesti do povratnog preskoka. U slučaju povratnog preskoka pražnjenje se odvija sa stuba ka faznom provodniku, što je na slici obeleženo skraćenicom **PP**. Naprotiv, prodor groma mimo zaštitnog užeta, na slici označen sa **PMU** dovodi do porasta potencijala faznog provodnika, što može da izazove pražnjenje od faznog provodnika prema stubu.

Sredinom šezdesetih godina u SAD je utvrđen znatno veći broj ispada dalekovoda usled atmosferskih pražnjenja nego što se očekivalo na osnovu izvršenih računskih procena. Zbog toga se pristupilo intenzivnim istraživanjima, sa ugradnjom registratora na stubovima koji utvrđuju da li je do atmosferskog pražnjenja došlo u zaštitno uže ili u fazni provodnik (tzv "pathfinder"). Istraživanja su rezultirala novim grafo-analitičkim postupkom za procenu ugroženosti nadzemnih vodova usled pražnjenja mimo zaštitnog užeta [81, 82, 83] koji će biti objašnjen u narednom poglavlju.



Slika 6.18: Mogući načini preskoka na stubu sa zaštitnim užetom; PP-povratni preskok, PMU-pražnjenje mimo užeta

6.5.1 Elektrogeometrijski model

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 predje 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 takodje zavisi od količine naelektrisanja u kanalu skokovitog lidera. U [81] je predložen sledeći izraz koji daje vezu izmedju napona glave skokovitog lidera neposredno pred zadnji skok $V_l(MV)$ i amplitude struje glavnog pražnjenja u idealno uzemljen objekat $I_o(kA)$:

$$V_l = 3,7 \cdot I_o^{2/3} \quad (6.54)$$

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja izolacionih razmaka sklopnim naponima, za koje se smatra da su po obliku slični naponima izmedju glave skokovitog lidera i zemlje pre posled-

njeg skoka, došlo se u [81] do izraza:

$$R_u = 1,4 \cdot V_l^{1,2} \quad (6.55)$$

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

$$R_u = k \cdot I_o^n \quad (6.56)$$

gde su k i n empirijske konstante koje prema [81] 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 [82] 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. Generalni izraz za udarno rastojanje za istaknute objekte (stubove, gromobranske štapove, tornjeve), ima sledeći oblik:

$$R_u = I_o^{0,64} \cdot H^{(0,66+2 \cdot I_o \cdot 10^{-4})} \quad (6.57)$$

gde su:

H —visina objekta,

I_o —očekivana struja groma u dobro uzemljeni objekat.

Izraz 6.57 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 [82], može se koristiti pojednostavljeni izraz:

$$R_u = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (6.58)$$

Izraz 6.58 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 [83] 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:

$$R_u = 0,67 \cdot H^{0,6} \cdot I_o^{0,74} \quad (6.59)$$

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 se uzima veća vrednost za koeficijent k . U slučaju

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 izmedju 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 nadje 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 6.19 se može zaključiti da sa povećanjem amplitude struje pražnjenja izložena površina označena šrafranim 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 se izračunavaju prema tablici 6.2. Oznake u tablici 6.2 imaju sledeće značenje:

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	$H = H_{max} - 2/3f_u + 2/3f_z$	$Y = Y_{max} - 2/3f_p + 2/3f_z$

Tabela 6.2: Efektivne visine zaštitnog užeta i faznog provodnika u zavisnosti od reljefa terena

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

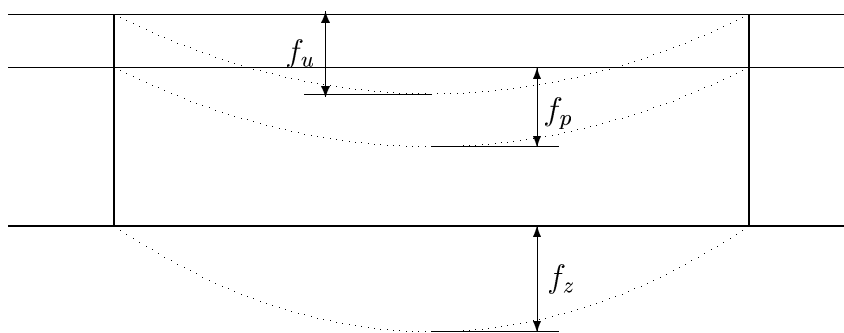
Y_{max} —maksimalna visina faznog provodnika na mestu vešanja na stubu,

f_u —ugib zaštitnog užeta,

f_p —ugib faznog provodnika,

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

Na slici 6.20 objašnjen je pojam ekvivalentnog ugiba zemlje. U slučaju ravničarskog



Slika 6.20: 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.

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

Napon na faznom provodniku usled direktnog udara groma u fazni provodnik prema 6.6 ima vrednost:

$$U_f = Z_c I_f = Z_c \frac{I_m}{4} \quad (6.61)$$

Ova vrednost napona treba da bude veća 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.

$$I_{gran} = \frac{4 \cdot U_{pod}}{Z_c} \quad (6.62)$$

Za izračunatu graničnu struju pražnjenja se određuje granično udarno rastojanje:

$$R_{gran} = k I_{gran}^n \quad (6.63)$$

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 da li luk AB koji definiše izloženu površinu faznog provodnika uopšte postoji.

6.5.2 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 vertikalni obeležen uglom ψ . Ako je poznata godišnja gustina pražnjenja u horizontalnu površinu

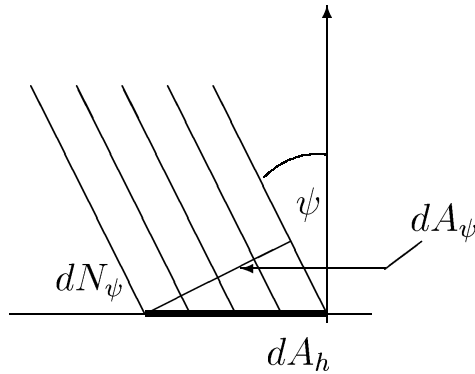
zemlje N_g , tada je broj pražnjenja dN_ψ u elementarnu površinu dA_ψ koja je pod uglom ψ nagnuta u odnosu na horizontalnu ravan zemlje, prema slici 6.21:

$$dN_\psi = \frac{N_g dA_\psi}{\cos \psi} \quad (6.64)$$

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 6.21: 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 [81, 82] se preporučuje zakon raspodele u obliku trigonometrijske funkcije sledećeg oblika:

$$g(\psi) = K_m \cos^m(\psi) \quad (6.65)$$

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

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} K_m \cos^m(\psi) d\psi = 1 \quad (6.66)$$

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

$$-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (6.67)$$

Na taj način se dobija konstanta K_m :

$$K_m = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos^m(\psi) d\psi} \quad (6.68)$$

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

$$P_{\psi_1}^{\psi_2} = \int_{\psi_1}^{\psi_2} K_m \cos^m(\psi) d\psi \quad (6.69)$$

Autori u [81, 82] 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 6.3 date su celobrojne vrednosti za koeficijent m i odgovarajuće konstante K_m koje su od praktičnog interesa.

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 6.3: Vrednosti parametara raspodele upadnih uglova lidera

U tablici 6.3 oznaka $\delta(\psi)$ ima sledeće značenje:

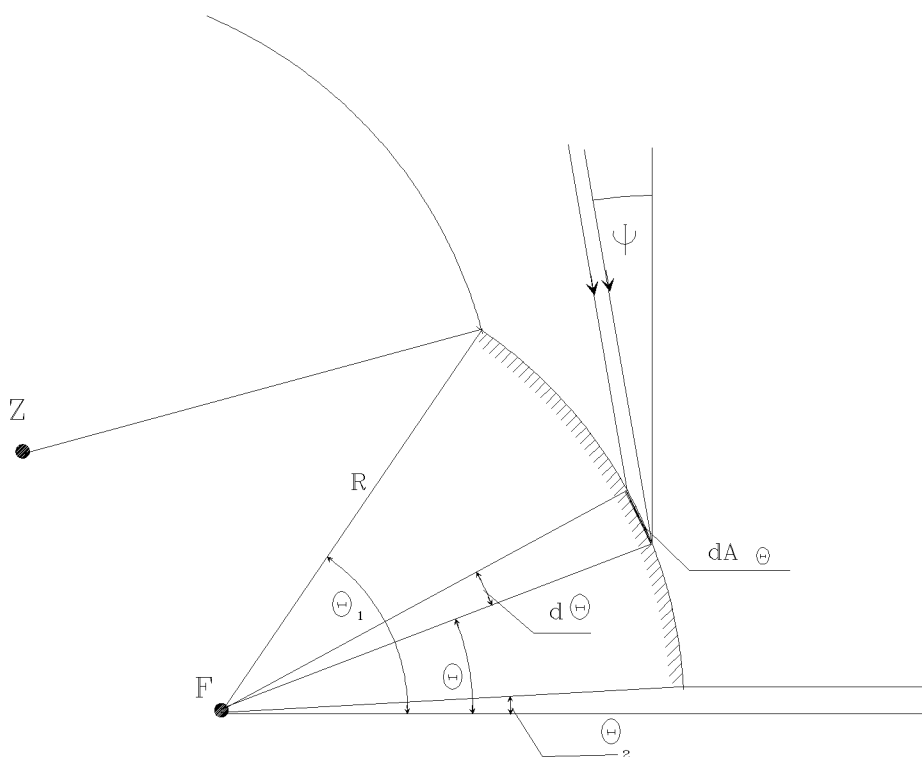
$$\delta(\psi) = \begin{cases} \infty & \text{ako je } \psi = 0 \\ 0 & \text{ako je } \psi \neq 0 \end{cases} \quad (6.70)$$

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 6.22 prikazana je izložena površina jednog faznog provodnika definisana uglovima Θ_1 i Θ_2 prema horizontali i udarnim rastojanjem R . Na slici 6.23 prikazana je uvećana



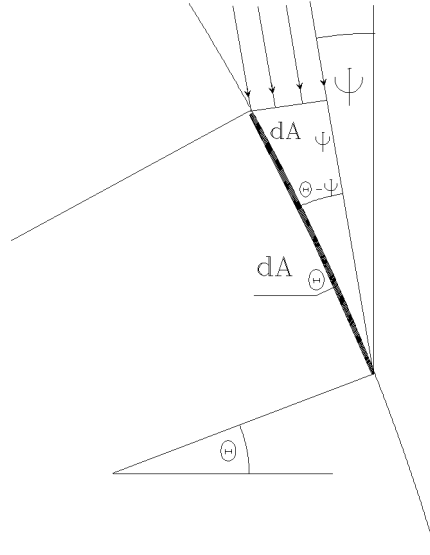
Slika 6.22: Uvažavanje upadnog ugla lidera u poslednjem skoku

elementarna izložena površina dA_Θ definisana uglom $d\Theta$. Oznake na slikama 6.22 i 6.23 imaju sledeće značenje:

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,



Slika 6.23: Uvećan detalj elementarne izložene površine

ψ —upadni ugao lidera u odnosu na vertikalu.

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

$$dA_{\Theta} = R d\Theta \quad (6.71)$$

Elementarna podužna izložena površina koja je normalna na pravac nailaska skokovitog lidera obeležena je sa dA_{ψ} :

$$dA_{\psi} = dA_{\Theta} \sin(\Theta - \psi) \quad (6.72)$$

Godišnji broj pražnjenja u elementarnu površinu dA_{ψ} u funkciji godišnje gustine pražnjenja N_g je:

$$dN_{\psi} = N_g \frac{dA_{\psi}}{\cos \psi} \quad (6.73)$$

Posle zamene 6.72 i 6.71 u 6.73 se dobija:

$$dN_{\psi} = N_g \frac{R \sin(\Theta - \psi) d\Theta}{\cos \psi} \quad (6.74)$$

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

$$P(\psi) = g(\psi) d\psi \quad (6.75)$$

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

$$dN = N_g \left\{ \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi \right\} R d\Theta \quad (6.76)$$

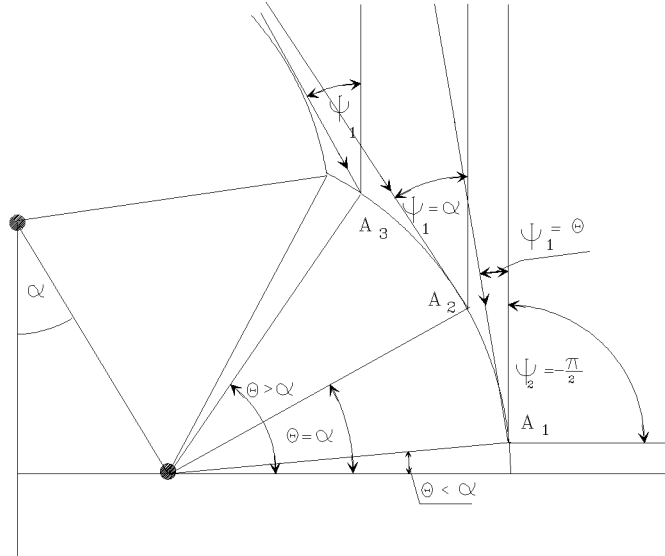
Ukupan broj pražnjenja za celu izloženu površinu se dobija integraljenjem od graničnih uglova Θ_2 do Θ_1 , odnosno:

$$N = N_g R \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi d\Theta \quad (6.77)$$

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

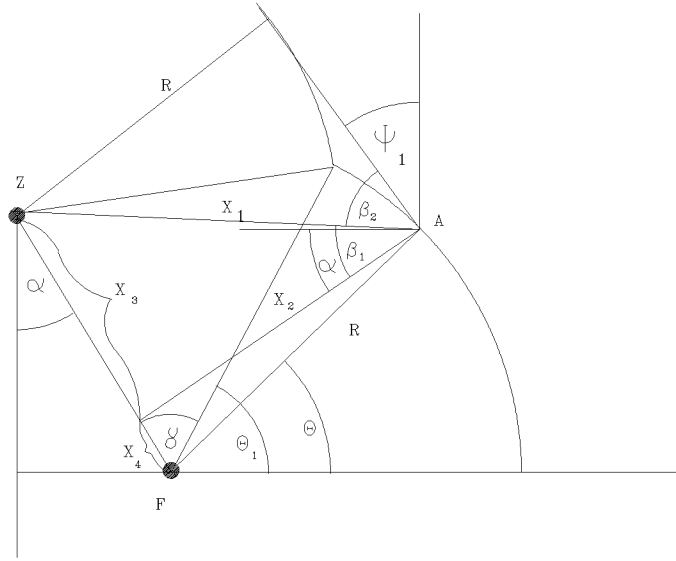
Na slici 6.24 prikazana su ova dva slučaja upadnih uglova, kao i granični slučaj kada je posmatrani centralni ugao Θ jednak zaštitnom uglu α . Kada je $\Theta < \alpha$, lider se približava



Slika 6.24: Dva različita upadna ugla lidera i graničan slučaj

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 odredjuje granični ugao ψ_2 na osnovu slike 6.25. Sa slike se može videti da postoji sledeći odnos uglova:

Slika 6.25: Odredjivanje graničnog ugla π_2 kada je $\Theta > \alpha$

$$\psi_1 + \beta_1 + \beta_2 - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (6.78)$$

odakle se dobija:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_1 - \beta_2 \quad (6.79)$$

gde su:

$$\beta_1 = \arctan \frac{X_3}{X_2} \quad (6.80)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{R}{\sqrt{X_1^2 - R^2}} \quad (6.81)$$

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

$$X_1 = \sqrt{C^2 + R^2 - 2 R C \cos \gamma} \quad (6.82)$$

gde se ugao γ odredjuje iz relacije:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \Theta + \alpha \quad (6.83)$$

Duž X_2 se odredjuje na sledeći način:

$$X_2 = R \cos \gamma \quad (6.84)$$

Duž X_3 se odredjuje na sledeći način:

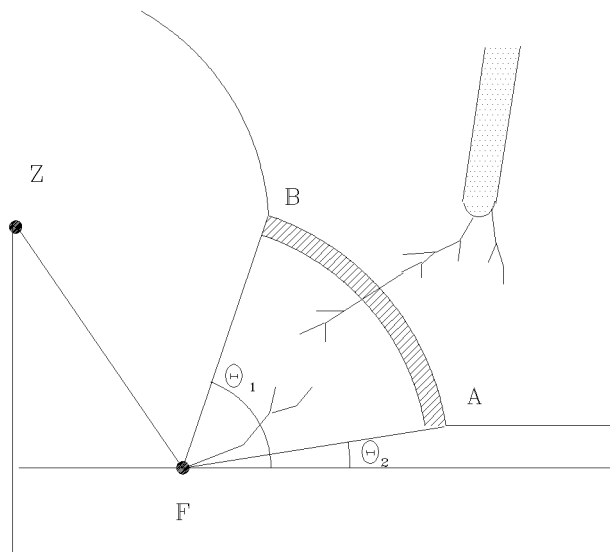
$$X_3 = C - R \cos \gamma \quad (6.85)$$

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.

b) Hipoteza o usmeravanju lidera pre poslednjeg skoka

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

Na slici 6.26 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. U



Slika 6.26: Hipoteza o usmeravanju lidera pred izloženom površinom

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:

$$N = N_g R \int_{\Theta_2}^{\Theta_1} d\Theta = N_g R (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (6.86)$$

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.

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

Verovatnoća prodora groma mimo užeta

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.

$$P = \frac{N_u}{N_{bu}} \quad (6.87)$$

gde su:

N_u —broj pražnjenja u fazni provodnik zaštićen užetom,

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

Na slici 6.27 prikazan je cilindrični 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:

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (6.88)$$

gde su:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c}{2R_{u1}}\right) \quad (6.89)$$

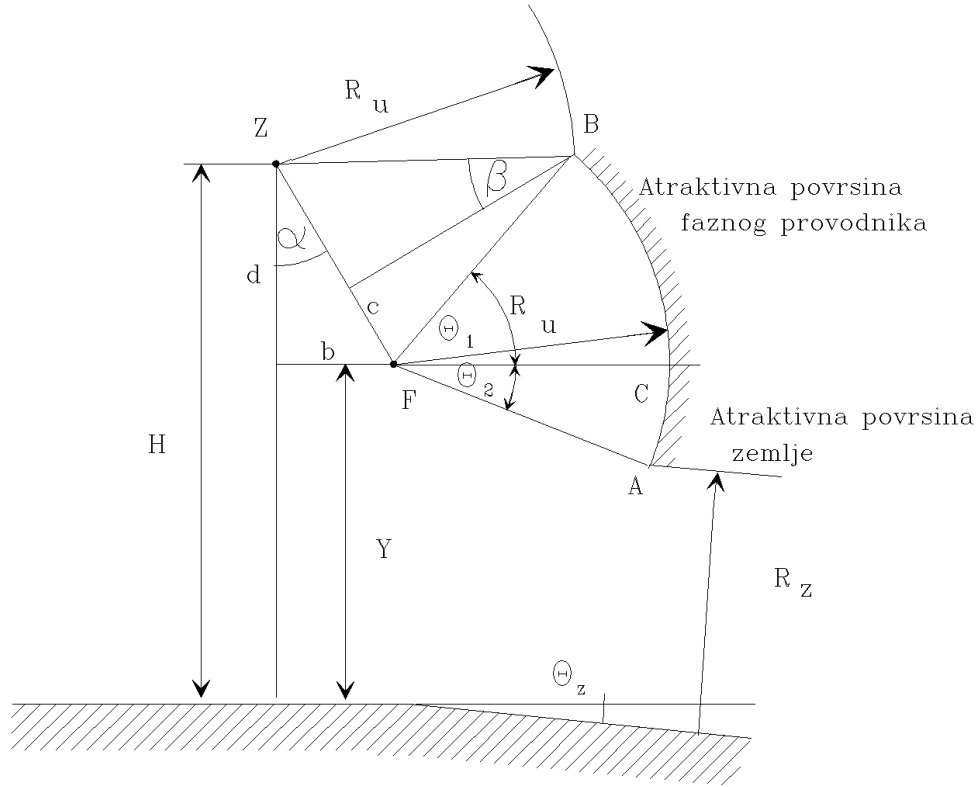
$$\theta_2 = \arcsin\left[\frac{Y \cos(\theta_z) - R_z}{R_u}\right] + \theta_z \quad (6.90)$$

α –zaštitni ugao.

Može se uočiti da uglovi θ_1 i θ_2 zavise od geometrije stuba, ali zavise i od udarnog rastojanja R_u i 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:

$$\widehat{AB} = (\theta_1 + \theta_2) \cdot R_u \text{ za } \theta_2 < 0 \quad (6.91)$$

Gornji izraz važi kada je izložena površina zemlje iznad visine faznog provodnika Y . Ako je ugao θ_2 pozitivan, što znači da izložena površina zemlje seče u tački A izloženu površinu



Slika 6.27: Odredjivanje izložene površine faznog provodnika

faznog provodnika na visini manjoj od visine vešanja użeta, tada se ne uzima uopšte mogućnost razvoja uzlaznog poveznog lidera, pa se površina AC ne smatra izloženom. U ovom slučaju, koji upravo odgovara 6.27, cilindrični presek izložene površine faznog provodnika je:

$$\widehat{BC} = \theta_1 \cdot R_u \text{ za } \theta_2 \leq 0 \quad (6.92)$$

Stepen izloženosti faznog provodnika atmosferskim pražnjenjima određene amplitude struje određuje se iz sledećeg izraza:

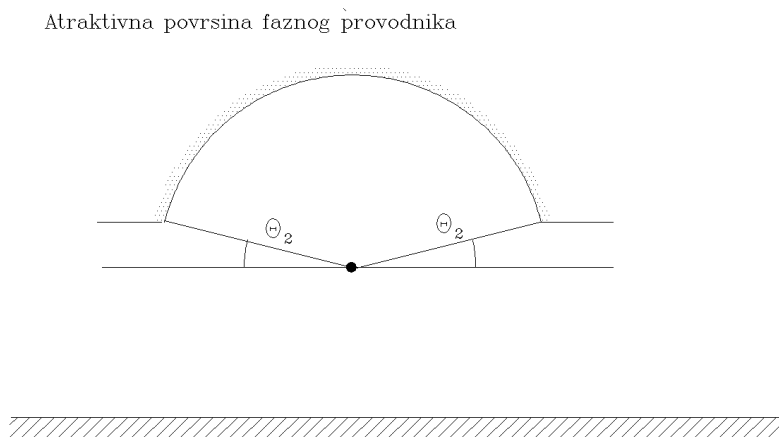
$$x = \frac{\theta_1 + \theta_2}{(\pi + 2\theta_2)} \text{ za } \theta_2 \leq 0 \quad (6.93)$$

odnosno

$$x = \frac{\theta_1}{\pi} \text{ za } \theta_2 > 0 \quad (6.94)$$

Stepen izloženosti faznog provodnika predstavlja odnos izložene površine faznog provodnika u prisustvu zaštitnog użeta i izložene površine faznog provodnika bez zaštitnog użeta.

Na slici 6.28 prikazana je izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta. U posmatranom modelu su uzete sledeće aproksimacije:



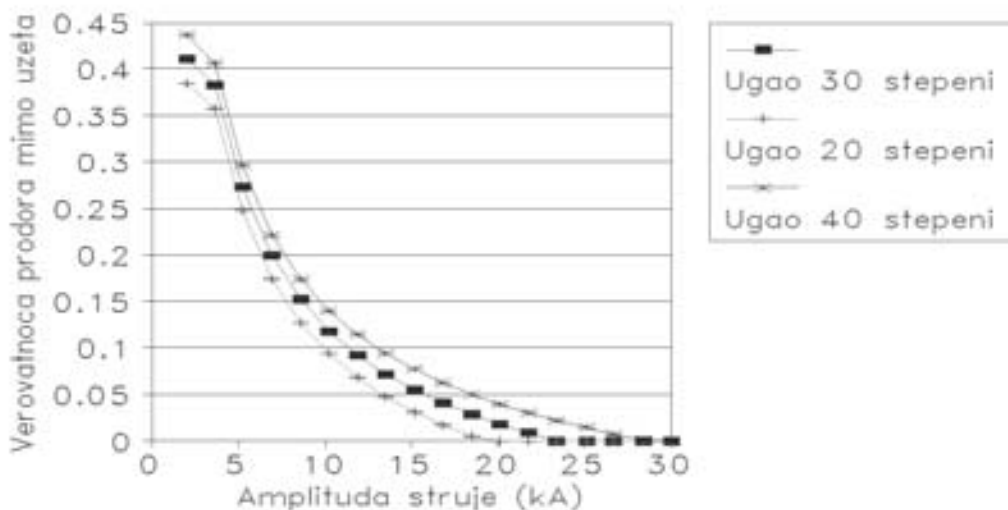
Slika 6.28: Izložena površina faznog provodnika bez prisustva zaštitnog užeta

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



Slika 6.29: Verovatnoća prodora groma za zaštitne uglove od $\alpha = 20^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 40^\circ$.

Na slici 6.30 prikazana je zavisnost verovatnoće prodora groma mimo zaštitnog užeta u funkciji amplitude struje. Efektivna visina zaštitnog užeta varirana je po koracima: $H = 20m$, $H = 30m$ i $H = 40m$. Zaštitni ugao je uvek iznosio $\alpha = 30^\circ$.

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

$$R = \int_D \omega(I, I') x(I) dI \quad (6.95)$$

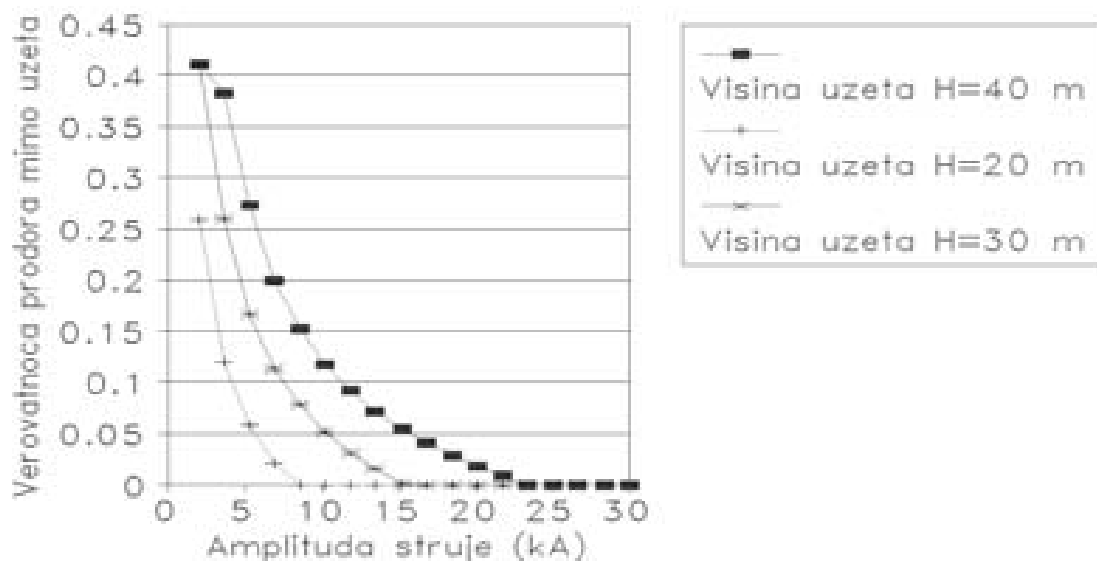
gde su:

$\omega(I, I')$ – 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).

Metoda opasnih parametara će detaljnije biti objašnjena u narednim poglavljima.



Slika 6.30: Verovatnoća prodora groma za efektivne visine zaštitnog užeta od 20 m, 30m i 40m

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.

6.5.3 Gustina raspodele struje groma u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta

Da bi se dobio zakon raspodele struje groma u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta, polazi se od **efektivne izložene površine faznog provodnika** za neku amplitudu struje groma, koja je definisana na sledeći način:

$$x(i) = R \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \psi} g(\psi) d\psi d\Theta \quad (6.96)$$

gde su:

$x(i)$ —efektivna izložena površina pri struji pražnjenja i ,

R —udarno rastojanje za struju i .

Modifikovana gustina raspodele struja groma u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta se dobija na taj način što se za svaku struju i izvrši množenje efektivne izložene površine gustinom raspodele struje, a zatim se dobijena veličina normalizuje, odnosno:

$$f_F(i) = \frac{x(i) f(i)}{\int_0^\infty x(i) f(i) di} \quad (6.97)$$

U izrazu 6.97 veličina $f_F(i)$ predstavlja gustinu raspodele struje groma u fazni provodnik mimo zaštitnog užeta, za razliku od gustine raspodele struje groma bez prisustva zaštitnog užeta $f(i)$.

Ako je za neku struju i fazni provodnik efikasno zaštićen, tada je $x(i) = 0$, pa je i verovatnoća pojave takve struje jednaka nuli.

Proračun ugroženosti izolacije se može vršiti statističkim putem sa modifikovanom gustinom raspodele struje groma u fazni provodnik. Veličina

$$P = \int_0^\infty x(i) f(i) di \quad (6.98)$$

predstavlja verovatnoću prodora groma mimo zaštitnog užeta za sve struje groma.

6.5.4 Efikasno zaštićen nadzemni vod

Ako se posmatra veličina izložene površine faznog provodnika u funkciji struje pražnjenja, vidi se da izložena površina opada sve do neke granične struje I_{gr} . Ako je struja pražnjenja veća od I_{gr} , pražnjenje mimo užeta nije moguće.

Na slici 6.31 prikazane su granične linije oblasti izložene površine faznog provodnika dobijene variranjem amplitude struje groma, [9]. Sa slike 6.31 se može uočiti da se presek izložene površine faznog provodnika i izložene površine zaštitnog užeta nalazi na pravoj koja predstavlja simetralu duži ZF koja spaja centar zaštitnog užeta i faznog provodnika. Ova prava data je sledećim analitičkim izrazom:

$$y = \frac{x_F}{\Delta y} \left(x - \frac{x_F}{2} \right) + (y_Z - \frac{y_F}{2})/2 + y_F \quad (6.99)$$

gde su:

$\Delta y = (y_Z - y_F)$, vertikalna projekcija rastojanja izmedju zaštitnog užeta i faznog provodnika,

y_F —koordinata centra faznog provodnika,

Granična tačka preseka izloženih površina faznog provodnika i zemlje dobija se zamenom izraza 6.101 u 6.100. Posle zamene se dobija:

$$(x - x_F)^2 + (y - y_F)^2 = y^2 \quad (6.102)$$

Kada se izrazi koordinata y u funkciji koordinate x , dobija se sledeći izraz koji predstavlja jednačinu parabole:

$$y = \frac{(x - x_F)^2}{2 y_F} + \frac{y_F}{2} \quad (6.103)$$

Pri tome treba voditi računa da je donja granica izložene površine faznog provodnika uvek iznad prave FN na visini faznog provodnika y_F zbog pretpostake o nemogućnosti usmeravanja skokovitog lidera naviše. U preseku parabole 6.103 i simetrale duži ZF date izrazom 6.99 dobija se granična tačka M koja određuje maksimalno udarno rastojanje za koje je još uvek moguć prodor groma mimo užeta.

Pošto je granična tačka M zajednička i za pravu 6.99 i parabolu 6.103, rešavanjem sistema jednačina po nepoznatim x i y se dobijaju koordinate granične tačke M :

$$x_M = x_F \left(1 + \frac{y_F}{\Delta y}\right) \pm \sqrt{\left[x_F \left(1 + \frac{y_F}{\Delta y}\right)\right]^2 + y_F^2 - x_F^2 - \frac{x_F^2 y_F}{\Delta y} + \Delta y \cdot y_F} \quad (6.104)$$

$$y_M = \frac{x_F}{\Delta y} (x_M - x_F/2) + \frac{\Delta y}{2} + y_F \quad (6.105)$$

Granično udarno rastojanje se može izračunati iz izraza:

$$R_{gr} = \sqrt{(x_M - x_F)^2 + (y_M - y_F)^2} \quad (6.106)$$

Na osnovu izraza za udarno rastojanje:

$$R_{gr} = k \cdot I_{gr}^n \quad (6.107)$$

dobija se granična struja:

$$I_{gr} = \sqrt[n]{\frac{R_{gr}}{k}} \quad (6.108)$$

Na osnovu opisanog postupka se na osnovu koordinata zaštitnog užeta i faznog provodnika može odrediti granična struja koja može da prodje mimo zaštitnog užeta.