

# Poglavlje 3

## Osobine atmosferskih pražnjenja

### 3.1 Mehanizam atmosferskog pražnjenja

Na osnovu velikog broja fotografija običnim ili specijalnim kamerama, snimanja električnog i magnetnog polja posebnim antenama i osciloskopskih snimaka struja pražnjenja, danas se raspolaze sa dovoljno informacija o efektima atmosferskih pražnjenja, mada je mehanizam nastanka još uvek samo delimično istražen. Sam razvoj pražnjenja se može podeliti u nekoliko faza.

#### 3.1.1 Prva faza: tačkasto pražnjenje

U tropskim predelima u olujnim oblacima centri nanelektrisanja se nalaze na visini 5–6 km iznad zemlje, dok se u polarnim predelima oni mogu nalaziti uz samu zemljinu površinu. Niski centri nanelektrisanja izazivaju vrlo jako električno polje, koje prouzrokuje pojavu korone na zašiljenim predmetima na zemlji.

Slični efekti se pojavljuju na visokim planinama ili na vrlo visokim objektima, na kojima se pojavljuje koronarno pražnjenje koje se naziva **vatrom svetog Elma**. Ovaj tip pražnjenja se zove tačkastim pražnjenjem.

Tačkasto pražnjenje nastaje na visokim tornjevima, uzdignutim šiljcima i drugim elektrodama na kojima dolazi do izražene ionizacije vazduha usled jakog električnog polja koje je jače od kritičnog polja za vazduh.

Nastanak električnog pražnjenja u vazduhu pri velikim intenzitetima električnog polja

se tumači procesom udarne ionizacije. Proces započinje ubrzavanjem slobodnih elektrona u vazduhu sve do njihovog sudara sa neutralnim molekulima gase. Ukoliko na svom slobodnom putu elektron postigne dovoljnu kinetičku energiju da može u sudaru da izvrši ionizacioni rad, oslobadja se nov elektron, koji se zajedno sa inicijalnim elektronom ponovo ubrzava u električnom polju nastavljajući proces ionizacije kroz sudare sa sledećim neutralnim molekulima. Da li će slobodni elektroni postići dovoljnu kinetičku energiju do narednog sudara zavisi od jačine električnog polja, srednje dužine slobodnog puta elektrona i potrebnog ionizacionog rada neutralnih molekula gase. Proces višestrukog uvećanja broja ionizovanih molekula usled udarne ionizacije naziva se **lavinom**. Uslov za nastanak lavine je da je intenzitet električnog polja veći od kritičnog polja za date atmosferske uslove.

Električno polje pri kome je broj novonastalih elektrona veći od broja elektrona koji se neutrališu kroz interakciju sa pozitivnim jonima naziva se **kritičnim poljem**.

Proces tinjavog pražnjenja na mestima gde je polje jače od kritičnog polja za vazduh naziva se **koronom**. Korona se manifestuje u vidu kratkotrajnih strujnih impulsa usled obrazovanja lavina, koji se šire u prostor do mesta gde je polje slabije od kritičnog. Nadalje se strujno kolo zatvara kapacitivnim putem prema drugoj elektrodi (zemljinoj površini, ukoliko je pražnjenje inicirano u oblaku, ili ka oblaku ako je pražnjenje inicirano na nekom objektu na zemlji).

Kada dužina lavine postane veća od kritične, a broj slobodnih elektrona prevaziđe neku kritičnu granicu, prostorna nanelektrisanja stvorena prethodnom ionizacijom mogu da izazovu lokalna pojačanja polja koja stvaraju nove "sekundarne lavine". One se pružaju u pravcu linija najjačeg polja, obrazujući lepezastu ili razgranatu tvorevinu od tankih kanala, koja se naziva **strimerom**.

Tačkasto pražnjenje nastaje u oblacima na vodenim kapljicama ili kristalima leda na kojima intenzitet polja prelazi kritičnu vrednost za vazduh, koja u uslovima koji vladaju u oblacima iznosi oko  $10 \text{ kV/cm}$ . Trajanje tačkastog pražnjenja može da bude od nekoliko minuta do nekoliko sati. Intenzitet struje tačkastih pražnjenja je najčešće ispod  $1 \text{ mA}$ .

Uticaj tačkastog pražnjenja na razvoj munje tumači se sa dva aspekta:

1. Po nekim autorima tačkasto pražnjenje izaziva proticanje slabe struje koja kao disipacioni proces utiče na smanjivanje električnog polja, mada je po drugim autorima taj proces previše spor da bi mogao bitnije da promeni intenzitet polja [6].
2. Smatra se da tačkasto pražnjenje na kapljici vode ili kristalu leda unutar oblaka može da inicira dalji razvoj atmosferskog pražnjenja.

U toku lepog vremena zemljina površina je nosilac negativnog električnog opterećenja,

dok je pozitivno nanelektrisanje koncentrisano u jonusferi. Električno polje stvoreno na ovaj način konvencionalno se smatra da ima pozitivan smer.

Za vreme olujne aktivnosti niži delovi oblaka nose veliku koncentraciju negativnog naboja. Kada se takav oblak približava, tada se menja smer električnog polja na zemlji, pa i struje tačkastog pražnjenja menjaju polaritet. Na osnovu ove pojave grade se sistemi za obaveštavanje o nailasku olujnih oblaka. Sistem radi na principu osjetljivog instrumenta koji meri veoma male struje tačkastog pražnjenja kroz šiljak na vrhu visokog jarbola. Kada struja promeni intenzitet i smer, to znači da se približavaju olujni oblaci.

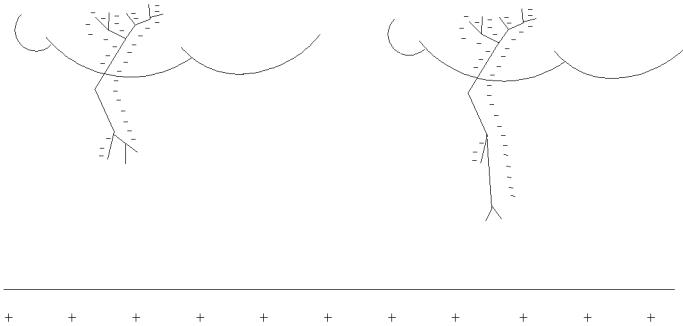
### 3.1.2 Druga faza: skokoviti lider

U jakom polju nastalom dejstvom električnih naboja u oblaku dolazi do deformisanja kapljica vode, koje se izdužuju [6]. Na kapljicama se indukuje električni naboј, koji se koncentriše na izduženim vrhovima. Kada se kapljica dovoljno izduži, nastaje proces tačkastog pražnjenja iz vrhova kapljice. Smatra se da se lavinski proces nastao na taj način proširuje u dubinu prostora u vidu strimer-a sve dok je polje na vrhu jonizovanog kanala jače od kritičnog polja za vazduh.

Prema pojedinim tumačenjima [11] prvo nastaje proces strimernog pražnjenja u pravcu polja (pilot-strimer), koji je slabo osvetljen. Energija nastala proticanjem struje kroz kanale strimernog pražnjenja se pretvara u toplotu. Toplotna energija vrši dalju termičku ionizaciju povećavajući provodljivost početka strimera (na mestu gde je polje bilo najintenzivnije). Ovaj deo kanala naziva se korenom strimernog pražnjenja. Deo tako obrazovanog jako ionizovanog kanala naziva se **liderom**. Uslov za prerastanje strimernog pražnjenja u svetao kanal lidera je dovoljno velika struja strimernog pražnjenja koja izaziva termičku ionizaciju kanala.

Na taj način obrazuje se jako ionizovan kanal na dužini od 5–50 m koji se završava svetlim vrhom. Prostiranje ovoga kanala vrši se brzinom od oko 1/6 brzine svetlosti. Nakon toga proces se za trenutak zaustavlja, da bi zatim od vrha kanala započeo novi skok u istom ili izmenjenom pravcu. Ova faza atmosferskog pražnjenja naziva se **skokovitim liderom**. Smatra se da do zastoja u razvoju skokovitog lidera dolazi zbog potrebnog vremena da se u njegovom vrhu formira dovoljna koncentracija naboja za dalji razvoj pražnjenja. Za vreme pauze u razvoju skokovitog lidera sa njegovog vrha se dalje razvijaju strimeri u prethodno nejonizovan prostor. Prosečna brzina prostiranja skokovitog lidera zajedno sa pauzama je oko 1/1000 brzine svetlosti. Struja skokovitog lidera se procenjuje na nekoliko stotina ampera.

Šematski prikaz napredovanja skokovitog lidera u dva trenutka dat je na slici 3.1. Na slici 3.1 levo prikazan je početak razvoja skokovitog lidera, a na slici 3.1 desno poslednji stadijum skokovitog lidera pred udar u zemlju.

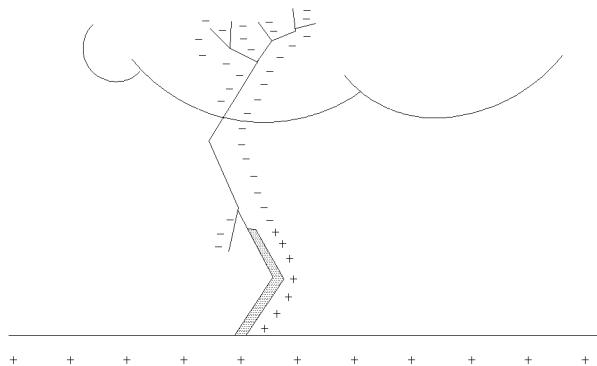


Slika 3.1: Razvoj skokovitog lidera

Kada se skokoviti lider dovoljno približi zemlji ili nekom istaknutom uzemljenom objektu, pojavljuju se strimeri iz glave skokovitog lidera i sa tog objekta. U trenutku kada se ovi strimeri susretnu, nastaje faza glavnog pražnjenja. U slučaju velikog intenziteta polja na zemlji ili uzemljenom objektu strimeri koji kreću sa zemlje mogu da prerastu u uzlazni lider. Ako se silazni i uzlazni lider susretnu, tada se uzlazni lider naziva **poveznim liderom**. Ukoliko oblak ne sadrži dovoljnu količinu elektriciteta da bi skokoviti lider probio svoj put do zemlje, može se javiti delimično pražnjenje sa skokovitim liderom koji se završava u prostoru izmedju oblaka i zemlje.

### 3.1.3 Treća faza: glavno pražnjenje

U fazi glavnog pražnjenja dolazi do postepene neutralizacije nanelektrisanja u kanalu groma iz zemlje prema oblaku, kao što je to simbolično prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2: Glavno pražnjenje

Proces glavnog pražnjenja odlikuje se vrlo velikom strujom koja se kreće od nekoliko  $kA$  do preko  $100\text{ }kA$ . Glavno pražnjenje izaziva jak svetlosni efekat zbog visoke temperature

u kanalu groma i zvučni efekat usled širenja kanala pri proticanju velike struje. Glavno pražnjenje izaziva razorne efekte na pogodjenim objektima.

Glavno pražnjenje se kreće od zemlje ka oblaku brzinom od oko 1/10 brzine svetlosti.

Intenzitet struje atmosferskog pražnjenja ne zavisi od ukupne količine elektriciteta u oblaku, već samo od količine elektriciteta koja se nalazi nagomilana u kanalu groma. To znači da se proces glavnog pražnjenja gasi kada se potpuno neutrališe električni naboј u kanalu groma.

Savremene metode procenjivanja efikasnosti gromobranske zaštite se baziraju na srazmernosti izmedju struje groma i naboja u kanalu groma.

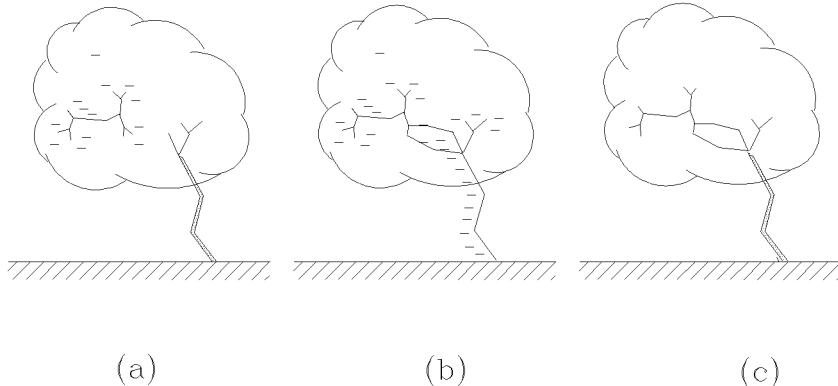
### 3.1.4 Četvrta faza: višestruki udari

Jedno glavno pražnjenje često nije dovoljno da izvrši neutralizaciju kompletног električnog naboja oblaka. Zbog toga se dogadjaju višestruki udari. Nakon prvog glavnog pražnjenja posle pauze od nekoliko desetina milisekundi od oblaka prema zemlji se razvija pražnjenje po prethodno jonizovanom kanalu, koje nazivamo **strelovitim liderom**. Streloviti lider je znatno brži od skokovitog lidera jer on ne formira jonizovani kanal, već se kreće po već obrazovanom kanalu. Kada streloviti lider dodirne zemlju, javlja se drugo glavno pražnjenje koje je slabijeg intenziteta od prvog glavnog pražnjenja. Sva pražnjenja posle prvog nazivaju se **uzastopnim pražnjenjima**. Pod **kompletним pražnjenjem** podrazumeva se proces formiranja skokovitog lidera, prvog glavnog pražnjenja i uzastopnih pražnjenja. Za vreme jednog kompletног pražnjenja može se pojaviti čak i do 50 pojedinačnih udara groma. Smatra se da preko 40 % pražnjenja ima višestruku prirodu, sa uglavnom 3 do 4 pojedinačna udara.

Na slici 3.3 simbolično je prikazan mehanizam nastanka višestrukih pražnjenja prema [8].

Rasterećenje jednog od centara nanelektrisanja u oblaku usled prvog glavnog pražnjenja izaziva smanjivanje potencijala tog centra. To može da dovede do značajne razlike potencijala izmedju pojedinih centara nanelektrisanja unutar samog oblaka, što izaziva pojavu strimera izmedju njih, kao na slici 3.3(a).

Kada se strimeri susretnu unutar oblaka, nastaje preraspodela naboja izmedju centara i ponovno rasterećivanje po dobro provodnom kanalu groma, što se naziva **strelovitim liderom**. Pojava strelovitog lidera ilustrovana je na slici 3.3(b). Kada streloviti lider dostigne zemlju (bez zaustavljanja ili grananja) nastaje uzastopno glavno pražnjenje pri kome se neutrališe nanelektrisanje u kanalu groma od zemlje ka oblaku, kao na slici 3.3(c).



Slika 3.3: Proces višestrukih pražnjenja, a) Formiranje strimera unutar oblaka, b) Obrazovanje strelovitog lidera, c) Uzastopna glavna pražnjenja

Dijagram kompletног pražnjenja, koji se obično dobija snimanjem pomoću specijalnih kamera sa linearno pokretnim filmom, izgleda kao na slici 3.4.

Na slici 3.4 na gornjem dijagrame prikazan je prostorno-vremenski dijagram razvoja pražnjenja, a na donjem dijagrame vremenski oblik struje kompletног pražnjenja.

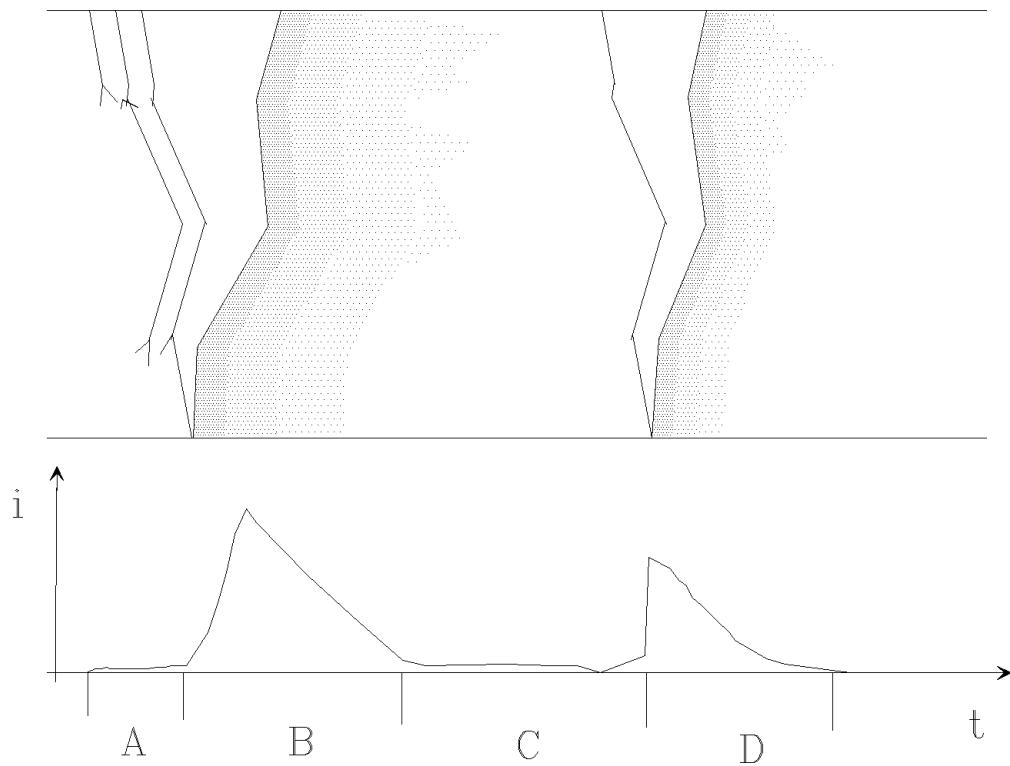
Sa slike 3.4 može se uočiti da je amplituda struje prvog udara najveća, ali je strmina uspostavljanja struje na čelu veća kod uzastopnih udara [12].

Pre početka glavnog udara, posebno ako se pojavljuje povezni lider izmedju glave silaznog skokovitog lidera i objekta na zemlji, pojavljuje se trajna struja relativno male amplitude, koja prethodi velikom strujnom udaru glavnog pražnjenja. Ova struja je najizraženija kod uzlaznih pražnjenja, kada skokoviti lider nastaje na zemlji i kreće se ka oblaku.

Na slici je slovom *A* označen period skokovitog lidera, koji ima trajanje od  $0,005\text{ s}$  do  $0,01\text{ s}$ . Period glavnog pražnjenja obeležen je slovom *B* i ima trajanje od  $50\text{ }\mu\text{s}$  do  $100\text{ }\mu\text{s}$ . Pri kraju glavnog pražnjenja pojavljuje se takođe dugotrajna struja koja može iznositi  $100\text{--}200\text{ A}$  u trajanju od nekoliko desetina ili stotina milisekundi. Ovaj period je na dijagramu označen slovom *C*. Period uzastopnog pražnjenja obeležen je na dijagramu slovom *D*.

## 3.2 Tipovi atmosferskih pražnjenja

Prema [15] sva atmosferska pražnjenja u uzemljene objekte ili zemlju mogu se podeliti u nekoliko tipova prikazanih na slici 3.5.



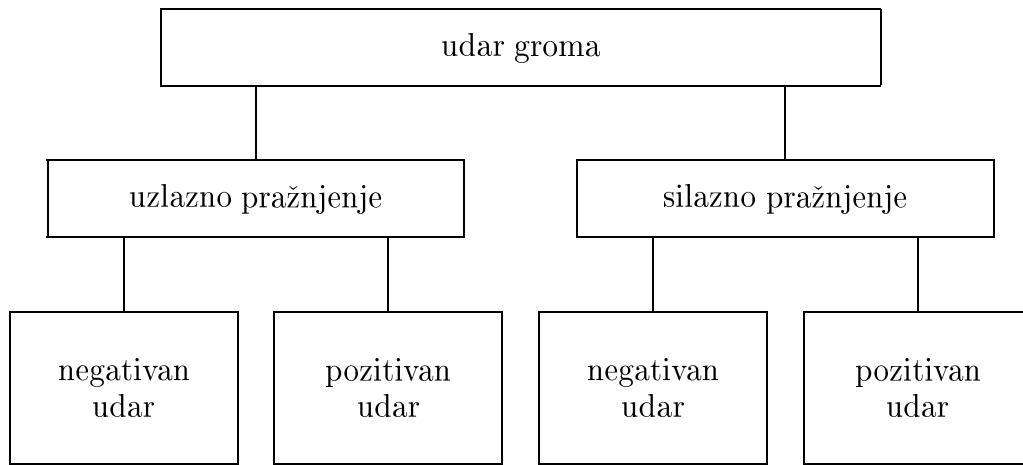
Slika 3.4: Prostorno–vremenski dijagram razvoja atmosferskog pražnjenja (gore) i vremenski oblik struje (dole)

Na slici 3.5 su usvojene sledeće konvencije:

- udar je negativan ako je oblak negativno nanelektrisan,
- udar je uzlazni ako se skokoviti lider kreće od zemlje ka oblaku,
- udar je silazni ako se skokoviti lider kreće od oblaka ka zemlji.

Pri silaznom pražnjenju kada se glava skokovitog lidera približi objektima na zemlji koji imaju izražene šiljke, dolazi do pojave jake korone i obrazovanja strimera dužine preko 1 m, koji mogu da se pretvore u uzlazne lidere koji kreću u susret glavnom skokovitom lideru. Po pravilu dužina ovih lidera je znatno manja u poređenju sa silaznim liderom koji je inicirao razvoj pražnjenja.

Najčešće su oblaci nosioci negativnog naboja, tako da su i pražnjenja u većini slučajeva negativna. Kada se pražnjenje odvija u niske objekte ili u zemlju, tada je ono najčešće



Slika 3.5: Podela atmosferskih pražnjenja

silaznog karaktera. Jedino se kod vrlo visokih objekata (televizijski tornjevi, vrlo visoke zgrade) pojavljuju uzlazna pražnjenja inicirana sa vrha objekta.

Može se smatrati da je većina pražnjenja u elektroenergetske objekte silaznog tipa i negativne polarnosti.

Utvrđeno je da se pozitivna pražnjenja sastoje iz samo jednog udara. Pozitivna pražnjenja su znatno redja od negativnih, ali mogu da imaju razornije dejstvo zbog veće amplitude struje glavnog pražnjenja.

Pored navedenih pražnjenja u zemlju ili u uzemljene objekte postoje i pražnjenja izmedju oblaka, koja mogu da izazovu pojavu indukovanih prenapona na provodnicima pojedinih objekata, mada su ovi prenaponi znatno niži od prenapona nastalih direktnim udarom groma.

### 3.3 Parametri atmosferskih pražnjenja

Pri procenjivanju ugroženosti objekata od atmosferskih pražnjenja neophodno je poznavati pojedine električne i meteorološke parametre grmljavinske aktivnosti.

### 3.3.1 Električni parametri

Osnovni električni parametri atmosferskog pražnjenja su:

- amplituda struje groma,
- oblik struje groma,
- strmina strujnog talasa,
- udarna količina elektriciteta,

$$Q_{ud} = \int_{t_{ud}} idt \quad (3.1)$$

koja predstavlja količinu elektriciteta koja protekne za vreme trajanja udarne struje u vremenskom periodu  $t_{ud}$ .

- količina elektriciteta prvog udara,

$$Q = \int idt \quad (3.2)$$

koja obuhvata i struju skokovitog lidera i struju nakon završetka glavnog pražnjenja,

- ukupna količina elektriciteta kompletног pražnjenja,

$$Q_u = \sum_{i=1}^n \int idt \quad (3.3)$$

gde je:  $n$ –broj uzastopnih pražnjenja. Ova veličina predstavlja ukupnu količinu elektriciteta koja protiče u zemlju u toku svih  $n$  pražnjenja,

- toplotni impuls kompletног pražnjenja,

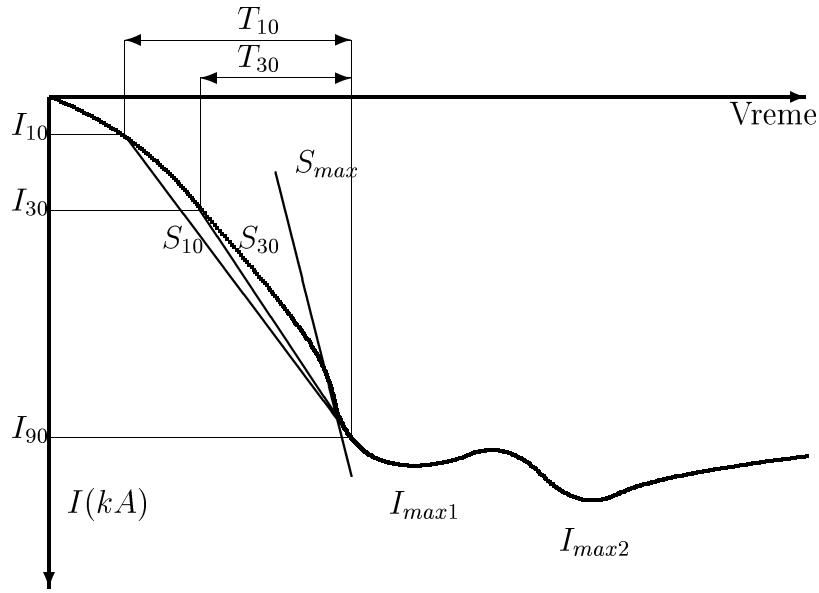
$$A = \int i^2 dt \quad (3.4)$$

- broj pojedinačnih udara u jednom kompletном pražnjenju.

Na slici 3.6 dat je tipičan vremenski oblik negativnog strujnog talasa prvog udara. Na slici su date definicije strmine struje groma prema [14].

Na slici 3.6 oznake imaju sledeće značenje:

$I_{10}$ –struja koja ima vrednost 10% od prvog maksimuma struje  $I_{max_1}$ ,



Slika 3.6: Definicija strmine čela za tipičan oblik negativnog silaznog prvog udara

$I_{30}$ —struja koja ima vrednost 30% od prvog maksimuma struje  $I_{max_1}$ ,

$I_{90}$ —struja koja ima vrednost 90% od prvog maksimuma struje  $I_{max_1}$ ,

$T_{10}$ —vremenski interval izmedju trenutaka kada nastupa  $I_{10}$  i  $I_{90}$ ,

$T_{30}$ —Vremenski interval izmedju trenutaka kada nastupa  $I_{30}$  i  $I_{90}$ ,

$S_{max}$ —maksimalna strmina talasa koja se pojavljuje u bilo kom trenutku na čelu,

$S_{10}$ —srednja strmina talasa u vremenskom intervalu  $T_{10}$ :

$$S_{10} = \frac{I_{90} - I_{10}}{T_{10}} \quad (3.5)$$

$S_{30}$ —srednja strmina talasa u vremenskom intervalu  $T_{30}$ :

$$S_{30} = \frac{I_{90} - I_{30}}{T_{30}} \quad (3.6)$$

Sa slike 3.6 može se uočiti da strujni talas ima najčešće dva maksimuma  $I_{max_1}$  i  $I_{max_2}$ . Sve veličine koje definišu oblik talasa sa slike 3.6 odredjene su u odnosu na prvi maksimum.

Sistematska merenja parametara groma vršena su u više zemalja (Južna Afrika, Čehoslovačka, Italija, SAD), ali se kao najreprezentativniji rezultati zbog dugog perioda registriranja i velikog broja uzoraka mogu smatrati merenja u Švajcarskoj na brdu Monte San-Salvatore na dva televizijska tornja, pod rukovodstvom profesora Bergera.

Danas postoje pokušaji da se objedine rezultati istraživanja više autora i formiraju zakoni raspodele parametara groma koji mogu da imaju široku primenu u inženjerskoj praksi [14]. Iako postoje teškoće u objedinjavanju rezultata zbog različitih klimatskih, geografskih i lokalnih topoloških uslova na mestu merenja, ipak su ovakvi rezultati pouzdaniji od rezultata istraživanja sa malim brojem uzoraka za dobijanje statističkih pokazatelja koji karakterišu atmosferska pražnjenja. Parametri atmosferskih pražnjenja mogu imati vrednosti u veoma širokom opsegu, pa je zbog toga neophodno statistički obraditi i predstaviti ih odgovarajućim zakonima raspodele.

U daljem tekstu će biti prikazani neki od zakona raspodela parametara atmosferskih pražnjenja koji se mogu koristiti u inženjerskoj praksi.

### a) Zakon raspodele amplitute struje groma

Na osnovu velikog broja merenja u više zemalja predloženi su različiti zakoni raspodele verovatnoće amplituda struja atmosferskih pražnjenja.

U Rusiji je u širokoj primeni eksponencijalni zakon raspodele amplitude struje groma, dat u sledećem obliku [32]:

$$\overline{P}(I_m) = e^{-I_m/a} \quad (3.7)$$

gde su:

- $a = 26,1$  za ravničarske predele sa malim otporom zemlje,
- $a = 13,0$  za planinske predele,

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

$I_m$  –amplituda struje groma.

Izraz 3.7 predstavlja komplement integralnog ili kumulativnog zakona raspodele struje groma, jer daje verovatnoću premašenja zadate struje  $I_m$ . Gustina raspodele verovatnoće

struje groma može se izračunati iz komplementa kumulativnog zakona raspodele na osnovu izraza:

$$\omega(I_m) = -\frac{\partial \bar{P}(I_m)}{\partial I_m} = \frac{1}{a} e^{-I_m/a} \quad (3.8)$$

gde je  $\omega(I_m)$  gustina raspodele verovatnoće.

Komplement kumulativnog zakona raspodele dobija se iz izraza za kumulativni zakon raspodele:

$$\bar{P}(I_m) = 1 - P(I_m) \quad (3.9)$$

gde je  $P(I_m) = 1 - \exp(-I_m/a)$  kumulativni zakon raspodele koji daje verovatnoću da struja  $I_m$  neće biti prevazidjena.

Osnovni nedostatak primene eksponencijalnog zakona raspodele je u tome što je gustina raspodele verovatnoće struje groma izračunata iz izraza 3.8 najveća pri amplitudi struje groma koja je jednaka nuli i opada sa porastom amplitude struje.

Na osnovu statističkih podataka se može zaključiti da se maksimalna vrednost gustine verovatnoće struje groma pojavljuje pri strujama srednjih amplituda (20–40 kA).

Na slici 3.7 je skicirana eksponencijalna funkcija raspodele (kriva  $a$ ) i stvarna (empirijska) funkcija raspodele (kriva  $b$ ) amplitude struje groma. Može se uočiti da postoje značajna odstupanja u obliku krivih u oblasti malih struja.

Danas je u širokoj upotrebi logaritamsko-normalni zakon raspodele amplitude struje groma. Gustina logaritamsko-normalne raspodele verovatnoće može se prikazati u sledećem analitičkom obliku [15]:

$$\omega(I) = \frac{1}{I_{sr}\sigma_{lnI}\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{\ln I - \ln I_{sr}}{\sqrt{2}\sigma_{lnI}}\right)^2} \quad (3.10)$$

gde su:

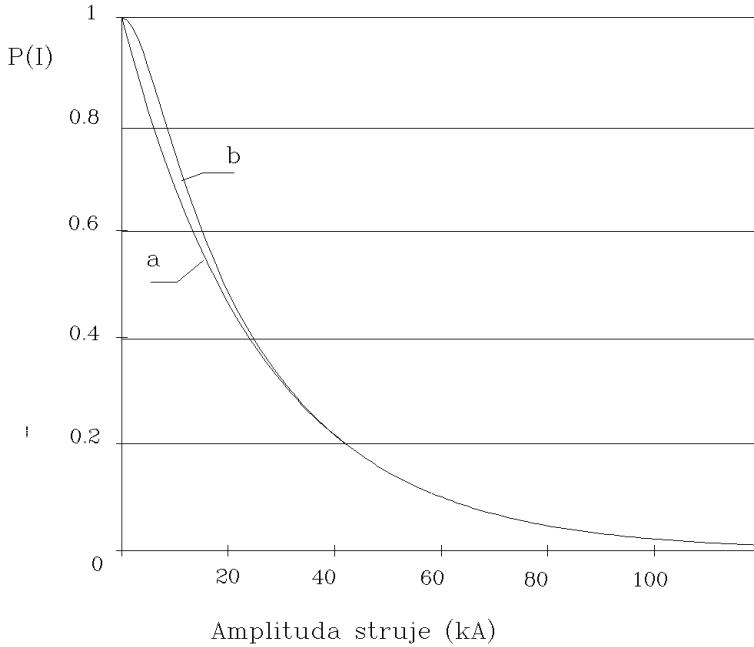
$\omega(I)$ —gustina verovatnoće amplitude struje groma,

$I$ —slučajna amplituda struje groma,

$I_{sr}$ —srednja vrednost amplitude struje groma,

$\sigma_{lnI}$ —standardno odstupanje logaritma amplitude struje groma.

Umesto u obliku 3.10 zakon raspodele verovatnoće se može prikazati u integralnom (kumulativnom) obliku:



Slika 3.7: Eksponencijalni (kriva a) i empirijski zakon raspodele (kriva b)

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (3.11)$$

$$\text{где је: } x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{ln I}}$$

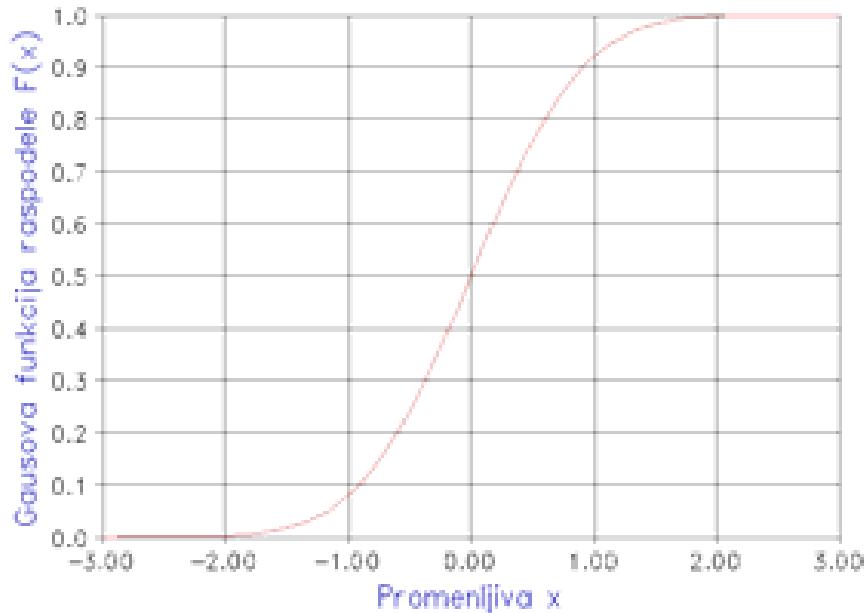
Oznake u izrazu 3.11 imaju identično značenje као у 3.10. Izraz 3.11 дaje вероватноћу појаве амплитуде струје која је мања од струје  $I$ .

На слици 3.8 приказана је нормална (Гаусова) расподела вероватноће у зависности од случајне величине  $x$  према изразу 3.11.

Verovatnoća појаве струје која је већа од струје  $I_m$  добија се као комплементарна вероватноћа, односно:

$$\bar{P}(I_m) = 1 - P(I_m) \quad (3.12)$$

Pri analizi параметара атмосfersких праžnjenja se по правилу ради са кумултивним вероватноћама појаве величина које су веће од посматране величине  $x$ . Криве функције расподеле вероватноће су у овом случају опадајуће од 1 до 0 за растућу вредност случајне променљиве  $x$ .



Slika 3.8: Funkcija normalne (Gausove) raspodele

Numerički parametri logaritamsko-normalne raspodele amplitude struje groma koji potpuno opisuju zakon raspodele su srednja vrednost i standardno odstupanje logaritma amplitude struje groma. Brojne vrednosti srednjih amplituda struja i standardnog odstupanja logaritma struje atmosferskih pražnjenja  $I_{sr}$  i  $\sigma_{lnI}$  prikazane su u tablici 3.1 prema [14].

	$I_{sr}$ (kA)	$\sigma_{lnI}$	Br. uzoraka
Prvi negativni udar	30	0,53	101
Prateći negativni udari	12	0,57	135
Pozitivan udar	35	1,21	26

Tabela 3.1: Srednja amplituda i standardno odstupanje struje različitih udara

Rezultati merenja vršenih na više mesta i sistematske obrade podataka daju relativno usaglašene vrednosti za srednju vrednost amplitude struje prvih negativnih udara u opsegu od  $I_{sr} = 25\text{ kA}$  do  $34\text{ kA}$ . Standardna odstupanja logaritma struje prvih negativnih udara su znatno manje usaglašena i kreću se u opsegu  $\sigma_{lnI} = 0,39 - 0,9$ .

Vrlo često se parametri normalne raspodele daju sa tri karakteristične vrednosti verovatnoće:

$$x_{5\%}, x_{50\%}, x_{95\%}$$

gde je  $x_{P\%}$ -vrednost slučajnog parametra  $\mathcal{X} = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{ln I}}$  koja može biti prevazidjena verovatnoćom  $P$  (%).

U tablici 3.2 date su verovatnoće  $P(x)$ , odnosno  $\bar{P}(x)$  u slučaju normalne raspodele [33] u zavisnosti od nekih tipičnih vrednosti slučajne veličine  $x$ .

$P(x)$	0,05	0,16	0,5	0,84	0,95
$\bar{P}(x)$	0,95	0,84	0,5	0,16	0,05
$x$	-1,645	-1	0	1	1,645

Tabela 3.2: Verovatnoća slučajne veličine  $x$

Ako su poznati  $I_{95\%}$ ,  $I_{50\%}$  i  $I_{5\%}$ , tada se standardno odstupanje logaritma struje može izračunati na osnovu izraza:

$$\sigma_{ln I} = 0.304 \left[ \ln \frac{I_{95\%}}{I_{50\%}} - \ln \frac{I_{5\%}}{I_{50\%}} \right] \quad (3.13)$$

Ako su poznati  $I_{16\%}$  i  $I_{50\%}$ , tada se standardno odstupanje za slučaj opadajuće kumulativne funkcije može izračunati na osnovu izraza:

$$\sigma_{ln I} = \ln \frac{I_{16\%}}{I_{50\%}} \quad (3.14)$$

U [16] se predlaže pojednostavljeni zakon raspodele amplitude struje groma u obliku:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left( \frac{I}{3I} \right)^{2.6}} \quad (3.15)$$

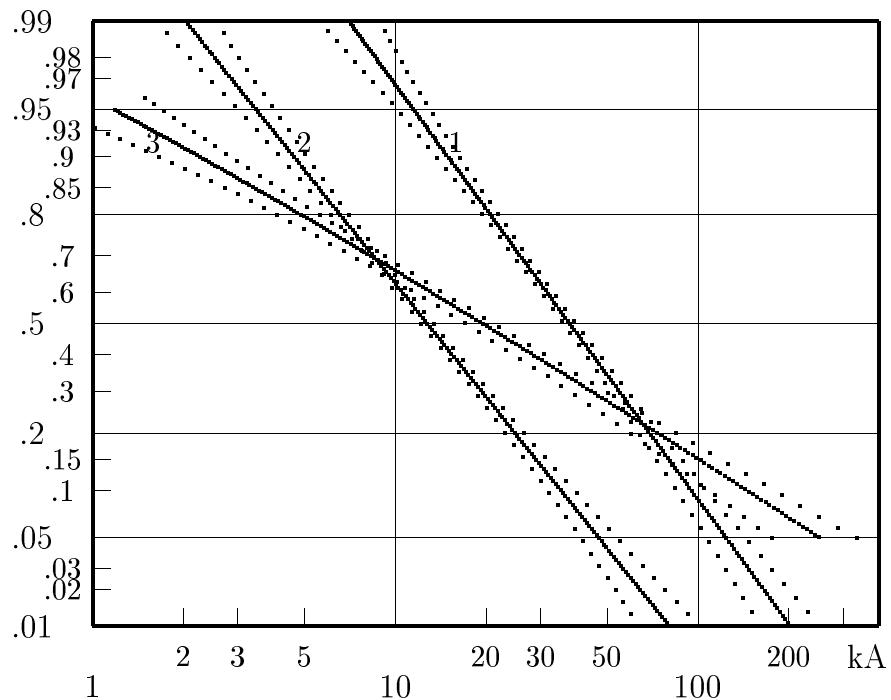
gde su:

$P(I)$ -verovatnoća da će struja groma biti veća od  $I$ ,

$I$ -slučajna amplituda struje groma.

Zakon raspodele amplitude struje groma dat izrazom 3.15 daje veoma slične rezultate kao i logaritamsko-normalni zakon raspodele. Za praktičnu upotrebu je jednostavnije koristiti logaritamsko-normalnu raspodelu zbog generalnosti.

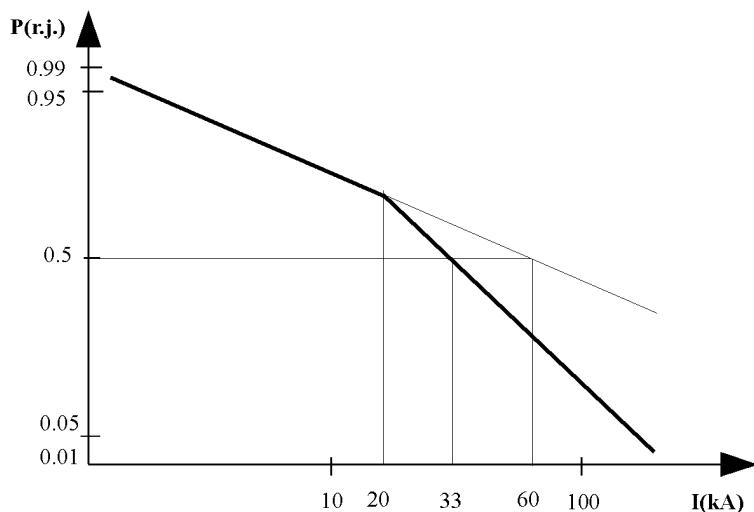
Na slici 3.9 prikazane su funkcije raspodele amplituda struja groma na osnovu rezultata merenja prema [15] u logaritamsko-normalnoj razmeri. Na apcisnoj osi data je struja u logaritamskoj razmeri, a na ordinatnoj osi verovatnoća prevazilaženja struje u razmeri normalne (Gausove) raspodele. Odgovarajuće prave predstavljaju analitičke aproksimacije empirijskih zakona raspodele logaritamsko-normalnom raspodelom. Tačkastim linijama su



Slika 3.9: Logaritamsko-normalna aproksimacija zakona raspodele amplitude struje groma za (1)-prve negativne udare, (2)-prateće negativne udare, (3)-pozitivne udare

označeni intervali unutar kojih se može očekivati odstupanje empirijske verovatnoće od analitičke sa verovatnoćom manjom od 5 %. Danas se koriste zakoni raspodela amplituda struja groma najčešće u logaritamsko-normalnom obliku, koji su dobijeni na osnovu većeg broja registracija struja u više zemalja sveta. Zakoni raspodela struja atmosferskog pražnjenja se koriste u inženjerskoj praksi pri projektovanju gromobranske zaštite različitih objekata,

ali se posebna pažnja posvećuje zaštiti elektroenergetskih objekata. Zbog toga je veliki broj istraživanja karakteristika atmosferskih pražnjenja iniciran potrebama elektroprivreda u raznim zemljama. Iz tog razloga postoje zakoni raspodele amplituda struja atmosferskih pražnjenja koje su dobijene sakupljanjem rezultata registracija sa namenom da se koriste za potrebe zaštite elektroenergetskih vodova od atmosferskih prenapona. Tipični primeri zakona raspodele struja atmosferskih pražnjenja namenjeni analizih ponašanja vodova pri atmosferskim pražnjenjima prikazani su u [15], [16], kao rezultat višegodišnjih istraživanja. Na slici 3.10 prikazan je zakon raspodele amplituda i strmina struja prvih negativnih udara u logaritamsko-normalnom obliku sastavljenom od dve prave linije u dijagramu u logaritamsko-normalnoj razmeri. Struje koje su manje od 20 kA odgovaraju oblasti direktnog udara u



Slika 3.10: Logaritamsko-normalna raspodela amplituda struja prvih negativnih udara u obliku dve prave linije

fazni provodnik (odnosno odgovaraju pražnjenju mimo zaštitnog užeta u slučaju postojanja gromobranske zaštite vodova). Struje koje su veće od 20 kA odgovaraju strujama pražnjenja u gromobransku zaštitu ili u stubove, odnosno u dobro uzemljene objekte. Radi boljeg razumevanja se savetuje čitaocu da pogleda poglavlje 6.1 i 6.5.

Pri statističkoj analizi atmosferskih pražnjenja su moguća dva pristupa. Po jednom pristupu konstantna je upadna komponenta struje groma, a stvarna struja se dobija na osnovu odziva elementa u koji se pražnjenje dogodilo. U tom slučaju se koristi jedinstveni zakon raspodele struja prvih negativnih udara atmosferskog pražnjenja u dobro uzemljene objekte, smatrajući da je upadna komponenta struje polovina amplitude stvarne struje u dobro uzemljeni objekat. Drugi prilaz je da se modelovanje pražnjenja vrši injektiranjem stvarne struje pražnjenja u pogodjeno mesto, ali da se radi sa zakonom raspodele amplituda struja koji u sebi razlikuje pražnjenja u uzemljene delove ili u fazne provodnike.

### b) Strmina struje groma

Pored amplitude struje groma veoma važan parametar za analizu ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih pražnjenja predstavlja strmina struje groma na čelu talasa. Strmina struje groma predstavlja takodje slučajnu veličinu koja ima vrlo širok dijapazon vrednosti. Uočeno je da tehnika merenja može da doprinese velikim razlikama u vrednosti statističkih parametara strmine struje groma.

U Rusiji je u primeni eksponencijalni zakon raspodele maksimalne strmine struje groma, koji je po obliku identičan zakonu raspodele amplituda struje groma u eksponencijalnom obliku, odnosno:

$$\overline{P}(S_m) = e^{-S_m/b} \quad (3.16)$$

gde su:

$b = 15, 65$  za ravničarske predele sa malim specifičnim otporom zemlje,

$b = 7, 8$  za planinske predele,

$\overline{P}(S_m)$  –verovatnoća da će se pojaviti maksimalna strmina struje groma  $S$  koja je veća od zadate strmine  $S_m$ ,

$S_m$  –maksimalna strmina struje groma na čelu talasa.

Eksponencijalni zakon raspodele maksimalne strmine pokazuje isti nedostatak pri malim vrednostima strmine čela strujnog talasa kao i eksponencijalni zakon raspodele amplituda struja groma, kao što je to prikazano na slici 3.7.

Eksponencijalni zakoni raspodele amplituda i maksimalnih strmina struja groma su vrlo povoljni za grube procene ugroženosti elektroenergetskih objekata analitičkim metodama bez korišćenja računara.

Danas je u svetu u širokoj primeni logaritamsko–normalni zakon raspodele strmina struja groma u obliku:

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (3.17)$$

gde su:  $y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{ln S}}$

$S$ -slučajna maksimalna strmina struje groma,

$S_{sr}$ -srednja vrednost maksimalne strmine struje groma,

$\sigma_{lnS}$ -standardno odstupanje logaritma strmine struje groma.

U tablici 3.3 prikazani su statistički pokazatelji strmine struje groma (srednja vrednost i standardno odstupanje logaritma strmine struje) na osnovu [14]. Podaci se odnose na maksimalnu strminu struje groma  $S_{max}$  po definiciji sa slike 3.6.

	$S_{sr}(kA/\mu s)$	$\sigma_{lnS}$	Br.uzoraka
Prvi negativni udar	12	0,535	92
Prateći negativni udari	40	0,76	122
Pozitivan udar	2,4	1,54	21

Tabela 3.3: Srednja strmina i standardno odstupanje logaritma strmine različitih udara

Upotrebom digitalnih uredjaja za merenja [15] može se izvršiti detaljnija obrada rezultata merenja. U tablici 3.4 prikazani su rezultati obrade digitalizovanih snimaka.

	$S_{30}(kA/\mu s)$	$\sigma_{lnS_{30}}$	Br.uzoraka
Prvi udari	7,2	0,62	73
Prateći udari	20,1	0,96	114

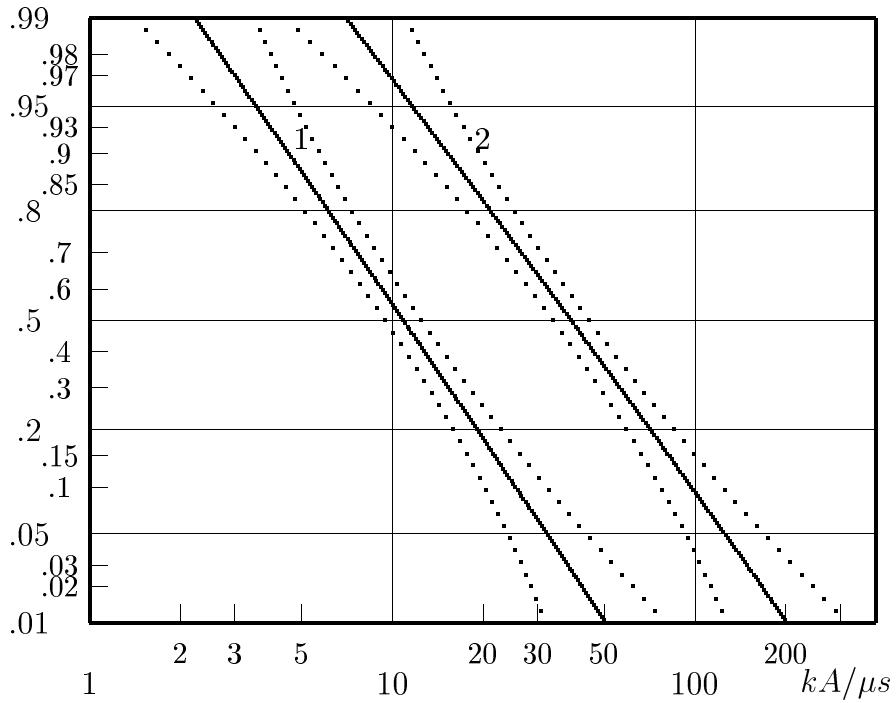
	$S_{max}(kA/\mu s)$	$\sigma_{lnS_{max}}$	Br.uzoraka
Prvi udari	24,3	0,6	75
Prateći udari	40,0	0,85	113

Tabela 3.4: Statistički parametri strmine struje groma odredjeni digitalnim mernim metodama

U tablici 3.4 oznake  $S_{30}$  i  $S_{max}$  označavaju matematičko očekivanje srednje strmine talasa i maksimalne strmine talasa definisane prema slici 3.6, a  $\sigma_{lnS_{30}}$  i  $\sigma_{lnS_{max}}$  odgovarajuća srednja kvadratna odstupanja logaritma strmine struje.

Može se uočiti da je srednja vrednost maksimalne strmine talasa odredjena savremenim digitalnim metodama prema tablici 3.4 oko dva puta veća od iste veličine odredjene klasičnim putem vizuelnim očitavanjem sa oscilograma. U [15] se smatra da je strmina odredjena savremenim postupcima tačnija zbog eliminisanja subjektivnih grešaka očitavanja. U donošenju konačnih zaključaka treba biti oprezan, a dalji razvoj i iskustva na korišćenju analogno-digitalnih konvertora će dati konačan odgovor.

Na slici 3.11 prikazan je eksperimentalno dobijen zakon raspodele maksimalnih strmina struje groma prema [15], nacrtan u logaritamsko-normalnoj razmeri. Prava linija predstavlja analitičku aproksimaciju zakona raspodele.



Slika 3.11: Zakon raspodele maksimalne strmine struje groma za (1)-prve negativne udare, (2)-prateće negativne udare

Za praktičnu upotrebu je veoma pogodna dvodimenzionalna gustina raspodele amplituda i strmina struja groma predložena u [30] koja ima sledeći oblik:

$$\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2+y^2-2\rho xy}{2(1-\rho^2)}} \quad (3.18)$$

Oznake u izrazu 3.18 imaju sledeće značenje:

$$x = \frac{\ln \frac{I}{I_{sr}}}{\sigma_{ln I}} \quad (3.19)$$

$$y = \frac{\ln \frac{S}{S_{sr}}}{\sigma_{ln S}} \quad (3.20)$$

$I$ -slučajna amplituda struje groma,

$I_{sr}$ -srednja vrednost amplitude struje groma (matematičko očekivanje amplitude struje groma),

$S$ -slučajna strmina struje groma (definisana kao maksimalna strmina  $S_{max}$  sa slike 3.6),

$S_{sr}$ -matematičko očekivanje maksimalne strmine struje groma,

$\sigma_{lnI}$ -standardno odstupanje logaritma struje groma,

$\sigma_{lnS}$ -standardno odstupanje logaritma strmine čela struje groma,

$\rho$ -koeficijenat korelacije izmedju amplitude i strmine struje groma.

U daljem tekstu će se podrazumevati pod strminom struje groma  $S$  maksimalna strmina struje groma  $S_{max}$  sa slike 3.6.

Pri statističkoj analizi parametara groma podatak o korelaciji izmedju amplitude i strmine struje groma se pokazao kao najmanje poznat parametar u analizama raznih autora. Vrlo često se sreće prilaz po kome se amplituda i strmina struje groma razmatraju kao nezavisne slučajne veličine. U tom slučaju se mogu primenjivati zakoni raspodele amplitude i strmine struje korišćenjem izraza 3.11 i 3.17 nezavisno.

Prema [14] koeficijent korelacije ima pozitivnu vrednost  $\rho = 0,49$ , što pokazuje da postoji tendencija da struja veće amplitude ima i veću maksimalnu strminu. Prema [15] dobijeni su još veći koeficijenti korelacije.

Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele amplitude i strmine struje groma date su u tablici 3.5 prema [30].

$I_{sr}$ (kA)	$S_{sr}$ (kA/ $\mu$ s)	$\sigma_{lnI}$	$\sigma_{lnS}$	$\rho$
30	14	0,68	0,55	0,38

Tabela 3.5: Brojne vrednosti parametara dvojne raspodele struje groma

Vrednosti iz tablice 3.5 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 stalno korigovati u skladu sa novim rezultatima merenja od strane raznih autora.

Amplituda i strmina struje groma su najvažniji parametri za procenu ugroženosti elektroenergetskih objekata. Velika amplituda struje izaziva omski pad napona, posebno na otporu uzemljenja objekata, a struja velike strmine izaziva induktivni pad napona na provodnicima kroz koje protiče, kao i indukovane napone u magnetski spregnutim konturama. Ostali parametri groma nisu od tolike važnosti za koordinaciju izolacije elektroenergetskih objekata.

### c) Količina elektriciteta

Količina elektriciteta predstavlja merilo energije koja se prenosi atmosferskim pražnjenjem. Ova veličina je značajna za procenu termičkih efekata radi sprečavanja topljenja metalnih površina usled udara groma.

U tablici 3.6 prikazane su statističke vrednosti količine elektriciteta prvog udara i ukupne količine elektriciteta kompletног pražnjenja pod pretpostavkom da su i ove veličine rasporedjene po logaritamsko-normalnom zakonu, prema [14].

Pri razmatranju količine elektriciteta atmosferskih pražnjenja razlikuje se **udarna količina elektriciteta** ( $Q_{ud}$ ) koja se odnosi samo na deo pražnjenja koji se odlikuje brzom promenom struje i **količina elektriciteta pražnjenja** ( $Q$ ), koja se odnosi na kompletну količinu elektriciteta pri udaru i obuhvata dugotrajnu struju pražnjenja koja ima znatno manju amplitudu, ali relativno duže trajanje, a može se javiti pre i posle glavnog pražnjenja.

U tablici 3.6 dati su parametri raspodele udarne količine elektriciteta prvih negativnih, pratećih negativnih i pozitivnog kompletног pražnjenja (koje je uvek jednostruko). U tablici 3.7 dati su parametri raspodele količine elektriciteta prvih negativnih pražnjenja, kompletnih negativnih pražnjenja i pozitivnih udara.

	$Q_{ud_{sr}}$ (C)	$\sigma_{lnQ_{ud}}$
Prvi negativni udari	4,5	0,87
Prateći negativni udari	0,95	0,87
Pozitivna pražnjenja	16	1,31

Tabela 3.6: Parametri raspodele udarne količine elektriciteta

Oznake u tablicama imaju sledeće značenje:

$Q_{ud_{sr}}$  – srednja udarna količina elektriciteta,

$\sigma_{lnQ_{ud}}$  – standardno odstupanje logaritma udarne količine elektriciteta.

	$Q_{sr}$ (C)	$\sigma_{lnQ}$
Prvi negativni udari	5,2	0,93
Prateći negativni udari	1,4	1,2
Prateći kompletne udare	7,5	1,03
Pozitivna pražnjenja	80	0,86

Tabela 3.7: Parametri raspodele količine elektriciteta kompletog pražnjenja

$Q_{sr}$ —srednja količina elektriciteta,

$\sigma_{lnQ}$ —standardno odstupanje logaritma količine elektriciteta.

Može se uočiti da je količina elektriciteta pozitivnih udara znatno veća od negativnih.

#### d) Toplotni impuls kompletog pražnjenja

Toplotni impuls je veličina značajna za procenu količine topote koja se oslobadja pri proticanju struje kompletog pražnjenja kroz provodnike određenog preseka, kao i za procenu mehaničkih efekata struje groma. Prema [14] se prepostavlja da se gustina raspodele verovatnoće toplotnog impulsa  $A = \int i^2 dt$  može predstaviti logaritamsko-normalnom raspodelom, čiji su parametri prikazani u tablici 3.8.

	$A_{sr}(A^2 s)$	$\sigma_{lnA}$
Prvi negativni udari	$5,5 \cdot 10^4$	1,38
Prateći negativni udari	$6,0 \cdot 10^3$	1,38
Pozitivni udari	$6,5 \cdot 10^5$	1,94

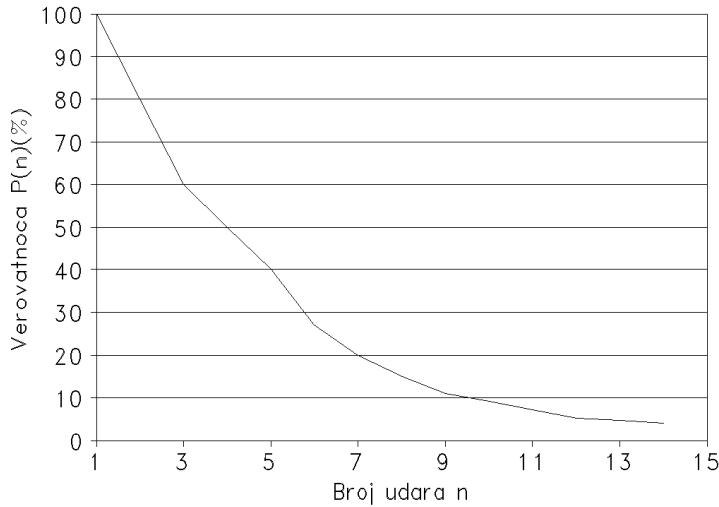
Tabela 3.8: Parametri raspodele toplotnog impulsa  $A = \int i^2 dt$  ( $A^2/s$ )

Može se uočiti da je toplotni impuls pozitivnih udara više od 10 puta veći nego kod negativnih udara.

#### e) Broj pražnjenja u jednom udaru groma

Većina atmosferskih pražnjenja ima višestruku prirodu. Zato je uveden pojam kompletog pražnjenja koji obuhvata celokupan proces višestrukih uzastopnih pražnjenja i pojam pojedinačnog udara koji obuhvata svako pojedinačno pražnjenje u procesu kompletog pražnjenja.

Na slici 3.12 prikazana je na ordinatnoj osi verovatnoća pojave pražnjenja sa većim brojem komponentnih udara od zadatog broja udara  $n$  prikazanih na apcisnoj osi.



Slika 3.12: Verovatnoća pojavljivanja pražnjenja sa većim brojem udara od zadatog na apcisnoj osi

### 3.3.2 Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja daju informaciju o grmljavinskoj aktivnosti na nekom području. Mogu se podeliti na dve grupe:

- Opšti meteorološki parametri pražnjenja,
- Parametri pražnjenja vezani za elektroenergetske objekte.

#### a) Opšti meteorološki parametri atmosferskih pražnjenja

Jedan od najčešće korišćenih opštih meteoroloških parametara atmosferskih pražnjenja koji služi kao merilo grmljavinske aktivnosti na nekom području je keraunički nivo.

Keraunički nivo  $T_d$  se definiše kao prosečan broj dana sa grmljavinom u toku jedne godine na određenom području. Određuje se osmatranjem.

Osnovni nedostatak korišćenja kerauničkog nivoa kao jedinog merila grmljavinske aktivnosti je nedostatak podataka o intenzitetu grmljavinske aktivnosti.

Ovaj podatak se može dobiti na osnovu gustine pražnjenja u zemljinu površinu. Dnevna gustina pražnjenja  $N_d$  predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u toku jednog grmljavinskog dana u horizontalnu površinu zemlje po  $km^2$ . Godišnja gustina pražnjenja  $N_g$  predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u zemlju u toku jedne godine po  $km^2$ .

Postoji sledeća veza izmedju godišnje gustine pražnjenja, dnevne gustine pražnjenja i kerauničkog nivoa:

$$N_g = N_d T_d \quad (3.21)$$

Gustina pražnjenja se može određivati osmatranjem, korišćenjem brojača pražnjenja ili postavljanjem stanica za lokalizaciju mesta pražnjenja. Osmatranjem se može dobiti broj pražnjenja samo približno za manju teritoriju dok se sistematskim praćenjem grmljavinske aktivnosti pomoću brojača pražnjenja može dobiti relativno tačna slika o grmljavinskoj aktivnosti na jednoj teritoriji.

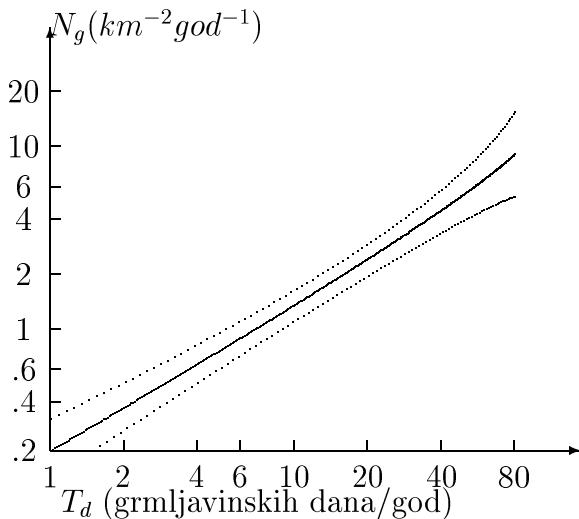
Stanice za lokalizaciju pražnjenja daju informaciju i o mestu na kome se pražnjenje dogodilo, ali zahtevaju velika ulaganja u razvoj i održavanje mreže stanica za praćenje grmljavinske aktivnosti.

Da bi se dobila informacija o godišnjoj gustini pražnjenja za teritoriju zemlje u kojoj se ne vrši instrumentalno određivanje ovog parametra, može se koristiti približna empirijska formula za dobijanje gustine pražnjenja na osnovu kerauničkog nivoa [35]:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25} \quad (3.22)$$

Na slici 3.13 prikazani su rezultati registracije za četvorogodišnji period i registrovanih 310 pražnjenja za koje je izvedena empirijska formula 3.22. Može se uočiti korelacija izmedju kerauničkog nivoa datog na apcisnoj osi i gustine pražnjenja date na ordinati. Na osnovu te korelacije izvedena je formula 3.22.

Ovakve empirijske formule mogu biti od velike koristi pri određivanju ugroženosti pojedinih objekata od atmosferskih pražnjenja, ali ih treba stalno korigovati u skladu sa povećanjem broja uzoraka pri sistematskom praćenju i registrovanju atmosferskih prenapona.



Slika 3.13: Zavisnost godišnje gustine atmosferskih pražnjenja od kerauničkog nivoa

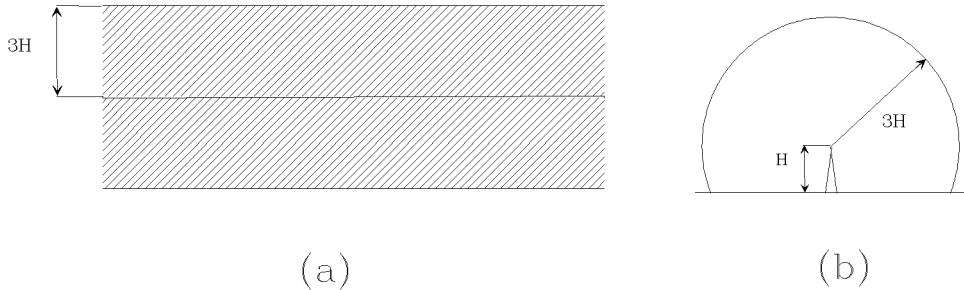
### b) Broj pražnjenja u elektroenergetske objekte

Pri proučavanju ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih pražnjenja najvažnije je proceniti očekivani broj pražnjenja u vodove. Pri tome se prepostavlja da je poznata godišnja gustina pražnjenja u ravnu površinu zemlje  $N_g[1/(km^2, god)]$ . Prema [36] se može smatrati da je širina zone privlačnog dejstva dalekovoda za atmosferska pražnjenja (širina trase izloženosti) srazmerna visini dalekovoda. Usvaja se da je koeficijent srazmere  $k = 3$  za vodove, a  $k = 3,5$  za stubove. Trasa izloženosti prostire se simetrično na obe strane voda, kao na slici 3.14.

Na slici 3.14 (a) prikazana je horizontalna površina zemlje koja je ekranizovana atraktivnim dejstvom dalekovoda. Sva atmosferska pražnjenja koja bi se dogodila u zemlju unutar šrafirane površine završiće se na provodnicima ili zaštitnim užadima dalekovoda.

Na slici 3.14 (b) prikazan je efekat privlačnog dejstva voda. Smatra se da udar groma završava na vodu ako se glava skokovitog lidera pred poslednji skok nalazi unutar cilindra poluprečnika  $kH$ , gde je  $H$  prosečna visina dalekovoda. Ostali udari se odvijaju u zemlju ili okolne objekte. Veličina  $kH$  naziva se visinom orientacije groma. Na slici 3.14 usvojen je koeficijent  $k = 3$ .

Godišnji broj pražnjenja na 100 km voda može se proceniti na osnovu ovakvog prikaza korišćenjem sledećeg izraza:



Slika 3.14: Zona izloženosti nadzemnog voda

$$n_{1god,100km} = 2 \cdot 3 \cdot H \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot N_g = 0,6HN_g \quad (3.23)$$

gde su:

$H$  – prosečna visina voda (m)

$N_g$  – godišnja gustina pražnjenja po  $km^2$ .

Prema [36] broj pražnjenja u horizontalni nadzemni vod dužine 100 km za 100 grmljavinskih časova može se približno izračunati primenom sledećeg izraza:

$$n_{100h,100km} = 5H_{uz} + H^2/30 + b \quad (3.24)$$

Ako se pretpostavi da jedan grmljavinski dan ima u proseku 1,5 grmljavinskih časova, može se dobiti izraz za godišnji broj udara na 100 km dalekovoda u zavisnosti od kerauničkog nivoa:

$$n_{1god,100km} = 1,5 \left( \frac{H_{uz}}{20} + \frac{H^2}{3000} + \frac{b}{100} \right) T_d \quad (3.25)$$

gde su:

$H_{uz}$  – srednja visina zaštitnog užeta (m),

$b$  – rastojanje izmedju zaštitnih užadi ili faznih provodnika (ako je vod bez zaštitnih užadi) ( $m$ ). Ovo rastojanje se zove efektivna širina voda,

$H$  – srednja visina faznih provodnika ( $m$ ).

Primenom sledećeg empirijskog izraza [14] može se izračunati godišnji prosečan broj udara u vod dužine  $100 \text{ km}$ :

$$n_{1god,100km} = 0,1(2R_a + b)N_g \quad (3.26)$$

gde je:

$R_a$  – prosečna veličina privlačnog rastojanja u ( $m$ ), koje se može izračunati iz izraza:

$$R_a = 16,3H_{uz}^{0,61} \quad (3.27)$$

Modifikacija ovog izraza prikazana je u [16]. Godišnji broj udara u vod dužine  $100 \text{ km}$  po modifikovanom izrazu u zavisnosti od kerauničkog nivoa dat je relacijom:

$$n_{1god,100km} = 0,004T_d^{1,35}(b + 4H_{uz}^{1,09}) \quad (3.28)$$

Najnovija modifikacija izraza 3.28 prikazana u [45] data je relacijom:

$$n_{1god,100km} = 0,1N_g(b + 28H_{uz}^{0,6}) \quad (3.29)$$

Zbog različitih klimatskih uslova, nedovoljnog broja uzoraka i uslova osmatranja, rezultati različitih autora pokazuju relativno velika odstupanja. U tablici 3.9 dato je uporedjenje godišnjeg broja atmosferskih pražnjenja na  $100 \text{ km}$  dalekovoda prema različitim autorima pod sledećim predpostavkama:

- Keraunički nivo  $T_d = 30$  dana,
- Godišnja gustina pražnjenja  $N_g = 2,8 \text{ } 1/(km^2, god)$ ,
- Razmak izmedju zaštitnih užadi  $b = 22 \text{ } (m)$ ,
- Visina zaštitnog užeta  $H_{uz} = H + 7 \text{ } (m)$ ,
- Visina faznih provodnika  $H$  se varira.

$H(m)$	20	30	40
izraz br.3.23	52,92	72,52	92,12
izraz br.3.25	76,65	106,65	139,65
izraz br.3.26	74,32	88,75	101,74
izraz br.3.28	66,01	89,51	113,59
izraz br.3.29	62,80	74,59	85,15

Tabela 3.9: Godišnji broj udara u 100 km nadzemnog voda prema empirijskim formulama raznih autora

Može se uočiti da se izračunati broj udara prema različitim izrazima razlikuje, što pokazuje da je neophodno nastaviti istraživanja i odrediti pogodan empirijski izraz za inženjersku praksu. Ipak se može utvrditi da svi ovi izrazi daju orientacione rezultate koji su istog reda veličine i mogu korisno da posluže za grubu procenu ugroženosti elektroenergetskih objekata od atmosferskih prenapona.

