

Техника на висок напон 2

ЗАШТИТА ОД ДИРЕКТНИ УДАРИ НА ГРОМ

М. Тодоровски

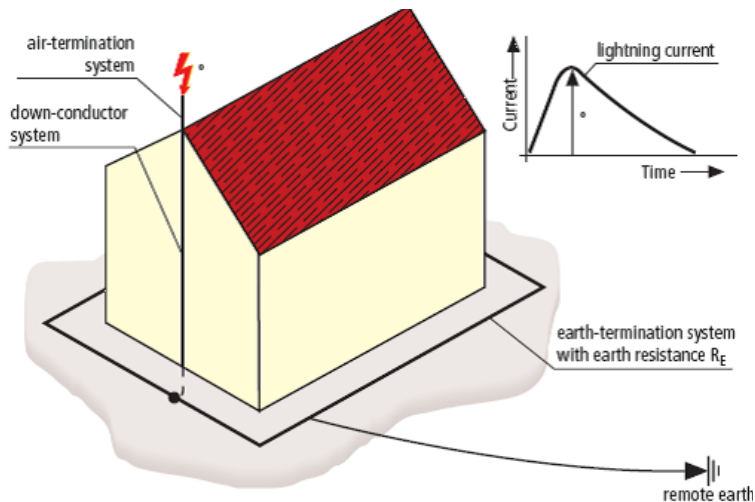
Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

`mirko@feit.ukim.edu.mk`
`pees.feit.ukim.edu.mk`

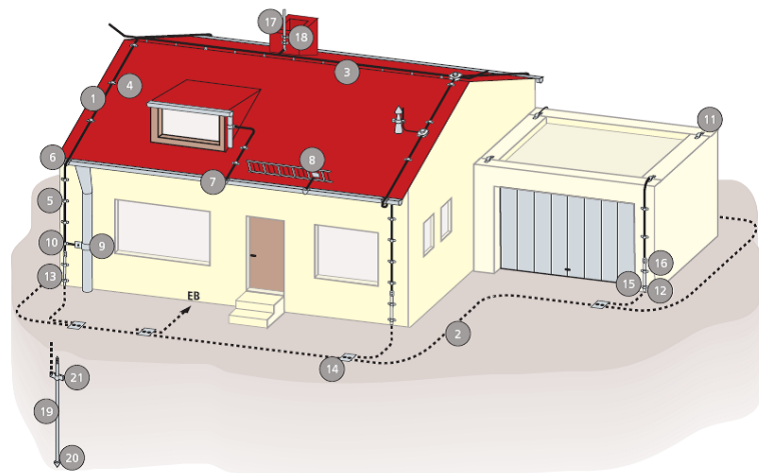
Скопје, 2015

- Заштитата на објектите од директни удари на гром се прави со надворешна громобранска инсталација (громобрани),
- Громобраните почнале масовно да се применуваат по истражувањата што ги направил Бенџамин Франклин кон крајот на 18 век,
- Громобранот се состои од
 - ▶ приемник или фаќалка на громот,
 - ▶ одвод на струјата на громот,
 - ▶ заземјувач.

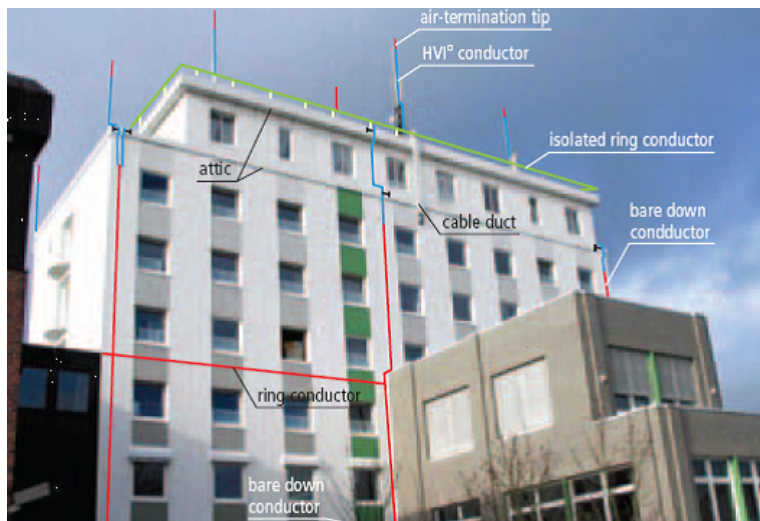
Основни елементи на громобран на еден станбен објект



Приказ на надворешна громобранска инсталација на станбен објект



Изглед на комплетната надворешна громобранска инсталација на зграда



Поделба на громобраните

Според типот громобраните ги делиме на

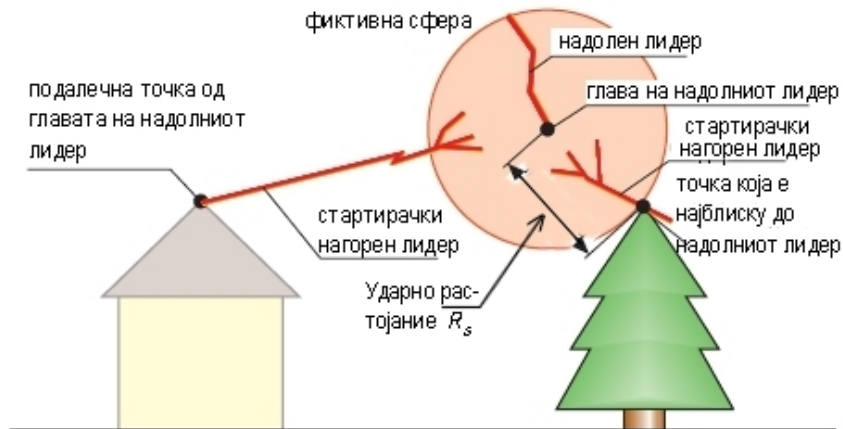
- стапести громобрани: се изведуваат во вид на вертикално поставени стапови кои преку одводи се поврзуваат со заземјувачот,
- земјоводни (заштитни) јажиња: се изведуваат во вид на хоризонтално затегнати јажиња кај кои улогата на одводот ја играат металните столбови за кои тие се прицврстени.

Ако приемникот (стап или јаже) е поставен на изолациони носачи (кај оџаци, водови со дрвените столбови ...), тогаш на таквите носачи треба да се постават посебни спроводници коишто го поврзуваат приемникот со заземјувачот.

Заштитно дејство на громобраните

- Заштитното дејство на громобраните е резултат на фактот што громот ги погодува пред сè високите објекти,
- На големи височини громот се движи скоковито и хаотично („без идеја каде ќе удри“), на одредена висина (висина на ориентација) громот почнува да се ориентира во насока на највисокиот објект,
- Ако главата на громот на височината на ориентација се наоѓа во точка која е поставена над громобранот, тогаш тој ќе удри во громобранот,
- Ако доволно блиску до громобранот се наоѓа понизок објект тој ќе биде заштитен од директните удари на гром,
- За сигурна заштита на објектот потребно е добро заземјување.

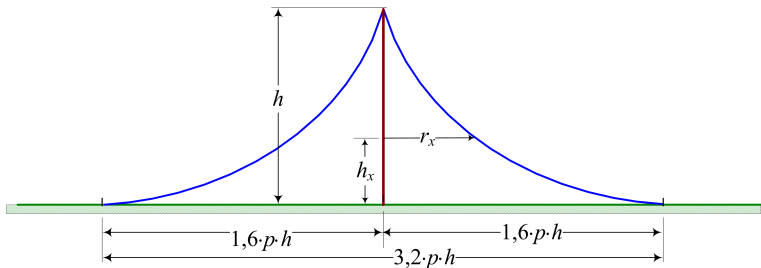
Објаснување на поимот „ударно растојание“



Заштитни зони на громобраните

- Простор околу громобранот во кој ударите на гром врз објектот кој треба да се штити ќе бидат многу малку веројатни,
- Громобраните обезбедуваат заштита на објектот со одреден степен на доверливост кој оди до доверливост 99,9%,
- Заштитните зони на громобраните обично се определуваат по експериментален пат на модели. Се смета дека заштитните зони на реалните громобрани се геометриски слични со зоните добиени за лабораториски модели.

Заштитна зона на стапест громобран

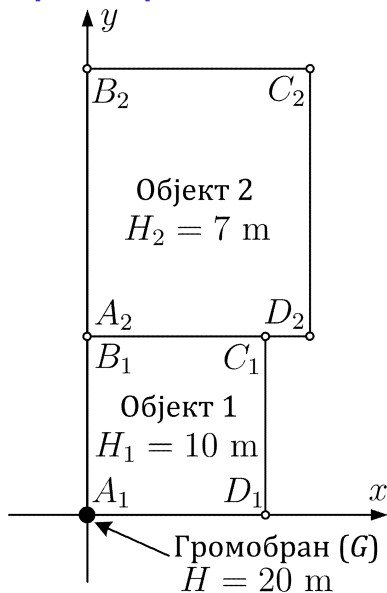


Ротациона површина околу громобранот, во вид на шатор, чија генератриса е дадена со емпириска формула:

$$r_x = p \cdot \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x/h}, \quad h_x = h \cdot \frac{1,6 \cdot p h - r_x}{1,6 \cdot p h + r_x}$$

$$p = 1 \text{ за } h \leq 30 \text{ m}, \quad p = \sqrt{30/h} \text{ за } h = 30 \div 100 \text{ m}.$$

Пример со еден стапест громобран



Објект 1: $8 \times 8 \times 10$

Објект 2: $10 \times 12 \times 7$

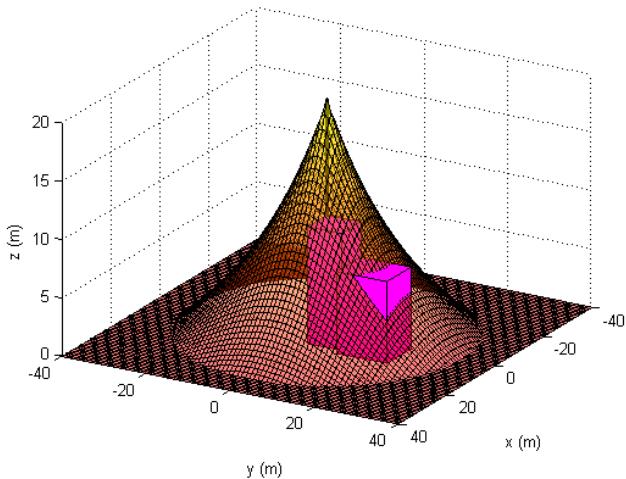
Точка	$x \text{ (m)}$	$y \text{ (m)}$	$z \text{ (m)}$
A_1	0	0	10
B_1	0	8	10
C_1	8	8	10
D_1	8	0	10
A_2	0	8	7
B_2	0	20	7
C_2	10	20	7
D_2	10	8	7
G	0	0	20

Проверка на заштитеност на точките

$$r_x = \sqrt{(x - x_G)^2 + (y - y_G)^2} = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$h_x = h \cdot \frac{1,6 \cdot ph - r_x}{1,6 \cdot ph + r_x}$$

Точка	r_x (m)	h_x (m)	z (m)	$h_x > z$
A_1	0,00	20,00	10	да
B_1	8,00	12,00	10	да
C_1	11,31	9,55	10	не
D_1	8,00	12,00	10	да
A_2	8,00	12,00	7	да
B_2	20,00	4,62	7	не
C_2	22,36	3,55	7	не
D_2	12,81	8,57	7	да

Заштитна зона во 3D



Одредување висина на еден стапест громобран

За претходниот пример да се одреди висината на стапестиот громобран така што точката C_2 ќе биде заштитена.

$$h_x = h \cdot \frac{1,6 \cdot ph - r_x}{1,6 \cdot ph + r_x}$$
$$7 = h \cdot \frac{1,6 \cdot h - 22,36}{1,6 \cdot h + 22,36}$$

$$h \cdot (1,6 \cdot h - 22,36) - 7 \cdot (1,6 \cdot h + 22,36) = 0$$

$$1,6 \cdot h^2 - 33,56 \cdot h + 156,52 = 0$$

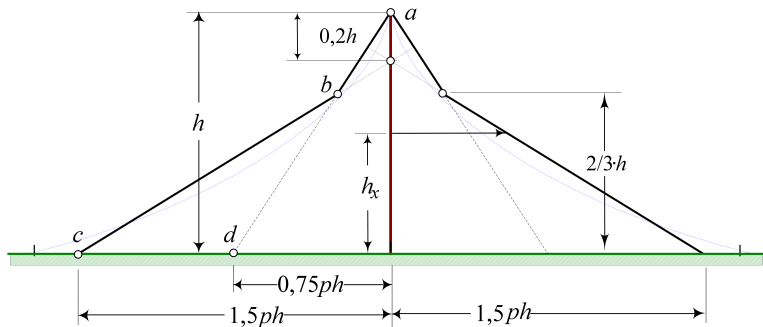
$$h_1 = 24,90 \text{ m} \quad h_2 = -3,39 \text{ m}$$

```
>> solve('h*(1.6*h - 22.36)/(1.6*h + 22.36) - 7')
```

```
ans =
```

```
24.903208662774785696602048432974  
-3.9282086627747856966020484329743
```

Упростена заштитна зона на стапест громобран



$$r_x = \begin{cases} 1,5 \cdot p \cdot h \cdot \left(1 - 1,25 \cdot \frac{h_x}{h}\right) & h_x \leq \frac{2h}{3} \\ 0,75 \cdot p \cdot h \cdot \left(1 - \frac{h_x}{h}\right) & h_x > \frac{2h}{3} \end{cases}$$

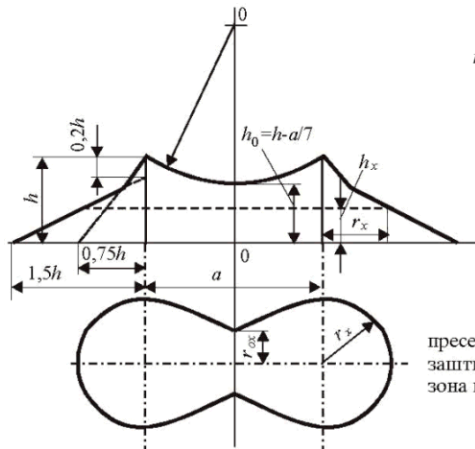
Заштитна зона на два стапести громобрана (1)

- Заштитната зона на два стапести громобрана е значително поголема од збирот на заштитните зони на два единични громобрана,
- Точката на површината на земјата на средината помеѓу громобраните нема да биде погодена од гром двата громобрана се наоѓаат на меѓусебно растојание $a \leq 7h$,
- За да се заштити точка која што се наоѓа на средината помеѓу громобраните на височина h_0 , тогаш растојанието помеѓу громобраните треба да изнесува $a \leq 7p \cdot (h - h_0)$,
- Точка која што се наоѓа на височина h_0 и е на средината помеѓу громобраните нема да биде погодена од гром ако е исполнето $h_0 \leq h - \frac{a}{7p}$.

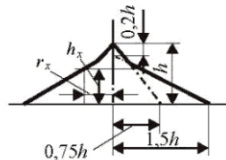
Заштитна зона на два стапести громобрана (2)

- Внатрешниот дел од заштитната е дел од круг низ три точки: врвовите на громобраните и точката на височина h_0 ,
- Надворешниот дел од заштитната зона, лево и десно од громобраните, се определува исто како и кај единичен стапест громобран.

Заштитна зона на два стапести громобрана (3)



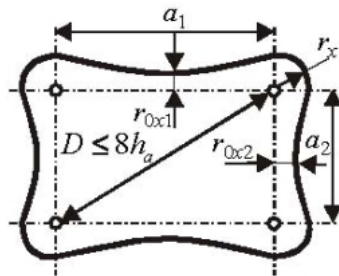
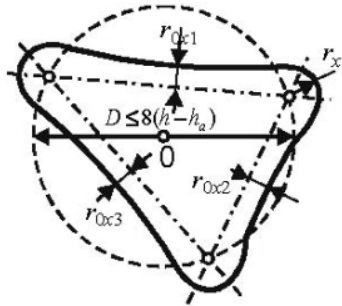
$$r_{0x} = r_x \cdot \frac{7 \cdot (h - h_x) - a}{12,5 \cdot (h - h_x) - a} \cdot \frac{12,5}{7}$$



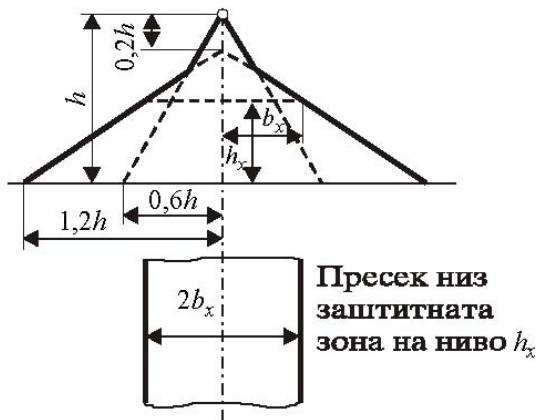
пресек низ
заштитната
зона на ниво h_x

Заштитна зона на три или повеќе стапести громобрани

Објект со височина h_x кој е внатре во триаголникот или во правоаголникот во чии врвови се поставени громобрани ќе биде заштитен од удари на гром ако дијаметарот D на кругот што минува низ врвовите на триаголникот односно дијагоналата D на правоаголникот го задоволува условот $D \leq 8p \cdot (h - h_x)$.



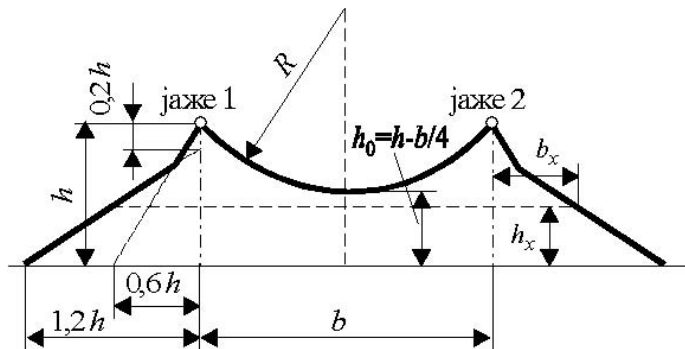
Заштитна зона на едно земјоводно јаже



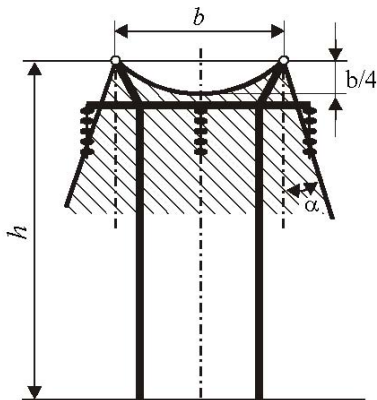
$$b_x = \begin{cases} 0,6h \cdot \left(1 - \frac{h_x}{h}\right) & h_x \geq \frac{2h}{3} \\ 1,2h \cdot \left(1 - 1,25 \cdot \frac{h_x}{h}\right) & h_x < \frac{2h}{3} \end{cases}$$

Заштитна зона на две земјоводни јажиња

- Внатрешниот дел од заштитната е дел од круг низ три точки: двете јажиња и точката на височина $h_0 = h - \frac{b}{4p}$,
- Надворешниот дел од заштитната зона, лево и десно од јажињата, се определува исто како и кај едно јаже.



Заштитен агол на две јажиња кај преносен вод



- Услов за заштита на средниот фазен спроводник

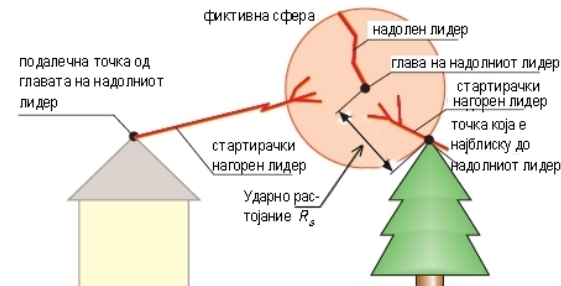
$$b \leq 4p \cdot (h - h_x) = 4p \cdot (h_{zj} - h_{faza}),$$

- Условот за заштита на надворешен фазен спроводник е даден преку величината заштитен агол

$$\alpha = \arctg \frac{0,6h}{h} = 31^\circ.$$

Електрогеометриски модел (ЕГМ)

- Во основа на електрогеометриски модел е концептот на *ударно растојание*,
- Одејќи надолу надолниот лидер во еден момент „одлучува“ каде ќе удри: тоа е објектот до кој растојанието од главата на лидерот е еднакво на ударното растојание,



Пресметување на ударно растојание

- Со лабораториски експерименти е утврдено дека ударното растојание R_s зависи од количеството на полнеж, или посредно, од темената вредност на струјата на громот I_m :

$$R_s = K \cdot I_m^n$$

- Од практични причини е општо прифатено дека пресметките на загрозеноста од директен удар треба да се вршат со

$$R_s = 10 \cdot I_m^{0,65}$$

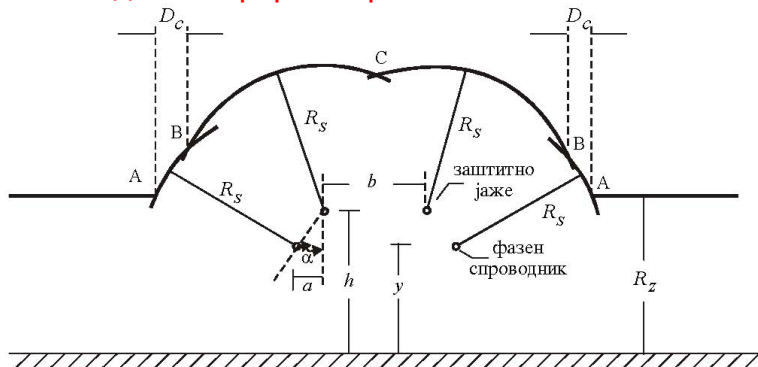
- Пример: гром со $I_m = 10 \text{ kA}$ одејќи надолу ќе удри во објект кој е далеку $R_s = 44,7 \text{ m}$ од него.

Облик на атрактивна површина

- Атрактивната површина за нивото на земјата е рамнина паралелна со земјата на растојание R_s од неа,
- Атрактивната површина за една точка е сфера со радиус R_s ,
- Атрактивната површина за хоризонтален спроводник (заштитното јаже) е цилиндрична површина со радиус R_s , која на двата краја завршува со полутопки со ист радиус,
- Во случај на повеќе објекти атрактивните површини можат да се сечат, односно дел од една атрактивна површина може да биде покриен со друга.

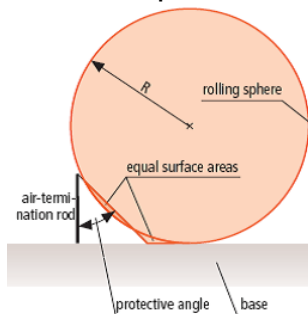
Атрактивна површина кај надземен вод

Доколку надолниот лидер го допре лакот \widehat{AB} ударот ќе заврши во еден од фазните спроводници. Доколку допре некоја точка од лакот \widehat{BC} ударот ќе заврши во заштитно јаже. Лакот \widehat{AB} е мерка за веројатноста за отказ на заштитата од атмосферски празнења.

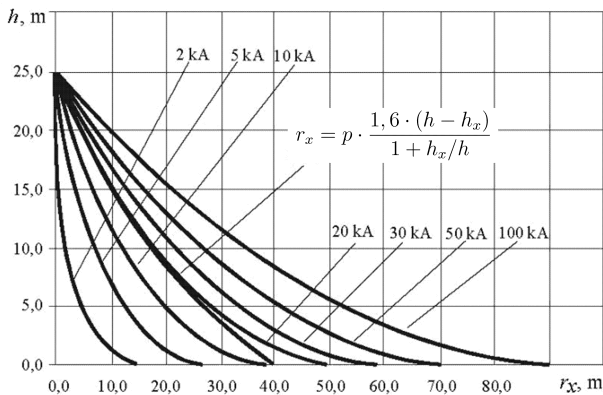


Вертикален стапест громобран според ЕГМ

- Се усвојува I_m и се пресметува R_s ,
- Топка со радиус R_s се ротира околу громобранот така што истовремено ги допира земјата и громобранот,



Заштитни зони на еден стапест громобран со височина $h = 25$ m



Формулата $r_x = p \cdot \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x/h}$ дава слични резултати за $I_m = 10 \div 20$ kA.

Ефикасност на заштитата кај надземен вод

- Водовите се изложени на директни удари десетици пати во текот на годината. Затоа и многу малата веројатност за продори на громот и отказ на заштитата има битно значење за сигурноста на погонот на самиот вод,
- Растојанието D_c е мерка на веројатноста да откаже заштитата од атмосферски празнења на водот при определена вредност на струјата I ,
- Нивото на откази на заштитата се означува со SFR (shielding failure rate) и тоа изнесува

$$\text{SFR} = 2 \cdot L \cdot N_g \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} D_c(I) \cdot f(I) \cdot dI \quad (\text{обично } I_{\min} = 3 \text{ kA})$$

каде што $f(I)$ е густина на веројатноста на распределбата на струјата на громот.

Ниво на прескоци на изолацијата на водот

- Нивото на прескоци на изолацијата на водот како последица од директни удари на гром во фазните спроводници се бележи со SFFR (shielding failure flashover rate),
- Најнапред се пресметува минималната вредност на струјата на громот која што ќе предизвика прескок

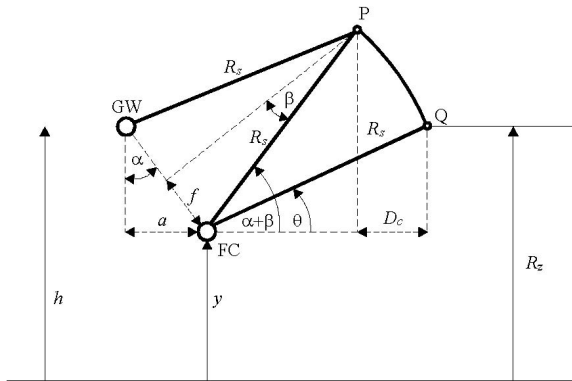
$$I_{\min} = 2 \cdot \frac{U_{50\%}}{Z_C}, \text{ (за каналот на громот } Z_C^{\text{гром}} = \infty)$$

каде што Z_c е бранова импеданција на фазниот спроводник, $U_{50\%}$ е импулсната цврстина на изолацијата,

- $$\text{SFFR} = 2 \cdot L \cdot N_g \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} D_c(I) \cdot f(I) \cdot dI.$$

Совршен заштитен агол

- Ако $I_{\min} = I_{\max}$, тогаш $SFFR = 0$, со што може да се каже дека кај таквите водови постои совршен заштитен агол,
- При струја на громот $I = I_{\max}$ се добива $D_c = 0$. За I_{\max} важи $\log I_{\max} = \frac{1}{0,65} \cdot \log \frac{R_{s,\max}}{10}$ $R_{s,\max} = \frac{h + y}{2 \cdot (1 - \sin \alpha)}$



Пресметка на совршен заштитен агол

$$D_c = R_s \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\theta = \arcsin \frac{R_s - y}{R_s}$$

$$\beta = \arctg \frac{\sqrt{a^2 + (h - y)^2}}{2R_s}$$

$$R_{s,\min} = 10 \cdot I_{\min}^{0,65}$$

$$\alpha_{\text{perfect}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\arcsin \frac{R_{s,\min} - h}{R_{s,\min}} + \arcsin \frac{R_{s,\min} - y}{R_{s,\min}} \right)$$

Симулација Монте Карло

- Симулацијата Монте Карло е нумерички метод кој служи за решавање на проблеми во кои има случајни променливи,
- Методот го носи името на градот познат по своите касина, што е асоцијација на сличноста на методот со рулетот кој претставува механичка направа за генерирање на случајни броеви,
- Методот е лесно применлив кај сложени проблеми, опишани со комплицирани равенки, кои не може да се решат аналитички со класични математички постапки,
- Практично не постои толку сложен проблем кој не би можел да се реши со симулација. Единствен ограничувачки фактор е потребното пресметковно време.

Тек на симулацијата

- Симулацијата се состои во повеќекратно повторување на пресметки за одреден проблем во кој случајните променливи добиваат случајни броеви,
- Во секоја пресметка (која се вика и експеримент) се проверува дали е исполнет некој услов или се пресметува бројна вредност на одредена величина,
- Резултатите од секој експеримент се меморираат, при што се брои колку пати е исполнет некој услов или се меморира вредноста на одредена величина,
- Откако ќе се извршат сите експерименти (вкупно N_e , кој е од редот на повеќе илјади) се прави статистичка обработка на пресметаните вредности: се пресметува веројатност за исполнување на одреден услов, средна вредност и стандардна девијација на одредена величина и слично.

Генерирање на случајни броеви

- За случајните величини кои се рамномерно распределени или ја следат нормалната распределба се користат готови генератори на случајни броеви, на пример `rand` и `randn` во Matlab,
- За генерирање на случајни броеви со произволен закон на распределба $f(x)$ прво се генерира нормално распределен случаен број r , а потоа се пресметува $f^{-1}(r)$,
- Ако за распределбата на амплитудата на струјата на громот важи $f(I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2,6}}$ тогаш случајна вредност на струјата со таков закон на распределба може да се добие со изразот $I_m = 31 \cdot \left(\frac{1-r}{r} \right)^{1/2,6}$.

Задачи од областа на теорија на веројатност

- Два пријатели се договориле да се најдат на плоштад. Тие се договориле да се сретнат меѓу 9 и 10 часот, при што не се знае кој кога ќе пристигне. Откако еден ќе пристигне треба да чека 30 минути за да дојде другиот, во спротивно си оди. Колкава е веројатноста да се сретнат?
- Во еден автобус има 50 луѓе. Колкава е веројатноста двајца од нив да се родени на ист датум? (Да се игнорира постоењето на престапна година).

Два пријателя

```
1 function p = dva_prijatela(DT,Ne)
2 % DT e vreme za cekanje (min), Ne e broj na eksperimenti
3 p = 0;
4 DT = DT/60;
5 for i = 1:Ne
6     T = rand(2,1); % Dve slucajni vremenja
7     if abs(T(1) - T(2)) <= DT % Dali se sretnale?
8         p = p + 1;
9     end
10 end
11 p = p/Ne;
```

```
>> p = dva_prijatela(30,100000)
p =
    0.7512
```

Исти родендени

```
1 function p = ist_rodenden_grupa(N,Ne)
2 % N e broj na luge vo grupata, Ne e broj na eksperimenti
3 p = 0;
4 for i = 1:Ne
5     R = ceil(365 * rand(N,1)); % N slucajni denovi na raganje
6     R = sort(R); % Sortiranje po golemina
7     isti = find(R(1:N-1) == R(2:N));
8     if size(isti,1) > 0 % Dali ima isti sosedni broevi?
9         p = p + 1;
10    end
11 end
12 p = p/Ne;
```

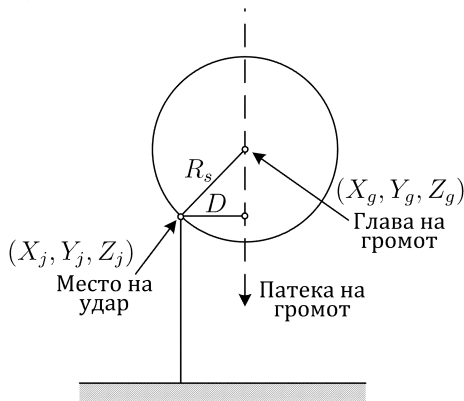
```
>> p = ist_rodenden_grupa(50,100000)
p =
    0.9694
```

Заштита на објект со громобрани

Горната површина на еден објект е зададена со 5 точки дадени во табелата. Објектот е штитен со 4 громобрани чии координати, исто така, се дадени во табелата. За распределбата на амплитудата на струјата на громот важи $f(I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2,6}}$, а ударното растојание е $R_s = 10 \cdot I^{0,65}$. Сметајќи дека не може да се појави струја над 200 kA да се пресмета колкава е веројатноста ударот на громот да заврши во објектот или во некој од громобраните.

	$X \text{ (m)}$	$Y \text{ (m)}$	$Z \text{ (m)}$
Објект	-5	-5	10
	5	-5	10
	5	5	10
	-5	5	10
	0	0	10
Громобрани	-15	-15	15
	-15	15	15
	15	15	15
	15	-15	15

Одредување на висината на главата на громот при удар во одредена точка



$$D = \sqrt{(X_g - X_j)^2 + (Y_g - Y_j)^2}$$
$$Z_g = \begin{cases} \sqrt{R_s^2 - D^2} + Z_j & R_s \geq D \\ 0 & R_s < D \end{cases}$$

Влезни податоци во Matlab

```
1 function [objekti, gromobrani, opseg_x, opseg_y] = slucaj_1()
2 objekti = [
3 % X Y Z OBJEKT
4 -5 -5 10 1
5 5 -5 10 1
6 5 5 10 1
7 -5 5 10 1
8 0 0 10 1
9 ];
10 gromobrani = [
11 % X Y Z
12 -15 -15 15
13 -15 15 15
14 15 15 15
15 15 -15 15
16 ];
17 % zona za simulacija na udari na grom
18 Hg_max = max(gromobrani(:,3));
19 Xg_min = min(gromobrani(:,1)); Xg_max = max(gromobrani(:,1));
20 Yg_min = min(gromobrani(:,2)); Yg_max = max(gromobrani(:,2));
21 opseg_x = [Xg_min-4*Hg_max Xg_max+4*Hg_max];
22 opseg_y = [Yg_min-4*Hg_max Yg_max+4*Hg_max];
```

Симулација за удари на гром (1)

```
1 function p = udar_grom(datoteka,Ne)
2 [O, G, Ox, Oy] = feval(datoteka);
3 OG = [O(:,1:3); G];
4 X = OG(:,1); Y = OG(:,2); Z = OG(:,3);
5 N = length(X); Udari = zeros(N,1);
6 for i = 1:Ne
7     % slucaen izbor na koordinatite na gromot
8     Xg = Ox(1) + rand*(Ox(2)-Ox(1));
9     Yg = Oy(1) + rand*(Oy(2)-Oy(1));
10    % slucaen izbor na strujata na gromot
11    Im = inf;
12    while Im > 200
13        r = rand; Im = 31 * ((1 - r)/r)^(1/2.6);
14    end
15    Rs = 10 * Im^0.65;
16    % rastojanija od gromot do tockite
17    D = sqrt((Xg - X).^2 + (Yg - Y).^2);
18    % visina na gromot pri koja toj ke udri vo tocka j
19    h = zeros(N,1);
20    j = find(Rs >= D); h(j) = sqrt(Rs^2 - D(j).^2) + Z(j);
21    % gormot ke udri vo tocka so maksimalno h
```

Симулација за удари на гром (2)

```
22     [hmax, jmax] = max(h);  
23     if hmax > 0  
24         Udari(jmax) = Udari(jmax) + 1;  
25     end  
26 end  
27 % verovatnost za udar vo sekoja od tockite  
28 p = 100*Udari/sum(Udari);
```

Резултати од симулацијата

```
>> p = udar_grom('slucaj_1',1e6)
p =
    0.0017
    0.0019
    0.0025
    0.0016
    0.0076
    24.9357
    25.0703
    25.0074
    24.9714
>> p_objekt = sum(p(1:5))
p_objekt =
    0.0153
>> p_gromobrani = sum(p(6:9))
p_gromobrani =
    99.9847
```

Распределба на амплитудата на струјата на гром која го погодува објектот

Во претходната симулација беше одредено само колкава е веројатноста објектот да биде погоден од удар на гром.

Освен тоа, за проценка на влијанието на ударот на громот во самиот објект е битно да се одредни со колкава амплитуда на струјата на громот тој ќе биде погоден.

Да се модифицира симулацијата така што ќе се добие информација за распределба на амплитудата на струјата на гром која го погодува објектот.