

# Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

## Типски заземјувачи на надземните водови и нивни карактеристики

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, 2017

# Основно за заземјувачите на столбовите

## Задачи на заземјувачот на еден столб

- успешно да ја одведе струјата на молњата во земјата кога ќе дојде до директно атмосферско празнење во надземниот вод, без да дојде до појава на повратен прескок и
- во случајот на еднофазна куса врска, струјата да ја спроведе во земјата така што на површината од земјата нема да се појават опасни потенцијали.
- од двете причини заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата.

## Основни карактеристики на заземјувачот

- отпорноста на распространяње  $R_Z$  за наизменична струја;
- максималната потенцијална разлика на допир  $E_{d.max}$ ;
- максималната потенцијална разлика на чекор  $E_{c.max}$ ;
- импулсната отпорност на распространяње  $R_i$  за импулсни струи, каква што е струјата на молњата.

# Технички препораки

- Техничките прописи и препораки се, во принцип, договорни правила на однесување, теориски докажани и практично проверени.
- Водат сметка за техничката сигурност на погонот, условите за безопасност и слично, а водат сметка и за економичноста и рационалноста на применетото техничко решение.
- Му оставаат на проектантот можност за широк избор темелен на проверена традиција, инженерско искуство и на интуицијата.
- Применувајќи ги препораките треба безусловно да бидат задоволени и извесни технички норми со кои се обезбедува сигурност во погонот.

## Правилник за техничките нормативи ...

„Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV“

- Избор на заземјувачи се темелеше единствено на интуицијата и инженерското искуство на проектантот.
- Отсуствуваше нормирањето на ризикот за испад на надземниот вод под дејство на атмосферските празнења.
- Не се водеше сметка за вредноста на  $\rho$  на тлото по должината на трасата од надземниот вод
- Отсуствуваше и било каква оптимизација на цената на чинењето на заземјувачкиот систем.

# Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на еднофазните куси врски

- Со изборот треба да се постигнат услови за безбедност во поглед на појавата на опасни напони на допир и чекор во непосредната околина на столбот.
- Надземните водови што се во мрежа со заземјена неутрална точка (кај нас при  $U_n \geq 110 \text{ kV}$ ) мораат да имаат уреди за брзо автоматско исклучување при земјоспој.
- Околу секоја стопа од темелот на столбот треба да се постави 1 или 2 прстена со најмала длабочина на вкопување од 0,5 m.
- Ако се поставува и уште еден дополнителен прстен околу сите 4 стопи на темелот неговата големина и позиција во однос на стопите од темелот треба да биде таква што ќе се постигне поволно обликување на потенцијалот.

# Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на еднофазните куси врски

- Ако водот е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување, тогаш напоните на чекор и допир не се поставуваат како критериум.
- Самата мерка на брзо автоматско исклучување и обликувањето на потенцијалот околу столбот со помош на прстените се сметаат за доволни.
- Ако водот не е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување како и во мрежи со незаземјена неутрална точка или заземјена преку придушница треба да се исполни

$$R_Z \leq \frac{U_Z}{I_Z},$$

каде што е  $U_Z = 125 \text{ V}$  најголем дозволен напон на столбот, додека  $I_Z$  е струја што се одведува во земјата на местото на земјоспојот.

- ▶ Во многу ситуации што се среќаваат на теренот овој услов е премногу тешко да да биде исполнет.

# Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на атмосферските празнења

- При удар на гром во столбот или во заштитното јаже, се јавува опасност од појава на повратен прескок кога под дејство на громот доаѓа се појавува напон што ја надминува импулсната цврстина на изолација (над „поднослив напон“  $U_{\text{подн}}$ ).
- Задача на заземјувачите е да се спречи или да се намали веројатноста за појава на повратен прескок на изолацијата при удар на гром во столбот или во заштитното јаже.
- Се смета дека повратен прескок не е веројатен ако за големината на отпорноста на распространување на заземјувањето е исполнето

$$R_Z \leq \frac{U_{\text{подн}}}{I_M},$$

# Распределба на амплитудите на струјата на громот

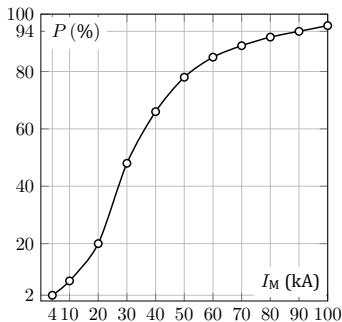
|                          |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ударна струја $I_M$ (kA) | 5  | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| Веројатност $P(I_M)$ (%) | 14 | 40 | 62 | 79 | 91 | 95 | 98 | 99 |

- Од табелата следува дека со 95% сигурност можеме да очекуваме дека  $I_M \leq 40$  kA.
- За 110 kV водови вообичаено е  $U_{\text{подн}} = 496$  kV
- Следува дека ако  $R_Z \leq U_{\text{подн}}/I_M = 496/40 = 12,4 \Omega$ , тогаш со ризик од само 5% можеме да очекуваме дека при удар на гром во столбот нема да дојде до повратен прескок.



# Распределба на амплитудите на струјата на громот – CIGRE

|                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Струја $I_M$ (кА) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Веројатност (%)   | 7  | 20 | 48 | 66 | 78 | 85 | 89 | 92 | 94 | 96  |



Кумулативна веројатност на распределба на струјата на молњата

# Техничка препорака ТП-9

- Металните и армиранобетонските столбови треба да се заземјат, за секој столб посебен заземјувач.
- Столбовите од дрво или од друг изолационен материјал не се заземјуваат, освен во кога имаат заштитно јаже, заштита од удар на гром, одводници на пренапони и слично.
- Металните конзоли на дрвените столбови како и металните основи на линиските разделувачи не се заземјуваат.
- Заземјувачите се положуваат на длабочина од околу 0,7 m. Кај заземјувачите со 2 прстена, првиот прстен се закопува на 0,7 m и на 1 m од столбот, вториот се закопува на 1 m и на 2 m од столбот.
- Заземјувачите се изведуваат со прстени, во форма на ѕвезда со повеќе краци или нивна комбинација.

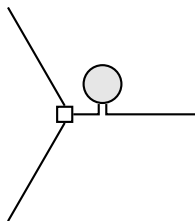
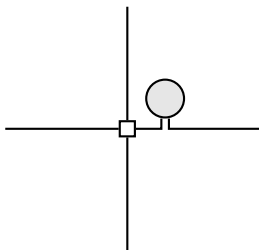
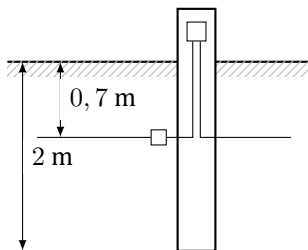
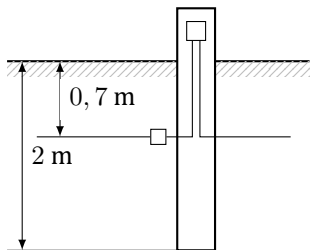
# Критериуми за димензионирање на заземјувачите

- Основен критериум е заштитата на водот од повратни прескоци при удари на гром во столбот или во заштитното јаже. Во посебни случаи треба да се задоволи и критериумот за заштита од превисоки напони на допир.
- Се смета дека е постигнато задоволително ниво на заштита од повратни прескоци ако ударната (импулсната) отпорност на заземјување е  $R_Z < 15 \Omega$ . Ако ова не може да се постигне треба да се засили изолацијата.
- Услови за безопасност од превисоки напони
  - ▶ кај столбови кои се наоѓаат на терени како што се: јавни базени, кампови, детски игралишта и др. без разлика на напонското ниво на водот и начинот на заземјување на неутралната точка;
  - ▶ кај столбови кои се наоѓаат на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, кога неутралната точка на мрежата е изолирана;
  - ▶ кај столбови на кои се наоѓаат линиски разделувачи.

# Типски заземјувачи на столбовите од НВ

- Зракасти заземјувачи
- Прстенести заземјувачи
- Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи
- Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон

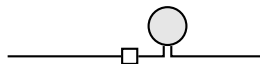
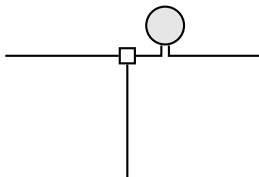
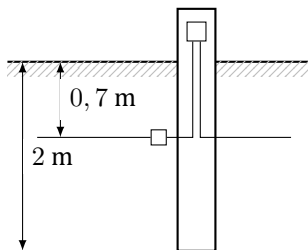
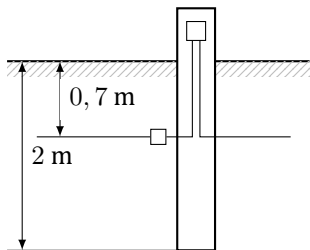
# Зракасти заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата L4

Скица на заземљувач од фамилијата L3

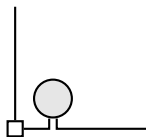
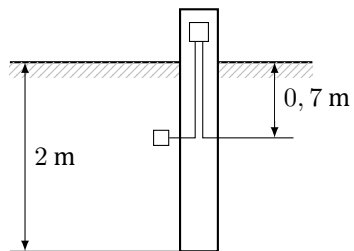
# Зракасти заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата LT3

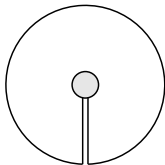
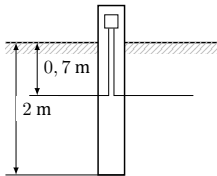
Скица на заземљувач од фамилијата L2

# Зракасти заземјувачи

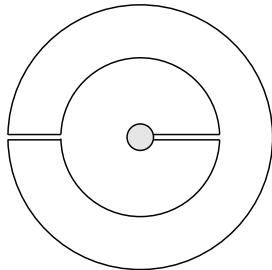
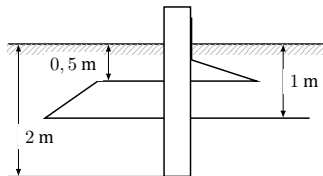


Скица на заземјувач од фамилијата LT2

# Прстенести заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата P1

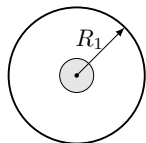


Скица на заземљувач од фамилијата P2



# Комбинирани прстенести-зракасти заз.

$$R_1 = \text{const.}$$
$$h_1 = 0,7 \text{ m}$$



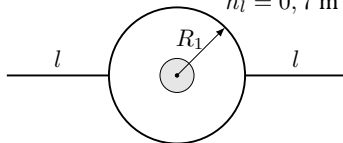
а) Тип К1

$$R_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$l = \text{var.}$$

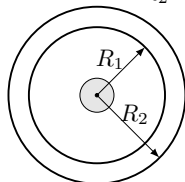
$$h_1 = 0,7 \text{ m}$$

$$h_l = 0,7 \text{ m}$$



б) Тип К1L2

$$R_1 = 1,2 \text{ m } h_1 = 0,5 \text{ m}$$
$$R_2 = \text{var } h_2 = 0,7 \text{ m}$$

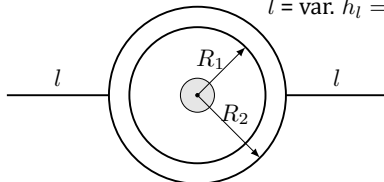


в) Тип К2

$$R_1 = 1,2 \text{ m } h_1 = 0,5 \text{ m}$$

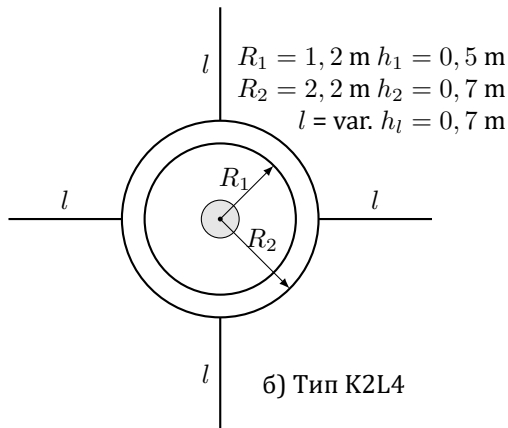
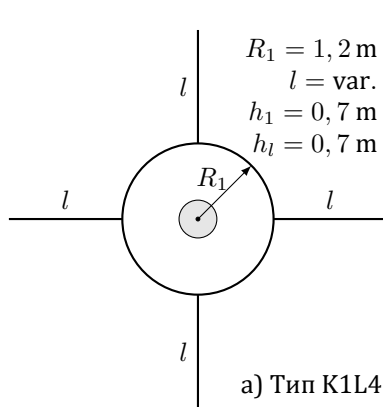
$$R_2 = 2,2 \text{ m } h_2 = 0,7 \text{ m}$$

$$l = \text{var. } h_l = 0,7 \text{ m}$$

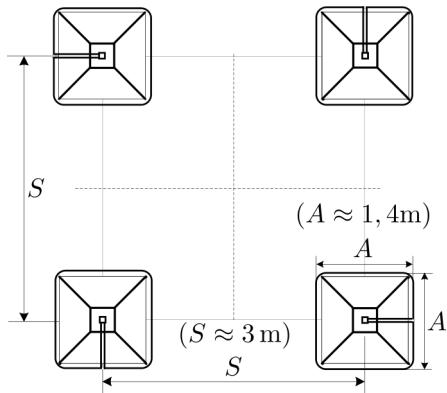


г) Тип К2L2

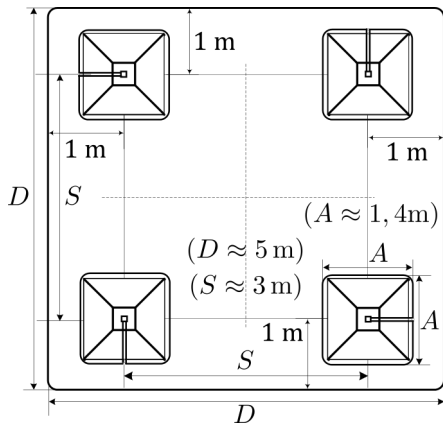
# Комбинирани прстенести-зракасти заз.



# Заземјувачи на столбовите за $U_n \geq 110 \text{ kV}$



Изглед на заземјувачот од типот А



Изглед на заземјувачот од типот В

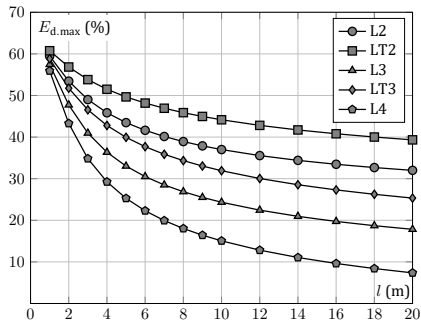
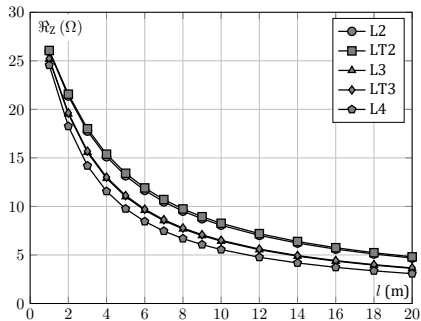
# Карактеристики на типските заземјувачи

- Испитувањата на основните карактеристики на типските заземјувачи ( $R_Z$ ,  $E_{d,max}$ ,  $E_{c,max}$ , цената на чинење и др.) се вршат на модел со хомогено тло (во случаите на повеќеслојна средина, бројот на комбинациите што можат да се јават е практично неограничен).
- Кај заземјувачите на металните и армирано-бетонските столбови потребно е да се земе предвид и влијанието на темелите на столбовите кои се моделираат со упростени правилни форми.
  - ▶ темелот кај армирано-бетонските столбови може да се замени со соодветен вертикален цевкаст заземјувач
  - ▶ едноблоковиот темел на челично-решеткастите столбови може приближно да се еквивалентира со полутопка со површина еднаква на површината на бочните страни од темелот
- Вршени се пресметки на отпорностите на распростирање  $R_Z$  на одделните заземјувачи кога тие се поставени во тло со  $\rho = 100 \Omega m$ . Пресметките се вршени со помош на компјутерска програмата базирана на моделот од глава 3.

# Карактеристики на зракастите заземјувачи

| $l$ (m) | $\Re_Z (\Omega)$ |        |        |        |        |
|---------|------------------|--------|--------|--------|--------|
|         | L2               | LT2    | L3     | LT3    | L4     |
| 1       | 25,997           | 26,077 | 25,191 | 25,242 | 24,573 |
| 2       | 21,113           | 21,311 | 19,275 | 19,384 | 18,031 |
| 3       | 17,589           | 17,838 | 15,433 | 15,557 | 14,078 |
| 4       | 15,005           | 15,268 | 12,811 | 12,936 | 11,502 |
| 5       | 13,078           | 13,338 | 10,950 | 11,068 | 9,724  |
| 6       | 11,596           | 11,845 | 9,569  | 9,679  | 8,430  |
| 7       | 10,426           | 10,663 | 8,507  | 8,609  | 7,449  |
| 8       | 9,480            | 9,703  | 7,665  | 7,760  | 6,680  |
| 9       | 8,699            | 8,909  | 6,979  | 7,070  | 6,061  |
| 10      | 8,043            | 8,242  | 6,416  | 6,497  | 5,551  |
| 12      | 7,002            | 7,180  | 5,531  | 5,603  | 4,761  |
| 14      | 6,212            | 6,373  | 4,871  | 4,935  | 4,176  |
| 16      | 5,592            | 5,738  | 4,359  | 4,416  | 3,725  |
| 18      | 5,091            | 5,224  | 3,948  | 4,001  | 3,366  |
| 20      | 4,677            | 4,800  | 3,613  | 3,661  | 3,074  |

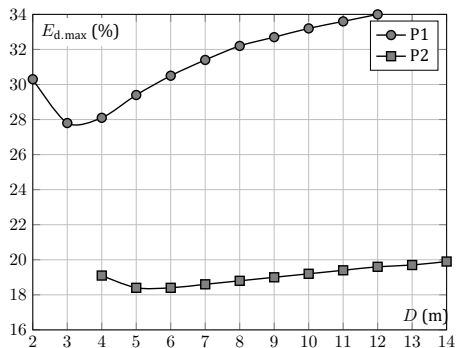
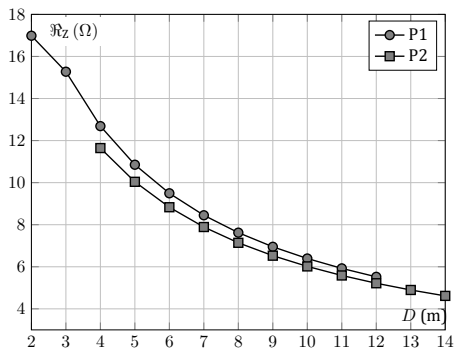
# Карактеристики на зракастите заземјувачи



# Карактеристики на прстенестите заземјувачи

| $D$<br>(m) | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | тип P1             |                    | тип P2                  |                    |                    |
|------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
|            |                         | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) |
| 2          | 16,985                  | 30,3               | 26,7               |                         |                    |                    |
| 3          | 15,274                  | 27,8               | 24,3               |                         |                    |                    |
| 4          | 12,687                  | 28,1               | 22,4               | 11,644                  | 19,1               | 19,3               |
| 5          | 10,852                  | 29,4               | 22,6               | 10,040                  | 18,4               | 18,4               |
| 6          | 9,494                   | 30,5               | 22,8               | 8,831                   | 18,4               | 18,4               |
| 7          | 8,449                   | 31,4               | 23,1               | 7,890                   | 18,6               | 18,3               |
| 8          | 7,622                   | 32,2               | 23,3               | 7,140                   | 18,8               | 18,3               |
| 9          | 6,950                   | 32,7               | 23,5               | 6,528                   | 19,0               | 18,3               |
| 10         | 6,393                   | 33,2               | 23,7               | 6,018                   | 19,2               | 18,3               |
| 11         | 5,924                   | 33,6               | 23,8               | 5,587                   | 19,4               | 18,4               |
| 12         | 5,522                   | 34,0               | 24,0               | 5,217                   | 19,6               | 18,4               |
| 13         |                         |                    |                    | 4,897                   | 19,7               | 18,5               |
| 14         |                         |                    |                    | 4,616                   | 19,9               | 18,5               |

# Карактеристики на прстенестите заземјувачи





# Карактер. на комбинираниите заземјувачи

| $R_1$<br>(m) | заземјувач тип K1       |                    |                    | заземјувач тип K1L2×l |                         |                    |                    |
|--------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
|              | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) | $l$<br>(m)            | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) |
| 1,2          | 15,57                   | 28,7               | 28,4               | 2                     | 13,43                   | 24,0               | 27,0               |
| 1,4          | 14,77                   | 25,1               | 26,3               | 3                     | 12,10                   | 22,5               | 26,1               |
| 1,6          | 13,72                   | 23,6               | 24,9               | 4                     | 10,96                   | 21,6               | 25,3               |
| 1,8          | 12,80                   | 23,3               | 23,8               | 5                     | 10,00                   | 20,9               | 24,6               |
| 2,0          | 11,98                   | 23,6               | 22,9               | 6                     | 9,19                    | 20,2               | 24,0               |
| 2,2          | 11,23                   | 24,0               | 22,6               | 7                     | 8,49                    | 19,7               | 23,5               |
| 2,4          | 10,60                   | 24,5               | 22,6               | 8                     | 7,90                    | 19,3               | 23,0               |
| 2,6          | 10,03                   | 25,0               | 22,6               | 9                     | 7,38                    | 18,9               | 22,6               |
| 2,8          | 9,52                    | 25,4               | 22,6               | 10                    | 6,93                    | 18,5               | 22,2               |
| 3,0          | 9,06                    | 25,8               | 22,7               |                       |                         |                    |                    |

## Карактер. на комбинираниите заземјувачи

| заземјувач тип K1L4 $\times$ L |                       |                    |                    |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| $l$<br>(m)                     | $R_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) |
| 2                              | 11,81                 | 20,0               | 23,6               |
| 3                              | 10,09                 | 17,4               | 21,1               |
| 4                              | 8,77                  | 15,6               | 19,3               |
| 5                              | 7,76                  | 14,3               | 17,9               |
| 6                              | 6,95                  | 13,2               | 16,7               |
| 7                              | 6,30                  | 12,3               | 15,8               |
| 8                              | 5,76                  | 11,6               | 15,0               |
| 9                              | 5,31                  | 11,0               | 14,3               |
| 10                             | 4,92                  | 10,4               | 13,8               |

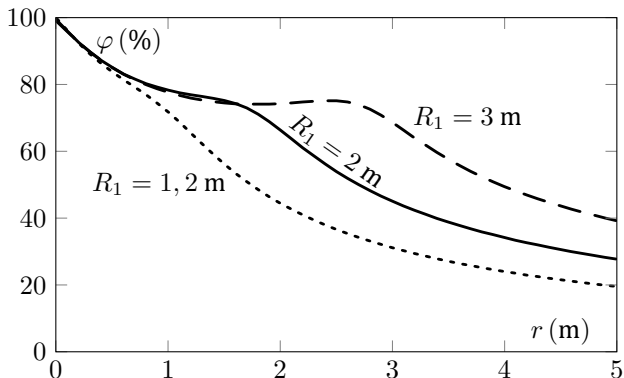
# Карактер. на комбинираните заземјувачи

| $R_2$<br>(m) | заземјувач тип K2       |                    |                    | заземјувач тип K2L2×l |                         |                    |                    |
|--------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
|              | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) | $l$<br>(m)            | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d,max}$<br>(%) | $E_{c,max}$<br>(%) |
| 2,2          | 10,50                   | 14,4               | 20,4               | 2                     | 9,49                    | 12,9               | 19,8               |
| 2,7          | 9,18                    | 14,1               | 18,1               | 3                     | 8,88                    | 12,4               | 19,3               |
| 3,2          | 8,16                    | 14,3               | 16,8               | 4                     | 8,30                    | 12,0               | 18,9               |
| 3,7          | 7,34                    | 14,5               | 16,0               | 5                     | 7,78                    | 11,6               | 18,6               |
| 4,2          | 6,68                    | 14,7               | 15,9               | 6                     | 7,31                    | 11,3               | 18,2               |
| 4,7          | 6,14                    | 14,9               | 15,8               | 7                     | 6,88                    | 11,0               | 17,9               |
| 5,2          | 5,68                    | 15,0               | 15,8               | 8                     | 6,50                    | 10,8               | 17,6               |
| 5,7          | 5,29                    | 15,2               | 15,8               | 9                     | 6,16                    | 10,6               | 17,3               |
| 6,2          | 4,96                    | 15,3               | 15,8               | 10                    | 5,86                    | 10,4               | 17,1               |
| 6,7          | 4,66                    | 15,5               | 15,9               |                       |                         |                    |                    |

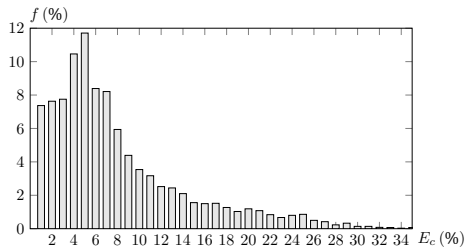
## Карактер. на комбинираниите заземјувачи

| заземјувач тип K2L4 $\times$ L |                         |                     |                     |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| $l$<br>(m)                     | $\Re_Z$<br>( $\Omega$ ) | $E_{d.\max}$<br>(%) | $E_{c.\max}$<br>(%) |
| 2                              | 8,71                    | 11,6                | 18,1                |
| 3                              | 7,81                    | 10,7                | 16,8                |
| 4                              | 7,04                    | 9,3                 | 15,6                |
| 5                              | 6,39                    | 9,3                 | 14,7                |
| 6                              | 5,85                    | 8,8                 | 13,9                |
| 7                              | 5,39                    | 8,3                 | 13,3                |
| 8                              | 5,00                    | 8,0                 | 12,7                |
| 9                              | 4,66                    | 7,6                 | 12,2                |
| 10                             | 4,36                    | 7,2                 | 11,8                |

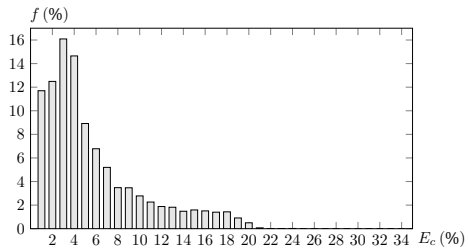
# Карактер. на комбинираните заземјувачи



# Фреквентни хистограми



тип P1 x 1,5



тип P2 x 1,5

# Карактер. на заземјувачи за 110 kV столбови

| број | тип  | $R_Z(\Omega)$ | $I_L(\%)$ | $I_S(\%)$ | $L_\Sigma(\text{m})$ | $Q(\text{m}^3)$ | $C(\text{€})$ |
|------|------|---------------|-----------|-----------|----------------------|-----------------|---------------|
| 1    | A    | 6,50          | /         | 100,0     | /                    | /               | 115           |
| 2    | A210 | 4,86          | 42,2      | 57,8      | 24,40                | 6,85            | 200           |
| 3    | A215 | 4,11          | 54,6      | 45,4      | 34,40                | 10,05           | 285           |
| 4    | A220 | 3,54          | 62,8      | 37,2      | 44,40                | 13,25           | 370           |
| 5    | A225 | 3,11          | 68,6      | 31,4      | 54,40                | 16,45           | 455           |
| 6    | A230 | 2,78          | 72,8      | 27,2      | 64,40                | 19,65           | 540           |
| 7    | A235 | 2,51          | 76,2      | 23,8      | 74,40                | 22,85           | 625           |
| 8    | A240 | 2,29          | 78,8      | 21,2      | 84,40                | 26,05           | 710           |
| 9    | A405 | 5,35          | 39,8      | 60,2      | 28,80                | 7,30            | 220           |
| 10   | A410 | 4,04          | 64,0      | 36,0      | 48,80                | 13,70           | 390           |
| 11   | A415 | 3,20          | 75,8      | 24,2      | 68,80                | 20,10           | 560           |
| 12   | A420 | 2,63          | 82,4      | 17,6      | 88,80                | 26,50           | 730           |
| 13   | A425 | 2,24          | 86,6      | 13,4      | 108,80               | 32,90           | 900           |
| 14   | A430 | 1,95          | 89,4      | 10,6      | 128,80               | 39,30           | 1070          |
| 15   | A435 | 1,73          | 91,2      | 8,8       | 148,80               | 45,70           | 1235          |
| 16   | A440 | 1,56          | 92,6      | 7,4       | 168,80               | 52,10           | 1405          |

# Карактер. на заземјувачи за 110 kV столбови

| број | тип  | $R_Z(\Omega)$ | $I_L(\%)$ | $I_S(\%)$ | $L_\Sigma(\text{m})$ | $Q(\text{m}^3)$ | $C(\text{€})$ |
|------|------|---------------|-----------|-----------|----------------------|-----------------|---------------|
| 1    | B    | 5,97          | /         | 70,8      | 32                   | 10,2            | 200           |
| 2    | B210 | 4,70          | 38,6      | 44,8      | 56                   | 17,3            | 285           |
| 3    | B215 | 4,01          | 51,4      | 35,6      | 66                   | 20,5            | 370           |
| 4    | B220 | 3,47          | 60,2      | 29,2      | 76                   | 23,7            | 455           |
| 5    | B225 | 3,06          | 66,2      | 24,2      | 86                   | 26,9            | 540           |
| 6    | B230 | 2,74          | 70,8      | 21,6      | 96                   | 30,1            | 625           |
| 7    | B235 | 2,48          | 74,4      | 18,8      | 106                  | 33,4            | 710           |
| 8    | B240 | 2,26          | 77,0      | 16,6      | 116                  | 36,5            | 795           |
| 9    | B405 | 5,19          | 34,6      | 48,4      | 60                   | 18,6            | 310           |
| 10   | B410 | 3,99          | 60,8      | 29,8      | 80                   | 25,0            | 480           |
| 11   | B415 | 3,18          | 73,6      | 20,4      | 100                  | 31,4            | 650           |
| 12   | B420 | 2,62          | 81,0      | 14,8      | 120                  | 37,8            | 820           |
| 13   | B425 | 2,24          | 85,4      | 11,0      | 140                  | 44,2            | 990           |
| 14   | B430 | 1,95          | 88,6      | 8,5       | 160                  | 50,6            | 1160          |
| 15   | B435 | 1,73          | 90,6      | 7,2       | 180                  | 57,0            | 1325          |
| 16   | B440 | 1,56          | 92,2      | 6,2       | 200                  | 63,4            | 1600          |



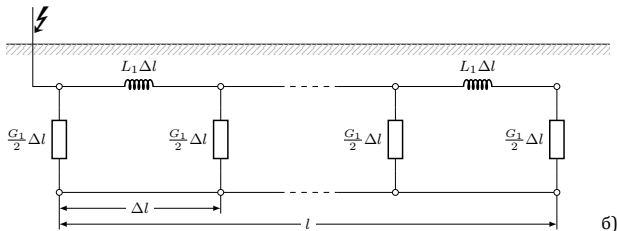
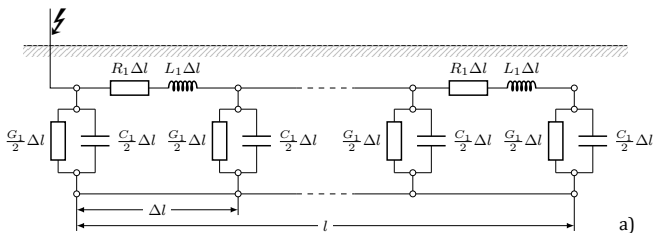
# Ударна отпорност на заземјувачите

- Првенствена задача на заземјувачите од столбовите на надземните водови е заштита од атмосферските пренапони. Затоа мерка за перформансите на ваквите заземјувачи е нивната импулсна (ударна) отпорност  $R_i$ .
- $R_i$  се дефинира како однос помеѓу максимумот на импулсниот напон  $U_m$  и максимумот на импулсната струја  $I_m$ .
- $R_i$  е пропорционална на  $R_Z$

$$R_i = \alpha \cdot R_Z.$$

- Факторот на  $\alpha$  се нарекува импулсен коефициент, има поголеми вредности кај подолгите заземјувачи и поголемите специфични отпорности на тлото.

# Импулсни коеф. на хоризонтални заземјувачи



$$Z_C = 60 \cdot \ln \frac{2l}{d} \text{ (}\Omega\text{)},$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}, \quad v_0 = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right),$$

# Импулсни коеф. на хоризонтални заземјувачи

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d}, \quad \left( \frac{\text{H}}{\text{m}} \right), \quad C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{2l}{d}}, \quad \left( \frac{\text{F}}{\text{m}} \right), \quad G_1 = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{l}{\sqrt{d \cdot h}}}, \quad \left( \frac{\text{S}}{\text{m}} \right).$$

активна должина на заземјувачот

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} \cdot (\text{m})$$

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{G_1 \cdot l} & \text{за } T_c > 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \\ \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} & \text{за } T_c \leq 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \end{cases}$$

# Пример 1

Лента FeZn 30x4 со должина  $l = 10$  m е закопана на длабочина  $h = 0,7$  m во тло со  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Да се пресмета  $R_Z$  и  $R_i$  за случајот кога струјниот импулс на громот има облик 1,2/50 и  $I_M = 25$  kA. Колкав е импулсниот коефициент  $\alpha$  на заземјувачот. Колкава ќе биде амплитудата на напонот на заземјувачот  $U_M$ . Пресметките да се повторат и за случајот кога е  $l = 20$  m.

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 14 \Omega,$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{14 \cdot 10} = 0,007144 \frac{\text{S}}{\text{m}},$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,366 \frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,007144 \cdot 1,366}} = 11,09 \text{ m} \approx l.$$

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} = R_Z = 14 \Omega.$$

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV}.$$

# Пример 1

Случај со  $l = 20 \text{ m}$

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 8,1 \Omega.$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{8,1 \cdot 20} = 0,006171 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 20}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,504 \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,006171 \cdot 1,504}} = 11,37 \text{ m} < l.$$

$$R_i = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,006171 \cdot 1,2}} = 14 \Omega \approx 1,75 \cdot R_Z.$$

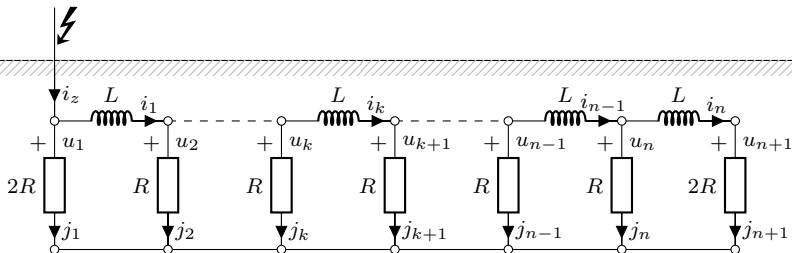
$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV},$$

## Пример 2

За случајот со  $l = 20$  m од примерот 1 да се изврши компјутерска симулација на простирањето на бранот по лентата. При тоа, лентата да се подели на  $n = 40$  делови, секој со должина од 0,5 m. Параметрите на еквивалентната шема се

$$R = \frac{1}{G_1 \cdot l/n} = \frac{1}{0,006171 \cdot 20/40} = 324,1 \Omega;$$

$$L = L_1 \cdot l/n = 1,504 \cdot 20/40 = 0,752 \text{ H.}$$



## Пример 2 – струен импулс

$$i_z(t) = \frac{I_m}{k} \cdot (e^{-at} - e^{-bt}),$$

$$k = \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-a}{a-b} - \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-b}{a-b}.$$

$$a = \frac{0,69}{T_g}, \quad b = \frac{3,24}{T_c}.$$

../programi/impuls/impuls.m

```
1 function i = impuls(t,Im,Tc,Tg)
2 a = 0.69/Tg; b = 3.24/Tc;
3 k = (a/b)^(-a/(a-b))-(a/b)^(-b/(a-b));
4 i = Im/k*(exp(-a*t)-exp(-b*t));
```

## Пример 2 – диф. равенки во Matlab

$$\frac{dx_1}{dt} = 2 \cdot x_1 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -10 \cdot x_2 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2,$$

со почетни услови  $x_1(0) = 5000$  и  $x_2(0) = 100$ .

```
../programi/impuls/izvodi.m
```

```
1 function dx = izvodi(t,x)
2 dx(1,1) = 2*x(1) - 0.001*x(1)*x(2);
3 dx(2,1) = -10*x(2) + 0.002*x(1)*x(2);
```

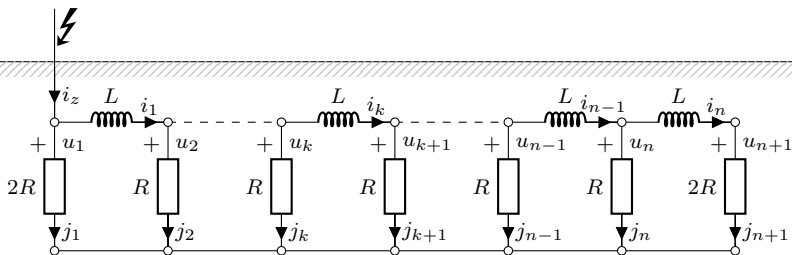
```
../programi/impuls/dif_rav.m
```

```
1 [t, x] = ode23t('izvodi',[0 5],[5000 100]);
2 plot(t,x);
3 xmax = max(x)
```

```
>> dif_rav
xmax =
 1.0e+04 *
 1.0946    0.9062
```



## Пример 2 – диф. равенки за вод



$$L \frac{di_k}{dt} = u_k - u_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

$$u_k = \begin{cases} 2R \cdot j_1 & k = 1, \\ R \cdot j_k & 2 \leq k \leq n, \\ 2R \cdot j_{n+1} & k = n + 1. \end{cases}$$

$$j_k = \begin{cases} i_z - i_1 & k = 1, \\ i_{k-1} - i_k & 2 \leq k \leq n, \\ i_n & k = n + 1. \end{cases}$$

## Пример 2 – диф. равенки за вод

$$\begin{aligned}u_1 - u_2 &= 2R \cdot j_1 - R \cdot j_2 = 2R \cdot (i_z - i_1) - R \cdot (i_1 - i_2) = \\ &= R \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_k - u_{k+1} &= R \cdot j_k - R \cdot j_{k+1} = R \cdot (i_{k-1} - i_k) - R \cdot (i_k - i_{k+1}) = \\ &= R \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}), \quad 2 \leq k \leq n-1,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_n - u_{n+1} &= R \cdot j_n - 2R \cdot j_{n+1} = R \cdot (i_{n-1} - i_n) - 2R \cdot i_n = \\ &= R \cdot (i_{n-1} - 3i_n),\end{aligned}$$

$$\frac{di_k}{dt} = \begin{cases} R/L \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2) & k = 1, \\ R/L \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}) & 2 \leq k \leq n, \\ R/L \cdot (i_{n-1} - 3i_n) & k = n + 1. \end{cases}$$

../programi/impuls/izvodi\_vod.m

```
1 function di = izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg)
2 n = length(i);
3 di(1,1) = R/L * (2*impuls(t,Im,Tc,Tg) - 3*i(1) + i(2));
4 for k = 2:n-1
5     di(k,1) = R/L * (i(k-1) - 2*i(k) + i(k+1));
6 end
7 di(n,1) = R/L * (i(n-1) - 3*i(n));
```

## Пример 2 – решение

```
../programi/impuls/lenta_impuls.m
```

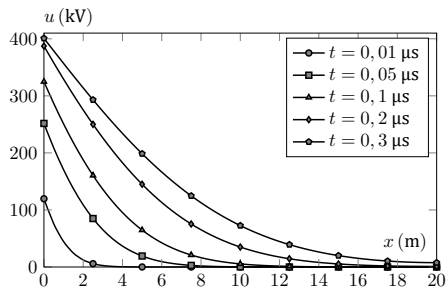
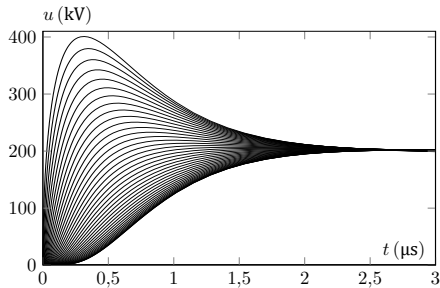
```
1 function [t,i,j,u] = lenta_impuls(rho,h,l,Im,Tc,Tg,tmax)
2 d = 2*(30+4)/1000/pi;
3 Rz = rho/(pi*l) * log(l/sqrt(d*h))
4 G1 = 1/(Rz*l);
5 L1 = 2e-7*log(2*l/d);
6 n = l/0.5;
7 R = 1/(G1*l/n);
8 L = L1*l/n;
9 f = @(t,i) izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg);
10 [t, i] = ode23t(f,[0 tmax],zeros(n,1));
11 j(:,1) = impuls(t,Im,Tc,Tg) - i(:,1);
12 for k = 2:n
13     j(:,k) = i(:,k-1) - i(:,k);
14 end
15 j(:,n+1) = i(:,n);
16 u = R*j;
17 u(:,[1 n+1]) = 2*u(:,[1 n+1]);
18 Ri = max(u(:,1))/Im
19 alfa = Ri/Rz
```

```
>> [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
Rz =
    8.1019
Ri =
    16.0341
alfa =
    1.9791
```

## Пример 2 – графици

```
../programi/impuls/lenta_impuls_crtaj.m
```

```
1 [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,10e-6);  
2 plot(t,u); xlim([0 3e-6]); ylim([0 450])  
3 t1 = [0.01 0.05 0.1 0.2 0.3]*1e-6;  
4 k = [];  
5 for m = 1:length(t1)  
6     k = [k find(t > t1(m), 1)];  
7 end  
8 figure; plot(linspace(0,20,41),u(k,:))'
```



## Пример 3

Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, составен од три поцинкувани челични ленти FeZn 30×4, секоја со должина  $l = 20$  m, е закопан на длабочина  $h = 0,7$  m во хомогено тло со  $\rho = 200 \Omega\text{m}$ . Да се пресмета  $R_Z$  и  $R_i$  ако  $T_c = 1,2 \mu\text{s}$ .

$$R_{1l} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{200}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 16,204 \Omega.$$

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left( \ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right); \quad L_\Sigma = n \cdot l = 3 \cdot 20 = 60 \text{ m}; \quad A_k = 0,87;$$

$$R_Z = \frac{200}{2\pi \cdot 60} \cdot \left( \ln \frac{60^2}{0,022 \cdot 0,7} + 0,87 \right) = 7,028 \Omega.$$

$$R_Z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R_{1l}}{n}, \quad \eta = \frac{R_{1l}}{n \cdot R_Z} = \frac{16,204}{3 \cdot 7,028} = 0,768.$$

$$G_1 = 0,00386 \text{ S/m}; \quad L_1 = 1,562 \mu\text{H/km}; \quad l_a = 15,8 \text{ m} < l;$$

$$R_{1i} = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,00386 \cdot 1,2}} = 19,885 \Omega \approx 1,23 \cdot R_{1l} \Rightarrow \alpha_1 = 1,23.$$

$$R_i = \alpha \cdot R_Z = 1,23 \cdot 7,028 = 8,625 \Omega.$$

## Пример 4

Колкави ќе бидат  $R_Z$  и  $R_i$  на заземјувачот во форма на трикрака звезда од примерот 3 ( $n = 3$ ,  $l = 20$  m,  $h = 0, 7$  m) кога е тој поставен во тло со  $50 \Omega\text{m} \leq \rho \leq 500 \Omega\text{m}$ . Пресметките да се направат: а)  $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$ , б)  $T_c = 2, 5 \mu\text{s}$  и в)  $T_c = 5 \mu\text{s}$  а резултатите да се прикажат табеларно и графички.

$T_c = 1, 2 \mu\text{s}$

| $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) | $l_a$ (m) | $R_Z$ ( $\Omega$ ) | $R_i$ ( $\Omega$ ) | $\alpha$ |
|-----------------------------|-----------|--------------------|--------------------|----------|
| 50                          | 8,0       | 1,757              | 4,313              | 2,454    |
| 100                         | 10,7      | 3,514              | 6,099              | 1,735    |
| 150                         | 13,9      | 5,271              | 7,470              | 1,417    |
| 200                         | 16,1      | 7,028              | 8,625              | 1,227    |
| 250                         | 18,0      | 8,786              | 9,643              | 1,098    |
| 300                         | 19,7      | 10,54              | 10,56              | 1,001    |
| 350                         | 21,3      | 12,30              | 12,30              | 1,000    |
| 400                         | 22,7      | 14,06              | 14,06              | 1,000    |
| 450                         | 24,1      | 15,81              | 15,81              | 1,000    |
| 500                         | 25,4      | 17,57              | 17,57              | 1,000    |

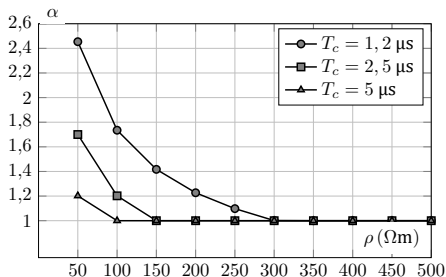
$T_c = 2, 5 \mu\text{s}$

| $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) | $l_a$ (m) | $R_Z$ ( $\Omega$ ) | $R_i$ ( $\Omega$ ) | $\alpha$ |
|-----------------------------|-----------|--------------------|--------------------|----------|
| 50                          | 11,6      | 1,757              | 2,988              | 1,700    |
| 100                         | 18,4      | 3,514              | 4,225              | 1,202    |
| 150                         | 20,1      | 5,271              | 5,271              | 1,000    |
| 200                         | 23,2      | 7,028              | 7,028              | 1,000    |
| 250                         | 26,0      | 8,786              | 8,786              | 1,000    |
| 300                         | 28,4      | 10,54              | 10,54              | 1,000    |
| 350                         | 30,7      | 12,30              | 12,30              | 1,000    |
| 400                         | 32,8      | 14,58              | 14,58              | 1,000    |
| 450                         | 34,8      | 15,81              | 15,81              | 1,000    |
| 500                         | 36,7      | 17,57              | 17,57              | 1,000    |

# Пример 4

$$T_c = 5 \mu\text{s}$$

| $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) | $l_a$ (m) | $R_Z$ ( $\Omega$ ) | $R_i$ ( $\Omega$ ) | $\alpha$ |
|-----------------------------|-----------|--------------------|--------------------|----------|
| 50                          | 16,4      | 1,757              | 2,113              | 1,202    |
| 100                         | 23,2      | 3,514              | 3,514              | 1,000    |
| 150                         | 28,4      | 5,271              | 5,271              | 1,000    |
| 200                         | 32,8      | 7,028              | 7,028              | 1,000    |
| 250                         | 36,7      | 8,786              | 8,786              | 1,000    |
| 300                         | 40,2      | 10,54              | 10,54              | 1,000    |
| 350                         | 43,4      | 12,30              | 12,30              | 1,000    |
| 400                         | 46,4      | 14,58              | 14,58              | 1,000    |
| 450                         | 49,3      | 15,81              | 15,81              | 1,000    |
| 500                         | 51,9      | 17,57              | 17,57              | 1,000    |



# Јонизација и електрични празнења во тлото

- Струјата на громот што се одведува во земјата е голема: неколку десетици кА, па дури до стотина кА. Толкави големи струи во земјата создаваат силно електрично поле кое може да предизвика електрично искрење и празнење во земјата.
- Кај големите струи на одведување и големите специфични отпорности на тлото, во него се воспоставуваат јаки електрични полиња кои доведуваат до негова јонизација па дури и празнење преку електричен лак. Со тоа се намалува импулсната отпорност на заземјувачот и важи  $\alpha < 1$ .
- Празнењето на громот во надземниот вод предизвикува инјектирање на струјни импулси во заземјувачите од столбовите и иницира сложен електромагнетен преоден процес којшто има бранов карактер и чијашто анализа е прилично сложена.
- Процесите сè уште не се доволно проучени така што единствена употреблива опција, барем засега, претставуваат експерименталните истражувања на реалните заземјувачи и експериментите на модели.



# Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

Емпириски формули добиени експериментално во Лабораторијата за заземјувачки технологии при Универзитетот во Чонгкинг.

$$\alpha = a \cdot \rho^{-p} \cdot (b + \sqrt{l}) \cdot (c - e^{-d \cdot I_M^{-q}}),$$

$$\alpha = 0,74 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,56 - e^{-3,0 \cdot I_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } a,$$

$$\alpha = 2,94 \cdot \rho^{-0,5} \cdot (6,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,23 - e^{-2,0 \cdot I_M^{-0,3}}) \quad \text{за типот } b,$$

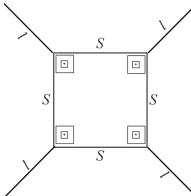
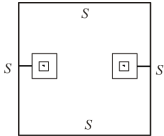
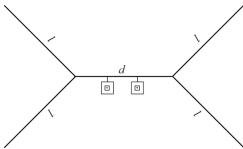
$$\alpha = 1,36 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,3 + \sqrt{l}) \cdot (1,55 - e^{-4,0 \cdot I_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } c,$$

$$\alpha = 1,62 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (5,0 + \sqrt{l}) \cdot (0,79 - e^{-2,3 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } d,$$

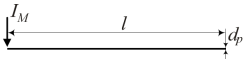
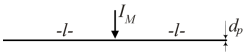
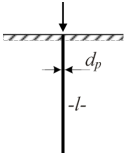
$$\alpha = 1,16 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,1 + \sqrt{l}) \cdot (0,78 - e^{-2,3 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } e,$$

$$\alpha = 2,75 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,8 + \sqrt{l}) \cdot (0,75 - e^{-1,5 \cdot I_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } f.$$

# Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

| Тип      | Скица на заземјувачот   | Опис на заземјувачот  |
|----------|---|---|
| <i>a</i> |  | Заземјувач за челично-решетки столбови, наменет за терени со ниска ( $l = 0$ ) и висока ( $l > 0$ ) спец. отпорност $\rho$ .<br>( $S = 8 \div 10 \text{ m}$ , $l = 0 \div 50 \text{ m}$ ) |
| <i>b</i> |  | Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со ниска специфична отпорност $\rho$ .<br>( $S = 0 \div 15 \text{ m}$ )  |
| <i>c</i> |  | Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со висока специфична отпорност $\rho$ .<br>( $d = 10 \text{ m}$ ; $l = 5 \div 53 \text{ m}$ )  |

# Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

| Тип      | Скица на заземјувачот   | Опис на заземјувачот   |
|----------|---|--|
| <i>d</i> |  | Заземјувач за обични, едно-<br>стоечки бетонски и челично-<br>решетки столбови.<br>( $l = 5 \div 100$ m)         |
| <i>e</i> |  | Заземјувач за обични, едно-<br>стоечки бетонски и челично-решетки<br>столбови.                                   |
| <i>f</i> |  | Вертикален заземјувач за<br>обични, едно-стоечки бетонски и<br>челично-решетки столбови.<br>( $l = 5 \div 60$ m) |

## Пример 5

Се посматра 10 kV вод со бетонски столбови и PS 12 ( $U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$ ). Колкава ќе биде веројатноста за повратен прескок  $P_0$  при удар на гром во столбот за случајот кога заземјувачите се од типот L2×10, при  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Дали се задоволени барањата во поглед на потенцијалот на столбот  $I_Z = 20 \text{ A}$ .

- Отпорност на распростирање  $R_Z = 8,043 \Omega \approx 8 \Omega$ ;
- Максимална потенцијална разлика на допир  $E_{\text{d.max}} = 37\%$ .

$$R_i = \alpha \cdot R_Z \approx 8 \Omega,$$

$$U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV},$$

$$I_M = \frac{U_{\text{подн}}}{R_i} = \frac{75}{8} = 9,375 \text{ kA}.$$

$$P_0 = 1 - P = 1 - P(I \leq I_M).$$

$$P_0 = P(I > I_M) = 1 - 0,3675 = 0,6325 (63,25\%).$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8 \cdot 20 = 160 \text{ V} > 125 \text{ V}.$$

$$E_{\text{d.max}} = \frac{37}{100} \cdot U_Z = \frac{37}{100} \cdot 160 = 59 \text{ V} < 65 \text{ V}.$$

## Пример 6

Да се пресмета колкава треба да биде должината на краците на заземјувачот тип  $L2 \times l$  од претходниот пример ако сакаме далекуводот да биде „отпорен“ на громови со амплитуда на струјата до 15 kA, или, како што се вели, „заштитното ниво“ на водот да биде  $I_0 = 15$  kA.

$$R_Z = \frac{U_{\text{подн}}}{I_0} = \frac{75}{15} = 5 \Omega.$$

Од табелата 4.3 ја отчитуваме бараната вредност на должината  $l$  на краците  $l \approx 18$  m („точната“ вредност, добиена со линеарна интерполација, е  $l = 18,5$  m).

Од табелата 5.1 се гледа дека  $P(I_M < 15) = 62\%$ , што значи дека во 62% од ударите нема да дојде до повратен прескок.

## Пример 7

Да се реши случајот разгледуван во примерот 5 ако надземниот 10 kV вод се изведе со потпорни изолатори од типот PS 24, наменети за 20 kV водови кои имаат  $U_{\text{подн}} = 125 \text{ kV}$  (наместо PS 12 со  $U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$ ).

$$I_0 = \frac{U}{R_Z} = \frac{125}{8} = 15,63 \text{ kA}.$$

$$P(I < I_0) = P(I < 15,63) = 0,64 (64\%),$$

$$P_0 = P(I \geq I_0) = 1 - P(I < I_0) = 0,36 (36\%).$$

- Во овој случај имаме обратна ситуација: само 1/3 од ударите на гром ќе предизвикаат повратен прескок (беше 2/3).
- Ако решевме да ја зголемиме на должината на краците (како во примерот 5) треба градежни зафати и 170 €/столб или околу 1700 €/km.
- Ако ги смениме само изолаторите ќе не чини  $\approx 5$  €/изолатор, т.е.  $3 \times 5 = 15$  €/столб или приближно 150 €/km.

## Пример 8

Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од поцинкувана челечна лента FeZn 30×4 ( $d = 22$  mm), закопана на длабочина  $h = 0,7$  m. Столбовите минуваат низ терени со различни специфични отпорности на тлото  $\rho \in \{50, 100, 150, 200, 300\} \Omega\text{m}$ . За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот  $D$  така што отпорноста на распростирање на заземјувачот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува  $R_Z = 15 \Omega$ .

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}$$

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots \quad D_0 = 1 \text{ m}$$

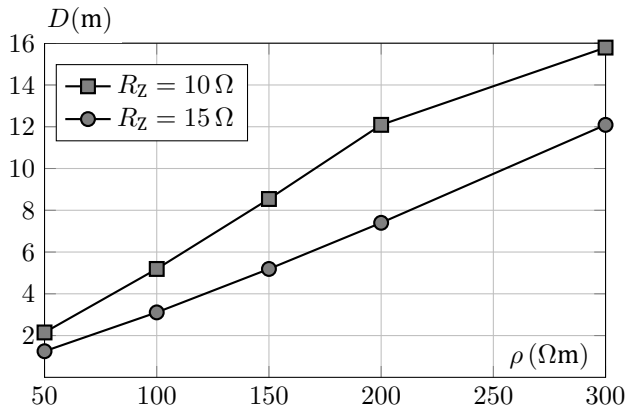
$$D_1 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,35 \text{ m};$$

$$D_2 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,35}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,92 \text{ m};$$

⋮

## Пример 8

| $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )  | 50   | 100  | 150  | 200   | 300   |
|------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| $D$ (m) за $R_Z = 15 \Omega$ | 1,25 | 3,11 | 5,19 | 7,40  | 12,09 |
| $D$ (m) за $R_Z = 10 \Omega$ | 2,15 | 5,19 | 8,54 | 12,09 | 15,79 |





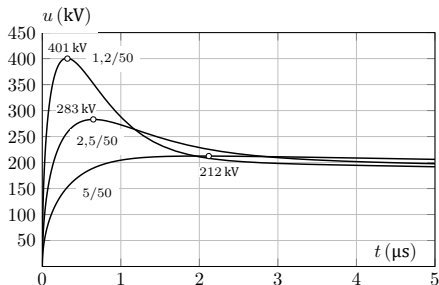
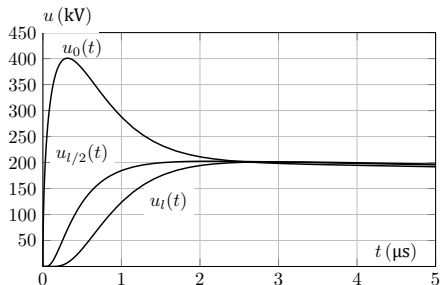
## Пример 9

Со помош на програмата `lenta_impuls` да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на заземјувачот од примерот 1 (FeZn  $30 \times 4$ ,  $l = 20$  m,  $h = 0,7$  m;  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ) за случај кога импулсот на струјата на громот има темена вредност  $I_M = 25$  kA а неговиот облик има параметри: а) 1,2/50; б) 2,5/50 и в) 5/50  $\mu\text{s}$ . Колкави се вредностите на импулсниот коефициент  $\alpha$  добиен на тој начин?

```
../programi/impuls/lenta_tri_impulsi.m
```

```
1 % impuls 1.2/50
2 [t1,i1,j1,u1] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
3 plot(t1,u1(:,1),[1 21 41])); xlim([0 5e-6]); ylim([0 450])
4 % impuls 2.5/50
5 [t2,i2,j2,u2] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,2.5e-6,50e-6,5e-6);
6 % impuls 5/50
7 [t3,i3,j3,u3] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,5e-6,50e-6,5e-6);
8 figure; plot(t1,u1(:,1),t2,u2(:,1),t3,u3(:,1)); xlim([0 5e-6]); ylim([0 450])
```

# Пример 9



$$R_{i(1,2/50)} = \frac{401}{25} = 16,04 \Omega;$$

$$\alpha_{1,2/50} = \frac{16,04}{8,1} = 1,98.$$

$$R_{i(2,5/50)} = \frac{283}{25} = 11,32 \Omega;$$

$$\alpha_{2,5/50} = \frac{11,32}{8,1} = 1,40.$$

$$R_{i(5/50)} = \frac{212}{25} = 8,48 \Omega;$$

$$\alpha_{5/50} = \frac{8,48}{8,1} = 1,05.$$