УНИВЕРЗИТЕТ "Св. КИРИЛ И МЕТОДИЈ" - СКОПЈЕ
ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ЗА ПРЕНОСНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМИ

Ристо Ачковски, Александра Крколева

ЗБИРКА ЗАДАЧИ ПО ПРЕДМЕТОТ ТЕХНИКА НА ВИСОК НАПОН II

Скопје, октомври 2008 г.

2. АТМОСФЕРСКИ ПРАЗНЕЊА

Задача 2.1. Со помош на IEEE моделот од релацијата (2.2) да се процени колкава е веројатноста P_1 на настанот струјата на молњата да ја надмине вредноста I = 90 kA. Колкава ќе биде веројатноста на истиот настан, проценета според експоненцијалната крива од (2.2).

Решение:

Според IEEE моделот од релацијата (2.2), комплементот на кумулативната веројатност на распределбата на амплитудата на струјата на громот се пресметува според релацијата:

$$P_I = \overline{P}(I) = \frac{1}{1+\left(\dfrac{I}{31}\right)^{2,6}} . \qquad (1)$$

Во оваа релација со $\overline{P}(I) = 1 - P(I)$ е означена веројатноста на настанот (собитието) амплитудата на струјата на молњата да биде еднаква или поголема од вредноста I. Според тоа веројатноста P_1 струјата да биде $I \geq 90$ kA изнесува:

$$P_1 = P(90) = \frac{1}{1+\left(\dfrac{90}{31}\right)^{2,6}} = 0,0589 \text{ или } P_1 = 5,89\%.$$

Значи, според овој модел, при удар на гром во некој објект веројатноста неговата амплитуда да биде $I \geq 90$ kA изнесува само 5,89%.

Според експоненцијалниот модел ќе имаме:

$$\overline{P}(I) = e^{-\left(\frac{I}{25}\right)} .$$

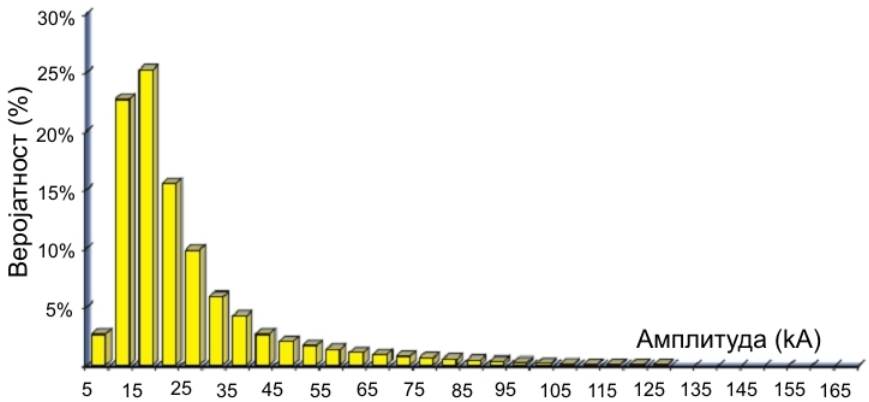
или, во конкретниот случај:

$$P_1 = e^{-\left(\frac{90}{25}\right)} = e^{-3,6} = 0,0273 ,$$

т.е. P_1 = 2,73% што е за 2,2 пати помалку во однос на претходниот резултат.

■ ■ ■

Задача 2.2. На сликата 1 е прикажан фреквентниот хистограм на амплитудата на струјата на громот за една област, добиен по статистички пат.



Слика 1. Фреквентен хистограм на амплитудата на струјата од громот

Да се пресметаат средната вредност I_{sr} како и стандардната девијација σ на струјата на громот. Да се процени веројатноста $P_1 = P(I > I_1)$ за појава на атмосферско празнење со амплитуда која ќе ја надмине вредноста $I_1 = 100$ kA.

Решение:

Врз основа на сликата 1 ја добиваме табелата 1 во која фреквентниот хистограм на густината на струјата на громот е прикажан нумерички. Во неа со $p_1, p_2, \ldots, p_n$ се означени веројатностите амплитудата на струјата на громот да добие вредности во одделните интервали (5÷10 kA; 10÷15 kA; 15÷20 kA итн.), додека со $I_1, I_2, \ldots, I_n$ се означени соодветните упросечени интервални вредности на амплитудата на струјата од громот.

Табела 1. Табеларен приказ на густината на распределбата на струата на громот

Интервал i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I_i (kA)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**	**60**	**65**
p_i (%)	**3.0**	**22.0**	**25.0**	**15.0**	**9.5**	**5.6**	**4.2**	**2.6**	**2.2**	**2.0**	**1.7**	**1.4**	**1.2**
Интервал i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
I_i (kA)	**70**	**75**	**80**	**85**	**90**	**95**	**100**	**105**	**110**	**115**	**120**	**125**	**130**
p_i (%)	**1**	**0.85**	**0.7**	**0.55**	**0.45**	**0.35**	**0.25**	**0.17**	**0.12**	**0.07**	**0.04**	**0.03**	**0.02**

Средната вредност на амплитудата на струјата на громот ќе биде:

$$I_{sr} = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot I_i = p_1 I_1 + p_2 I_2 + \cdots + p_n I_n \,; \; n = 26,$$

$$I_{sr} = 0,01 \cdot \left(3,0 \cdot 5 + 22,0 \cdot 10 + 25,0 \cdot 15 + \cdots + 0,03 \cdot 125 + 0,02 \cdot 130\right) = 24,07 \text{ kA}.$$

Стандардната девијација σ (т.е. растурањето на амплитудата на струјата I околу нејзината средна вредност I_{sr}) ќе биде:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \left(I_i - I_{sr}\right)^2}{n-1}} \text{, или}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,01 \cdot \left[3,0 \cdot (5-24,07)^2 + 22,0 \cdot (10-24,07)^2 + \cdots + 0,02 \cdot (130-24,07)^2\right]}{25}} = 3,691 \text{ kA} \,,$$

или изразено во (%) од средната вредност I_{sr}:

$$\sigma\% = \frac{\sigma}{I_{sr}} \cdot 100 = \frac{3,691}{24,07} \cdot 100 = 15,34\% \,.$$

Веројатноста $P_1 = P_{(I=100 \text{ kA})}$ за појава на гром со амплитуда која ќе ја надмине вредноста $I = 100$ kA ќе биде збир од веројатностите $p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{25}$ и p_{26}, за кои важи $I_i > 100$ kA, т.е.

$$P_1\% = \sum_{i=21}^{26} p_i\% = 0,17{+}0,12{+}0,07{+}0,04{+}0,03{+}0,02 = 0,45\%;$$

$$P_1 = P_1\%/100 = 4,5 \cdot 10^{-3} \,.$$

Значи само 0,45% од ударите на гром во случајов ќе имаат амплитуда која ќе ја надминува вредноста од 100 kA.

■ ■ ■

Задача 2.3. За распределбата на струјата на громот од претходниот пример да се пресмета и нацрта кумулативната функција на веројатност $P(I)$. Потоа да се нацрта нејзината комплементарна функција $\overline{P}(I) = 1 - P(I)$ и по графички пат таа да се спореди со релацијата (2.11) со која се опишува функцијата $\overline{P}(I)$ според IEEE-моделот.

Решение:

Врз основа на табелата 1 од задачата 2.2 ја формираме кумулативната функција на распределба $P(I)$ која се дефинира на следниот начин:

$$P(I) = P(x \leq I) = \int_{-\infty}^{I} f(x) \cdot dx = \sum_{i=1}^{k} p_i = p_1 + p_2 + \cdots + p_k \,.$$

Во последниот израз фигурира сума на парцијалните веројатности p_i струјата на громот да падне во некој од претходно наведените интервали. Сумирањето се врши до оној индекс k за којшто важи $I_k \leq I$. Така, на пример, ќе имаме:

$P(I_1) = p_1 = 0{,}03$; $P(I_2) = p_1 + p_2 = 0{,}03 + 0{,}22 = 0{,}25$; $P(I_3) = p_1 + p_2 + p_3 = 0{,}03 + 0{,}22 + 0{,}25 = 0{,}50$, итн. На тој начин, врз основа на податоците (табела 1 од задачата 2.2) за функцијата на густина на веројатноста се добива табелата 1 во која се прикажани кумулативната функција на распределба $P(I)$ и нејзината комплементарна функција $\overline{P}(I) = 1 - P(I)$.

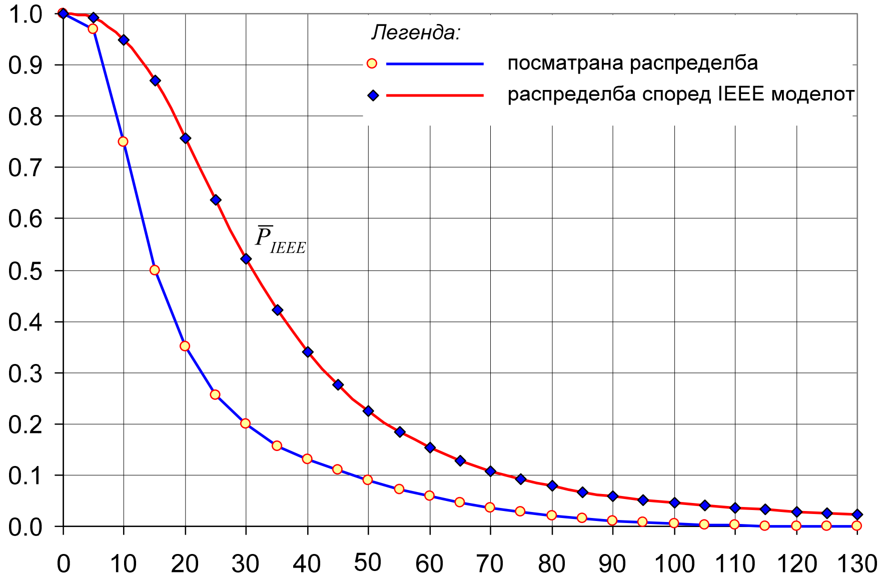
Табела 1. Табеларен приказ на кумулативната функција на веројатост и нејзиниот комплемент

Интервал i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I_i (kA)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**	**60**	**65**
p_i (%)	**3.0**	**22.0**	**25.0**	**15.0**	**9.5**	**5.6**	**4.2**	**2.6**	**2.2**	**2.0**	**1.7**	**1.4**	**1.2**
$P(I_i)$	**0.030**	**0.250**	**0.500**	**0.650**	**0.745**	**0.801**	**0.843**	**0.869**	**0.891**	**0.911**	**0.928**	**0.942**	**0.954**
$\overline{P}(I_i)$	**0.970**	**0.750**	**0.500**	**0.350**	**0.255**	**0.199**	**0.157**	**0.131**	**0.109**	**0.089**	**0.072**	**0.058**	**0.046**
Интервал i	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
I_i (kA)	**70**	**75**	**80**	**85**	**90**	**95**	**100**	**105**	**110**	**115**	**120**	**125**	**130**
p_i (%)	**1.0**	**0.85**	**0.7**	**0.55**	**0.45**	**0.35**	**0.25**	**0.17**	**0.12**	**0.07**	**0.04**	**0.03**	**0.02**
$P(I_i)$	**0.964**	**0.973**	**0.980**	**0.985**	**0.990**	**0.993**	**0.996**	**0.997**	**0.998**	**0.999**	**1.000**	**1.000**	**1.000**
$\overline{P}(I_i)$	**0.036**	**0.028**	**0.021**	**0.015**	**0.011**	**0.007**	**0.005**	**0.003**	**0.002**	**0.001**	**0.001**	**0.000**	**0.000**

Врз основа на табелата 1 е нацртана функцијата $\overline{P}(I) = 1 - P(I)$ за дадената распределба. Графикот на оваа крива е прикажана на сликата 1. На истата слика е нацртана и комплементарната кумулативна функција на распределба $\overline{P}_{IEEE}(I)$ според моделот на IEEE, која што се добива со помош на релацијата (2.11):

$$\overline{P}_{IEEE}(I) = \frac{1}{1 + \left(\dfrac{I}{31}\right)^{2{,}6}} \,.$$

Очигледно е дека овие две криви не се совпаѓаат. Во принцип тоа и треба да се очекува бидејќи IEEE−моделот според релацијата (2.11) дава упросечен закон кој би важел за државите од северната полутопка на земјата додека обликот на функцијата $P(I)$ од табелата 1.1 и нејзините параметри I_{sr} и σ има локален карактер за секој регион на земјата. Тие зависат од многу фактори меѓу кои најважни се надморската височина, географската ширина, карактерот на теренот и др.



Слика 1. Комплементарни кумулативни функции на распределба на амплитудата на струјата од громот

■ ■ ■

Задача 2.4. Оценето е дека доколку во некој столб од еден надземен вод удри гром со амплитуда $I \geq 50$ kA и стрмнина на челото $S \geq 30$ kA/μs, тогаш таквиот удар ќе предизвика повратен прескок на изолацијата од тој столб. Да се процени веројатноста за настанување на повратен прескок кај тој столб при директен удар на молњата во него.

Решение:

Ќе претпоставиме дека амплитудата I и стрмнината S на громот се некорелирани, т.е. се стохастички независни случајни величини.

Веројатноста P_I струјата на громот да ја надмине вредноста 50 kA ќе биде:

$$P_I = \frac{1}{1+(90/31)^{2,6}} = 0,224\,,$$

додека веројатноста P_S стрмнината на челото S од струјниот импулс на громот да ја надмине вредноста $S = 30$ kA/μs, ќе биде:

$$P_S = e^{-\left(\frac{S}{12,5}\right)} = e^{-2,4} = 0,0907.$$

Веројатноста $P_{I,S}$ на едновремениот настан струјата да има амплитуда $I \geq 50$ kA и стрмнината на струјата да има вредност $S \geq 30$ kA/μs, со оглед на тоа дека се тие независни настани, ќе биде производ од одделните веројатности, т.е.:

$$P_{I,S} = P_I \cdot P_S = 0,224 \cdot 0,0907 = 0,0217\,.$$

Значи, во просек, треба да се очекува дека само во 2,17% случаи, или еднаш на секои 46 директни удари во столбот ќе дојде до повратен прескок. Значи *периодичноста* на тој настан, која претставува инверзна вредност од веројатноста $P_{I,S}$, изнесува:

$T = 1/P_{I,S} = 1/0,0217 \cong 46$ директни удари.

Според тоа помеѓу два повратни прескока на изолацијата кај тој столб ќе имаме 46 директни удари во столбот.

■ ■ ■

Задача 2.6. Колкав е просечниот годишен број на удари N_g на молњата на km^2 за централниот дел од Р. Македонија, а колкав за западниот дел.

Решение:

Според изокерауничката карта на Р. Македонија, просечниот годишен број на непогодни денови T_d (денови со грмотевици) во централниот дел од земјата изнесува $T_d = 30 - 40$, додека во западниот дел тој број изнесува $T_d = 40 - 50$.

За пресметка на густината на атмосферските празнења по km^2 ќе го усвоиме моделот од релацијата (2.9):

$$N_g = 0{,}04 \cdot T_d^{1{,}25}.$$

Слика 1. Изокерауничка карта на Р. Македонија

Според тоа, за централниот дел на Р. Македонија тој број ќе се движи во границите:

$N_{g1} = 0{,}04 \cdot 30^{1{,}35} = 2{,}808$ удари/km^2, годишно;

$N_{g2} = 0{,}04 \cdot 40^{1{,}35} = 4{,}024$ удари/km^2, годишно;

т.е. $2{,}808 \le N_g \le 4{,}024$ удари/km^2, годишно.

На сличен начин се добива дека за западниот дел од Р. Македонија тој број ќе се движи во границите:

$4{,}024 \le N_g \le 5{,}318$ удари/km^2, годишно.

■ ■ ■

Задача 2.7. Громобран со височина h = 30 m штити трансформаторска станица 35/10 kV/kV, поставена на рамен терен. Колкав ќе биде просечниот годишен број на атмосферски празнења во громобранот N_L ако специфичниот број на атмосферските празнења по km^2 во регионот изнесува N_g = 3,5 удари/km^2, годишно.

Решение:

За објекти со височина $h < 150$ m, поставени на рамен терен може да се смета дека просечниот годишен број на удари на молњата што ќе го примат врз себе изнесува:

$$N_L = N_g \cdot S_p = N_g \cdot \pi \cdot R_{ek}^2 .$$

Во оваа релација со S_p е означена т.н. "пресметковна, (атрактивна) површина од земјата од која ударите на громот ќе ги привлече врз себе објектот (громобранот) којшто ја екранира таа површина. Притоа се зема дека е $R_{ek} = 3 \div 3,5 \cdot h$

Ќе ја усвоиме поголемата вредност т.е.:

$R_{ek} = 3,5 \cdot h = 3,5 \cdot 30 = 105$ m.

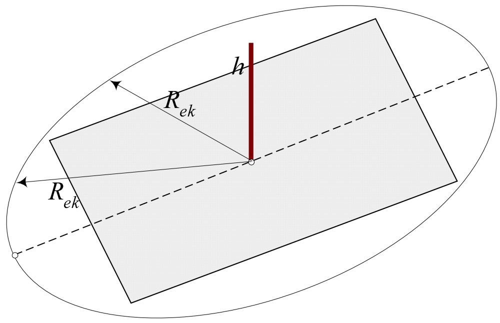
Во тој случај ќе добиеме:

$$S_p = R_{ek}^2 \cdot \pi = 105^2 \cdot \pi = 34,636 \text{ m}^2 \equiv 0,003464 \text{ kr}$$

$$N_L = N_g \cdot S_p = 3,5 \cdot 0,034636 = 0,121 \text{ удари/год.}$$

Значи периодата на повторување на атмосферските празнења во громобранот ќе биде:

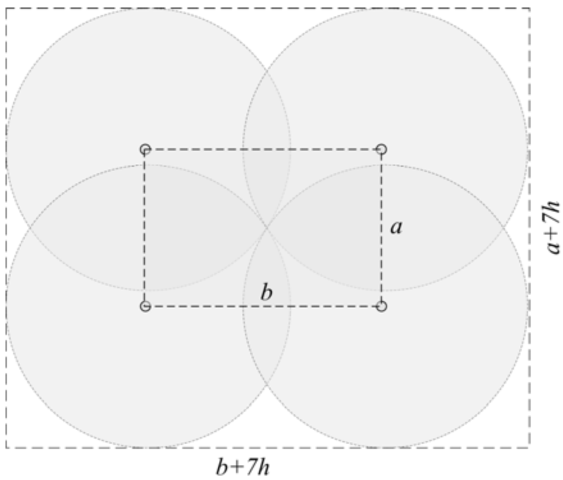
$T = 1/N_L = 1/0,121 = 8,25$ години помеѓу два удара на гром.



Слика 1.

■ ■ ■

Задача 2.8. Трансформаторска станица TS 110/10 kV/kV, поставена на рамен терен, зафаќа плоштина во форма на правоаголник со страници a = 40 m и b = 60 m. Се штити од директни атмосферски празнења со четири громобрани, со височини h = 20 m, поставени во темињата на правоаголникот. Колкав ќе биде просечниот годишен број на атмосферски празнења во громобранската заштита N_L = ? ако специфичниот број на атмосферските празнења по km^2 во регионот изнесува N_g = 3,5 удари/km^2, годишно.



Слика. 1. Изложена површина на громобранската заштита

Решение:

Изложената површина S_p во случајот на отворена разводна постројка или трансформаторска станица со димензии во форма на правоаголник со страници $a \times b$, штитена со громобрани со височини h, согласно (2.15) изнесува:

$$S_p = (a + 7 \cdot h) \times (b + 7h), \text{ или:}$$

$$S_p = (40 + 140) \times (60 + 140) = 180 \times 200 = 36.000 \text{ m}^2 = 0,036 \text{km}^2 .$$

Просечниот годишен број на удари во громобранската заштита сега ќе биде:

$$N_L = N_g \cdot S_p = 3,5 \cdot 0,036 = 0,126 \text{ удари/годишно.}$$

Значи треба да се очекува дека, во просек, еднаш на осум години ќе доаѓа до директно атмосферско празнење во некој од громобраните од трансфоматорската станица.

■ ■ ■

Задача 2.9. Водот 110 kV Осломеј – Самоков – Скопје 3, со должина L = 65 km, минува низ терен со T_d = 60 непогодни денови годишно, што одговара на приближно $T_h = 1,5 \cdot T_d = 90$ непогодни часови/год. Просечната височина на столбовите, сметано од основата до нивниот врв, изнесува Hst = 25 m, додека вкупниот број на распони изнесува n = 202, така што просечниот распон изнесува a_{sr} = 322 m. Просечната вредност на провесот на заштитното јаже изнесува f_{zj} = 9 m. Да се пресмета плоштината S_p од вкупната површина што ја екранира овој вод како и вкупниот годишен број на удари на молњата што ги прима врз себе овој вод N_L = ?

Решение:

Најнапред ќе ја пресметаме просечната височина h_{sr} на заштитното јаже над земјата:

$$h_{sr} = H_{st} - (2/3) \cdot f_{zj} = 25 - (2/3) \cdot 9 = 19 \text{ m} .$$

Плоштината S_p што ја екранира овој вод претставува правоаголник со должина L, колку што изнесува должината на самиот вод, и широчина $D = 2 \times 3,5 \cdot h_{sr} = 7 \cdot h_{sr}$, т.е.:

$$S_p = L \times D = L \times (7 \cdot h_{sr}) = 65 \times (7 \cdot 0,019) = 8,645 \text{ km}^2 .$$

Специфичниот број на атмосферските празнења по km^2 во регионот низ којшто минува овој вод, согласно (2.9) ќе биде:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} = 0,04 \cdot 60^{1,25} = 6,68 \text{ удари/km}^2\text{, годишно.}$$

Според тоа, вкупниот годишен број N_L на директни празнења во водот ќе бидат:

$$N_L = N_g \cdot S_p = 6,68 \cdot 8,645 = 57,75 \text{ удари/годишно.}$$

Доколку за проценка на годишниот број на удари N_L во водот ја користиме релацијата (2.17), ќе добиеме:

$$N'_L = 0,1 \cdot N_g \cdot (28 \cdot h_{sr}^{0,6} + b) = 0,1 \cdot 6,68 \cdot (28 \cdot 19^{0,6} + 0) = 109,443 .$$

Тоа се, значи, 109,443 удари/100 km, годишно. Бидејќи разгледуваниот вод е долг L = 65 km, тогаш вистинскиот број на удари во водот N_L ќе биде:

$$N_L = \frac{L}{100} \cdot N'_L = \frac{65}{100} \cdot 109,443 = 71,14 \text{ удари/годишно.}$$

■ ■ ■

3. НАДВОРЕШНА ЗАШТИТА ОД ДИРЕКТНИ АТМ. ПРАЗНЕЊА

Задача 3.1. Облакодер со димензии на основата: должина L = 20 m, широчина W = 20 m и со височина H = 60 m, е осамен на рамно тло. Керауничкото ниво во обласа во којашто се наоѓа објектот изнесува T_d = 40 дена (N_g = 4,02 удари/km^2, год.). Да се пресмета атрактивната површина на објектот A_e како и вкупниот годишен број на удари N_d на громот во него. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за овој објект.

Решение:

Според релацијата (2.18) атрактивната површина на објектот ќе биде:

$$A_e = L \cdot W + 6H \cdot (L+W) + 9\pi H^2 = 116.588\ \text{m}^2 = 0{,}116588\ \text{km}^2 .$$

Вкупниот просечен годишен број удари во објектот, во согласност со (2.19), ќе изнесува:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d = 4{,}02 \cdot 0{,}116588 \cdot 1 = 0{,}469 \text{ удари/год.}$$ (C_d = 1 согласно табела 2.18).

Прифатливиот годишен број на удари во облакодерот N_c, во согласност со изложеното во точката 2.7.2 ќе биде:

$$N_c = \frac{5{,}5 \cdot 10^{-3}}{C} \left(\frac{\text{удари}}{\text{годишно}} \right);$$

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 = 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 3;$$

$$N_c = \frac{5{,}5 \cdot 10^{-3}}{3} = 1{,}83 \cdot 10^{-3}\ \frac{\text{удари}}{\text{год.}}$$

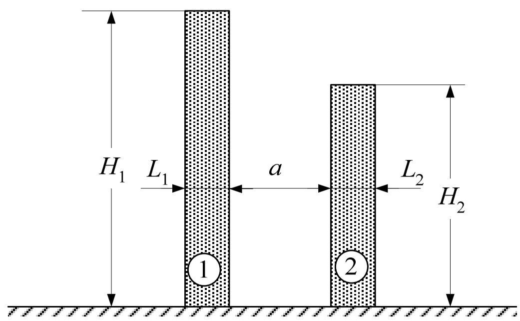
Бидејќи е вкупниот број на удари N_d далеку поголем од прифатливиот број N_c, ќе биде потребно да се предвиди надворешна громобранска инсталација. Факторот на ефикасност E на усвоениот СЗАП треба да биде:

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} = 1 - \frac{1{,}83 \cdot 10^{-3}}{0{,}469} = 0{,}996 .$$

Според табелата 2.14 потребно е да се предвиди примена на СЗАП којшто ќе обезбеди највисоко, I заштитно ниво + дополнителни мерки.

■ ■ ■

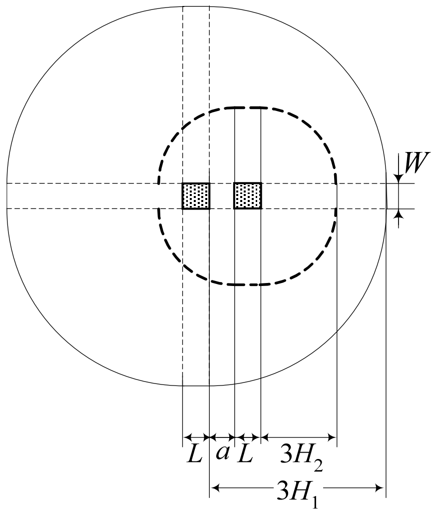
Задача 3.2. Два облакодера со димензии $L_1 = L$ = 20 m, $W_1 = W$ =20 m и H_1 = 60 m и $L_2 = L$ =20 m, $W_2 = W$ =20 m и H_2 = 36 m, се сместени еден покрај друг, на растојание a = 40 m, на рамно тло (слика 1). Керауничкото ниво во обласа во којашто се наоѓа објектот изнесува T_d = 40 дена (N_g = 4,02 удари /km^2, год.). Да се пресмета изложената површина на обата објекта A_{e1} и A_{e2} како и вкупниот годишен број на удари N_{d1} и N_{d2} на громот во нив. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за вториот објект. Задачата да се реши и за случајот кога височината на вториот облакодер изнесува H_2 =50 m.



Слика 1

Решение:

За да се реши задачата, најпрво треба да се определи изложената површина на објектите. Првиот објект има висина H_1 = 60 m, а вториот висина H_2 = 36 m. Атрактивната површина на првиот објект се определува на многу сличен начин како атрактивната површина на објектот во претходната задача, а радиусот на кружницата која ќе ја оформи е $R_1 = 3H_1 = 3{\cdot}60 = 180$ m. На сличан начин, површината која ја зафаќа вториот објект е $R_2 = 3H_2 = 3{\cdot}36 = 108$ m. Како што е прикажано на сликата 2, атрактивната површина на повисокиот објект ја опфаќа атрактивната површина на објектот со помала висина. Затоа, заштитата за првиот објект ќе биде заштита и за вториот објект, односно за вториот објект нема да има потреба од сопствена заштита.



Слика 2

Користејќи ја релацијата (2.18), се пресметува атрактивната површина на првиот објект:

$$A_e = L \cdot W + 6H \cdot (L+W) + 9\pi H^2 = 116.588 \text{ m}^2 = 0{,}116588 \text{ km}^2$$

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d = 4{,}02 \cdot 0{,}116588 \cdot 1 = 0{,}469 \text{ удари /годишно}$$

$$N_c = \frac{5{,}5 \cdot 10^{-3}}{C} \left(\frac{\text{удари}}{\text{годишно}} \right);$$

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 = 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 3 \;\Rightarrow\; N_c = \frac{5{,}5 \cdot 10^{-3}}{3} = 1{,}83 \cdot 10^{-3} \;\frac{\text{удари}}{\text{год.}}$$

По пресметката на прифатливиот број удари, на начин идентичен како во претходната задача, се добива следното:

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} = 1 - \frac{1{,}83 \cdot 10^{-3}}{0{,}469} = 0{,}996$$

Во вториот случај, висината на втората зграда е поголема, односно H_2 = 50 m. Јасно е дека во овој случај дел од атрактивната површина на втората зграда ќе „излегува“ надвор од атрактивната површина на првиот објект. Поради тоа, за да се провери дали за втората зграда е потребно да се предвиди дополнителна заштита, треба да се пресмета токму таа површина.

Определувањето на оваа површина може да се направи со пресметка на неколку одделни плоштини, на следниот начин.

$$P_{H1} - P_{\Delta} = P_0 \;; \quad A'_{d2} = P_{H2} - P_0$$

Плоштината на еден исечок може да се определи според формулата:

$$P_{\text{исечок}} = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{360} = \frac{r \cdot l}{2}$$

Исечоците формирани со круговите чии радиуси изнесуваат $R_1 = 3 \cdot H_1$ и $R_2 = 3 \cdot H_2$ се пресметуваат со користење на оваа равенка. За да се направи сето тоа, најнапред е потребно да се пресметаат координатите x_M и y_M на пресечната точка M. Тоа се прави со решавање на систем од две равенки на кружница, односно:

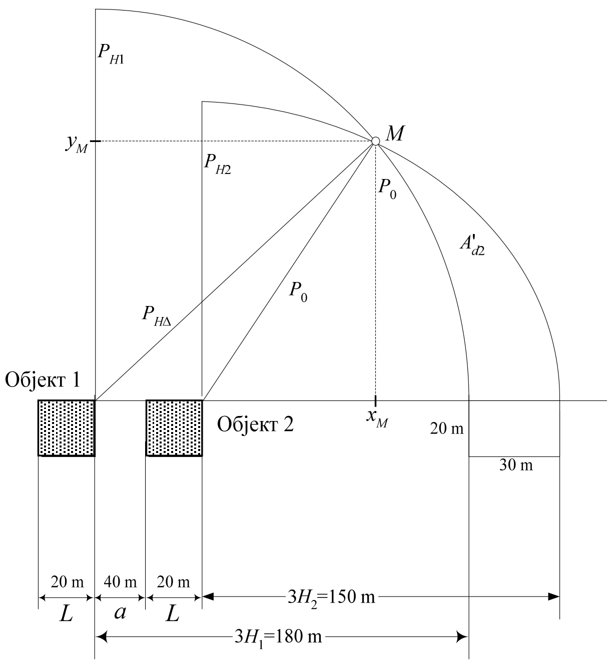
$$x^2 + y^2 = R_1^2$$

$$(x-(a+L))^2 + y^2 = R_2^2$$

Со замена на бројните вредности се добива следниот систем равенки:

$$x^2 + y^2 = 180^2$$

$$(x-60)^2 + y^2 = 150^2$$



Слика 3

и со неговото решавање се добива бараното решение:

x_M = 122,5 m; y_M = 140,5 m.

$$P_{H1} = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{360} = \frac{(3H_1)^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{2}$$

$$\alpha = \text{arctg}\,(\frac{y_M}{x_M}) = 51,31° \;\Rightarrow\; P_{H1} = 14509 \text{ m}^2.$$

Потоа се пресметува површината P_Δ и тоа со примена на Хероновата формула.

$$P_\Delta = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \;; \quad s = (a+b+c)/2$$

Поаѓајќи од : $a = 3H_1$, $b = 3H_2$ и $c = a + L = 60$ се добива: $s = \dfrac{3H_1 + 3H_2 + 60}{2} = 195$ m.

$$P_\Delta = \sqrt{195 \cdot (195-180) \cdot (195-150) \cdot (195-60)} = 4215,4 \text{ m}^2$$

Плоштината на вториот исечок се пресметува на сличен начин како и на првиот:

$$\alpha = arctg(\frac{140,5}{(112,5-60}) = 69,51°;$$

$$P_{H2} = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{360} = \frac{(3H_2)^2 \cdot \pi \cdot \alpha}{2} \;\Rightarrow\; P_{H2} = 136485,5 \text{ m}^2$$

Следува дека:

$$A'_{d2} = P_{H2} - (P_{H1} - P_\Delta) = 3354,8 \text{ m}^2$$

$$A_{d2} = 2 \cdot A'_{d2} + P_{\text{правоаголник}} = 2 \cdot 3354,8 + 600 = 7309,6 \text{ m}^2 \approx 0,00731 \text{ km}^2$$

Проверката за потребниот систем за заштита се прави на сличен начин како и во претходните примери:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_d = 4,02 \cdot 0,00731 \cdot 1 = 0,0294 \text{ удари /годишно}$$

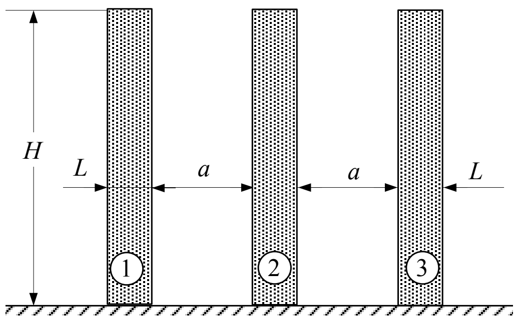
$$N_c = 5,5 \cdot 10^{-3} / C = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ удари/год. } (C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 = 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 3);$$

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} = 1 - \frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{0,0294} = 0,94 .$$

■ ■ ■

Задача 3.3. Три облакодери со еднакви димензии L = 20 m, W = 20 m и H = 60 m, се поставени во права линија, еден покрај друг, на заемни растојанија d = 20 m, како на сл. 1 и се наоѓаат во населено место во кое доминира нискоградба. Керауничкото ниво во областа во којашто се наоѓа објектот изнесува T_d = 30 дена (N_g = 2,81 удари/km^2, год.).

Да се пресмета атрактивната површина на средниот објект A_{e2} како и вкупниот годишен број на удари N_{d2} на громот во него. Дали е потребна надворешна громобранска заштита за овој објект и кое заштитно ниво треба да се предвиди за таа цел.

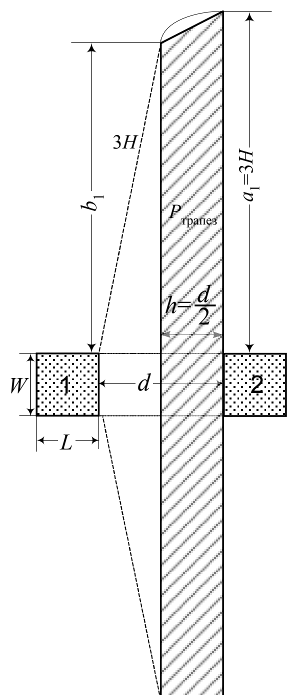


Слика 1

Решение:

Трите објекти се наоѓаат на релативно мало растојание, и секој од нив има иста висина. Поради тоа просторот помеѓу било кои два соседни објекта подеднакво ќе им припаѓа и на обата објекта коишто го опкружуваат.

Да ја посматраме сега сликата 2 на која е прикажан просторот помеѓу првиот и вториот објект. Според сликата 2, атрактивната површина на вториот објект во тој дел од просторот е приближно трапезна. Ваква иста површина постои и помеѓу вториот и третиот објект, но таа поради поедноставување на цртежот, не е прикажана.



Слика 2

Плоштината на трапез со висина h и должина на паралелните страни a и b се пресметува според формулата:

$$P_{\text{трапез}} = h \cdot (a+b)/2$$

Во нашиот случај должината на поголемата страна на трапезот изнесува $a = 2a_1+W$ додека помалата страна ќе биде: $b = 2b_1+W$. Притоа, во согласност со сликата 2 ќе биде:

$$a_1 = \sqrt{(3H)^2 - (d/2)^2} = \sqrt{180^2 - 10^2} = 179,7 \,\text{m} \text{ и}$$

$$b_1 = \sqrt{(3H)^2 - d^2} = \sqrt{180^2 - 20^2} = 178,9 \,\text{m}$$

Оттука следува:

$$a = 2a_1 + W = 2 \cdot 179,7 + 20 = 379,4 \text{ m}$$
$$b = 2b_1 + W = 2 \cdot 178,9 + 20 = 377,8 \text{ m};$$
$$P_{\text{трапез}} = \frac{a+b}{2} \cdot h = \frac{379,4 + 377,8}{2} \cdot 10 = 3786 \text{ m}.$$

Вкупната атрактивна површина на вториот објект ќе се добие кога на двојната површина од трапезот се додаде двојната површина на правоаголникот со страници L и $3H$:

$$P_{\text{правоаголник}} = L \cdot (3H) = 20 \cdot 180 = 3600 \text{ m}^2 .$$

Според тоа атрактивната површина на вториот објект (средната зграда) ќе биде:

$$A_{e2} = 2P_{\text{трапез}} + 2P_{\text{правоаголник}} = 2 \cdot 3786 + 2 \cdot 3600 = 14.772 \text{ m}^2$$ или приближно

$$A_{e2} \approx 0,0148 \text{ km}^2.$$

Понатаму останува да се определи годишниот број на удари во вториот објект N_{d2}, применувајќи ја истата постапка од претходно, но водејќи притоа сметка дека во овој случај, константата C_d ќе биде $C_d = 0,5$.

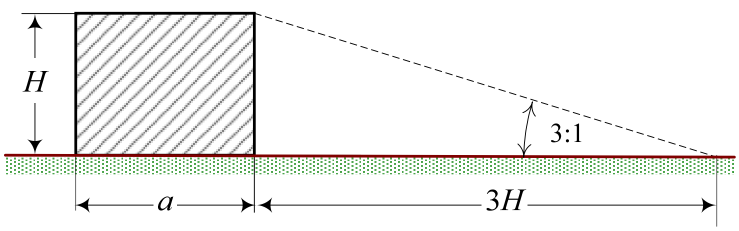
$N_{d2} = N_g \cdot A_{e2} \cdot C_d = 2,81 \cdot 0,0148 \cdot 0,5 = 0,0208$ удари /годишно. И на крајот се добива:

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 = 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 = 3 \quad \Rightarrow \quad N_c = \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{3} = 1,83 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{удари}}{\text{год.}}$$

$$E_2 = 1 - \frac{N_c}{N_{d2}} = 1 - \frac{1,83 \cdot 10^{-3}}{0,0208} = 0,912$$

■ ■ ■

Задача 3.4. Станбен објект со квадратна основа, со страница a = 15 m и висина H = 9 m (слика 1) се наоѓа во област со кераунично ниво T_d = 45 дена. Да се определи просечниот број директни удари во објектот. Потоа, со користење на релациите за заштитна зона на стапест громобран, да се одреди минималната висината на стапест громобран кој треба да биде поставен на квадратниот покрив во неговиот центар. Колкав ќе биде просечниот годишен број атмосферски празнења во громобранот?



Слика 1

Решение:

Бројот на удари на гром N_d во еден објект се определува со користење на познатата релација:

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot C_d$$

За неговото пресметување најнапред ќе биде потребно да се определат густината на атмосферските празнења N_g и атрактивната површина A_d. Притоа имаме:

$L = a = 15$ m; $W = a = 15$ m; $H = 9$ m; $C_d = 1$;

$$A_d = L \cdot W + 6H \cdot (L + W) + 9\pi H^2 \tag{1}$$

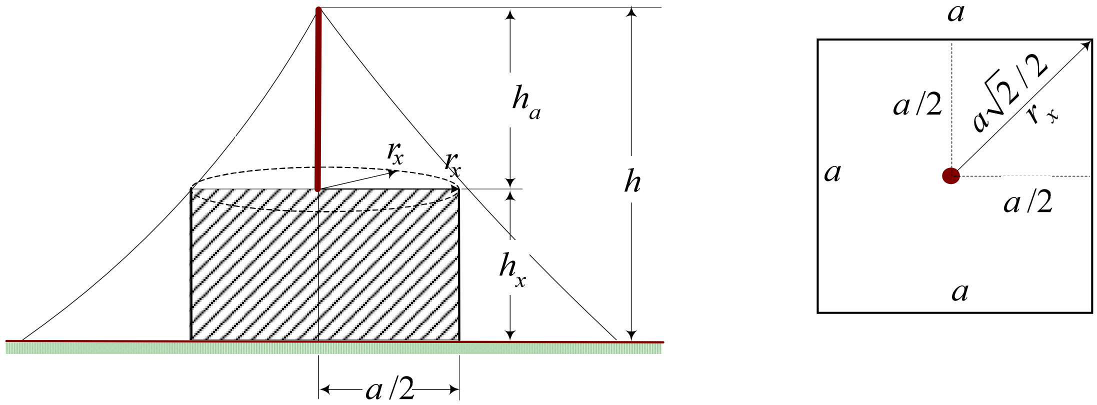
$$A_d = 15 \cdot 15 + 6 \cdot 9 \cdot (15 + 15) + 9 \cdot \pi \cdot 9^2 = 4135{,}22 \text{ m}^2 = 0{,}0041352 \text{ km}^2$$

$$N_g = 0{,}04 \cdot T_d^{1{,}25} = 4{,}66 \text{ удари/km}^2\text{, год.} \tag{2}$$

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot C_d = 4{,}66 \cdot 0{,}0041352 \cdot 1 = 0{,}0193 \text{ удари/год}. \tag{3}$$

Минималната висина на стапестиот громобран се определува ако се почитува условот објектот да ја допира ротационата површина во вид на шатор (слика 2), чија генератриса се определува со помош на емпириската формула (3.1):

$$r_x = p \cdot \frac{1{,}6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x / h} = p \cdot \frac{1{,}6 \cdot h_a}{1 + h_x / h}; \quad p = 1 \text{ за } h \leq 30 \text{ m}. \tag{4}$$



Слика 2

Нека со h_a ја означиме потребната висина на громобранот додека со $h_x = H$ ја означиме висината на штитениот објект. Тогаш минималната потребна висина h на која што ќе се наоѓа врвот од громобранот, сметано од од нивото на земјата до неговиот врв, се добива ако е задоволен условот формираниот шатор од громобранот да ја ги допира рабовите на покривот. Тоа значи дека на висина h_x = 9 m, што е и висина на објектот, радиусот на шаторот треба да биде $r_x = a\sqrt{2}/2$ = 10,607 m. Кога овие големини ќе се внесат во формулата (4), се добива квадратна равенка, чие решение ја дава потребната висина h.

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

$$1{,}6 \cdot h^2 - (1{,}6 \cdot h_x + r_x) \cdot h - r_x \cdot h_x = 0$$

$$1{,}6 \cdot h^2 - 25{,}007 \cdot h - 95{,}459 = 0$$

$$h = 18{,}02 \approx 18 \text{ m}$$

Потоа лесно се одредува и висината h_a на самиот громобран, со која тој се надвишува над покривот од зградата: Таа изнесува:

$h_a = h - h_x = 18 - 9 = 9$ m.

Со вака определената висина на громобранот, може да се пресмета просечниот годишен број на удари во громобранот. Атрактивната површина на громобранот едноставно може да се пресмета и преку релацијата:

$$A_d = \pi \cdot R_{ek}^2,$$

Во неа еквивалентниот радиус R_{ek} се определува преку вкупната висина на громобранот, односно $R_{ek} = 3 \div 3{,}5 \cdot h$. Ако за еквиалентниот радиус на актрактивната површина се усвои R_{ek}=3,5·h, тогаш за атрактивната површина се добива:

$$A_d = \pi \cdot (3,5 \cdot 18)^2 = 12469 \text{ m}^2 = 0,012469 \text{ km}^2 \ .$$

Сличен резултат се добива со користење на формулата (1) во која висината на објектот H се заменува со вк. висината на громобранот h. Во тој случај се добива следниот резултат:

$$A_d = L \cdot W + 6h \cdot (L + W) + 9\pi h^2 = 15 \cdot 15 + 6 \cdot 18 \cdot (15 + 15) + 9\pi \cdot 18^2 = 13605 \text{ m}^2$$

Бројот на директни удари во громобранот ќе биде:

$$N_d = N_g \cdot A_d \cdot C_d = 4,66 \cdot 0,01247 = 0,0581 \text{ удари/год.},$$

или приближно еднаш на 17 години бидејќи периодичноста на ударите изнесува $T = 1/N_d \approx 17$ год.

■ ■ ■

Задача 3.5. Станбениот објект анализиран во претходниот пример 3.4 по определен број години од неговата изградба е дограден со уште еден дополнителен спрат чија височина изнесува h_d = 3 m, така што вкупната конечна височина на објектот во тој случај изнесува H = 12 m. По завршената изградба, бил искористен истиот громобран со височина h_a = 9 m, кој повторно бил поставен на истото место. Да се провери дали во овој случај објектот ќе биде штитен. Колкав ќе биде просечниот број на удари во громобранот во новите услови.

Решение:

Во овој случај висината на објектот е $h_x = H = 9+3 = 12$ m. Доколку за нејзината заштита од директни удари на громот се искористи истиот громобран со висина h_a = 9 m, поставен на средината од покривот, тогаш вкупната висина на громобранската заштита ќе биде:

$h = h_x + h_a = 12 + 9 = 21$ m.

Да провериме дали и сега крајните точки од зградата „влегуваат“ во шаторот. Тоа значи, дека за новата висина на објектот h_x треба да се определи нова вредност r_x која ќе се спореди со димензиите на објектот.

$$r_x = \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x / h} = \frac{1,6 \cdot (21 - 12)}{1 + 12/21} = 9{,}16 \text{ m} \ .$$

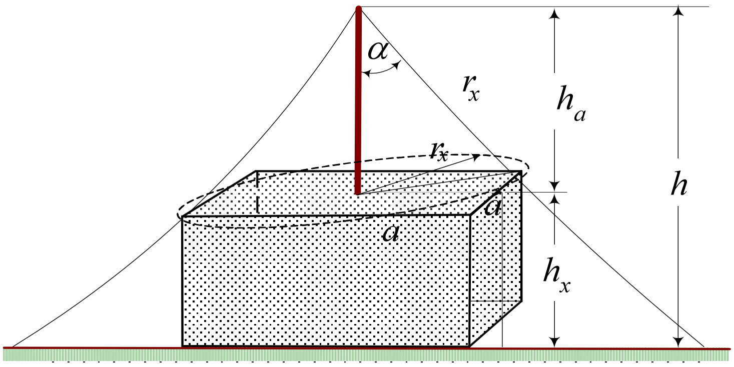
Од добиениот резултат ($r_x < a\sqrt{2}/2 = 10,607$ m) произлегува дека во новосоздадените услови целиот објект нема да биде заштитен, т.е. стариот громобран којшто имал висина h_a = 9 m и ги задоволувал условите за сигурна заштита сега ќе треба да се продолжи.

Новата вредност на потребната височина на громобранот ќе ја пресметаме на наполно ист начин како и во претходната задача. На тој начин се добива:

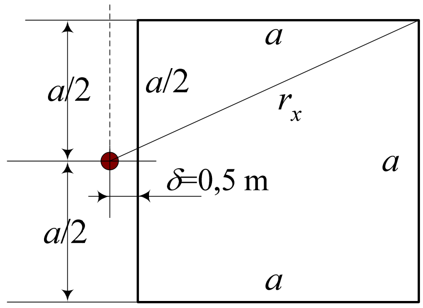
$$h = 22,21 \text{ m}, \quad h_a = h - H = 22,21 - 12 = 10,21 \text{ m}.$$

■ ■ ■

Задача 3.6. Објектот опишан во претходниот пример претставува станбена зграда чија конструкција и покрив ее направени од вообичаен материјал. Со помош на табелата 2.15 (стр. 48) да се определат приближните вредности на заштитниот агол на громобранот. Да се понуди решение за случај кога громобранот не може да биде поставен на покривот на зградата, туку истиот треба да се постави од едната страна на зградата, на растојание од 0,4 m.



Слика 1



Слика 2

Решение:

Бидејќи во зградата ќе живеат луѓе, таа ќе преставува објект кој треба да биде заштитен од диркетни атмосферски празнења со највисокото, прво, ниво на заштита. Според табелата 2.15, за да се задоволи прво ниво на заштита на објектот со средишно поставен громобрански стап, неговата висина треба да биде h_a = 11 метри, а заштитиниот агол да биде $\alpha = 45^\circ$. Со ваквиот громобрански стап ќе се формира заштитна зона во облик на конус која ќе има радиус на заштита $r_x = h_a \cdot \mathrm{tg}\,\alpha = 11$ метри. Во тој случај имаме:

$$r_x > a\sqrt{2}/2 = 10,607 \text{ m.}$$

Ако пак громобранот треба да биде поставен покрај зградата, на растојание од δ=0,5 m од неа, според скицата прикажана на сликата 2, тогаш потребното растојание r_x на ниво $h_x = H = 12$ m што треба да се опфати со заштитната зона на громобранот ќе изнесува:

$$r_x = \sqrt{(a+\delta)^2 + (a/2)^2} = \sqrt{15,5^2 + 7,5^2} = 17,22 \text{ m}.$$

Тогаш, според табелата 2.15, со громобранот нема да може да се обезбеди прво ниво, па дури ни второ ниво на заштита. Со вака поставен громобран би можело да се обезбеди трето ниво на заштита. Едно од можните решенија е да се постави громобран со вкупна ввисина $h = h_x + h_a = 12+10 = 22$ m бидејќи според табелата 2.15 громобран со активната висина h_a = 10 m со заштитен агол $\alpha = 61^\circ$ ќе обезбеди радиус на основата на конусот од 18,04 метри, што е повеќе од потребните 17,22 метри.

■ ■ ■

Задача 3.7. За облакодерот од задачата 3.1 (L = 20 m, W = 20 m и H = 60 m) е потребно да се изведе надворешна громобанска заштита. Заштитата се состои од еден единствен громобран со висина h_a, поставен централно, точно на средината од покривот.

Да се пресметаат потребите височини на громобраните во секоја од споменатите варијанти. При пресметувањето на задачата да се примени класичниот графоаналитички пристап, според релациите (3.1) ÷ (3.4).

Решение:

На ист начин како што е решен проблемот од задачата 3.4 се постапува и овде. Единствената разлика помеѓу овие два случаја е тоа што височината на громобранот е овде поголема од 30 метри па параметарот p што фигурира во релацијата (3.1) нема да биде однапред познат бидејќи неговата вредност ќе зависи од непознатото решение h, т.е. $p = \sqrt{30/h}$. Затоа задачата ќе ја решиме на наполно идентичен начин како и во задачата 3.4, но со претпоставена вредност на параметарот p. нека претпоставиме дека активната височина на громобранот изнесува h_1 = 20 m, т.е. $h = H + h_1$ = 60+20=80 m. Тогаш за параметарот p ќе добиеме:

$p = \sqrt{30/80} = 0,612$; $r_x = W \cdot \sqrt{2}/2 = 14,142$ m;

Понатаму имаме:

$$r_x = p \cdot \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + h_x / h} = p \cdot \frac{1,6 \cdot h_a}{1 + h_x / h} \Rightarrow 1,6 \cdot p \cdot h^2 - h \cdot (1,6 p \cdot h_x + r_x) - r_x \cdot h_x = 0$$

$$0,9798 \cdot h^2 - 72,9299 \cdot h - 848,528 = 0 \Rightarrow h = 84,66 \text{ m}$$

Вака добиеното решение е приближно бидејќи е добиено со претпоставена вредност за параметарот p = 0,612. Затоа ќе извршиме уточнување на решението на тој начин што ќе ја повториме истата постапка со нова вредност на параметарот p:

$p = \sqrt{30/h} = \sqrt{30/84,66} = 0,595$.

Со новата вредност за параметарот p добиваме ново решение:

$$0,95245 \cdot h^2 - 71,289 \cdot h - 848,528 = 0 \Rightarrow h = 85,29 \text{ m}$$

После само уште едно вакво уточнување го добиваме практично конечното решение:

$h = 85,38$ m.

Значи за бараната височина на громобранот добиваме:

$h_1 = h - H =$ 85,38 – 60 = 25,38 m.

Лесно може да се провери дека вака добиеното решение го задоволува условот (4) сите делови од покривот на зградата да се наоѓаат во заштитната зона на громобранот ($r_x = a\sqrt{2}/2 = 14,142$ m).

■ ■ ■

4. ПРОСТИРАЊЕ НА БРАНОВИ. ПРИМЕНА НА ПЕТЕРСЕНОВОТО ПРАВИЛО

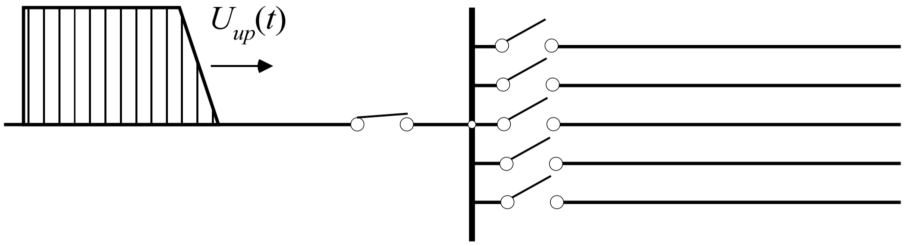
Задача 4.1*. Пренапонски бран, настанат со директен удар на гром во фазниот спроводник на поголема далечина, наидува на собирниците од една постројка на која што има приключено уште 5 други надземни водови. Да се определи обликот и амплитудата на напонот на собирниците $U_s(t)$ за следните случаи:

а) кога сите 5 водови се исклучени;

б) кога е вклучен само еден вод и

в) кога сите 5 водови се вклучени.

Упадниот бран може да се претстави идеализирано со линеарно растечко чело и со константен грб со бесконечно траење. Амплитудата на упадниот бран изнесува U_m = 600 kV, додека времетраењето на челото изнесува $T_c = t_f = 1$ μs. Сите водови имаат исти карактеристики и исти карактеристични импеданции Z_C = 400 Ω.



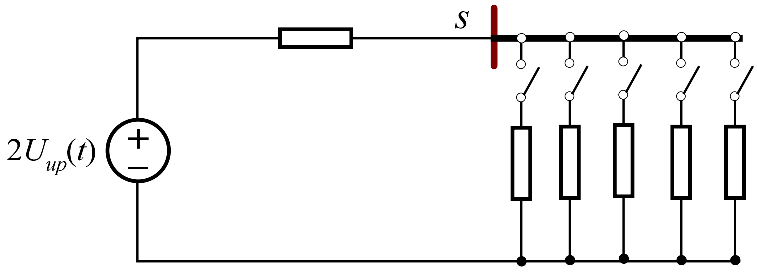
Слика 1. Упаден бран во разводна постројка со 5 водови

Р е ш е н и е:

Ако со $a = U_m/T_c$ ја означиме стрмнината на упадниот бран на неговото чело, тогаш обликот на упадниот бран $U_{up}(t)$ во разгледуваниот случај (бран со косоаголно чело и рамен грб) се опишува со следната релација:

$$U_{up}(t) = U_m \cdot a \cdot h(t) - U_m \cdot a \cdot (t - T_c) \cdot h(t - T_c); \;\; a = U_m / T_c \qquad (1)$$

Врз основа на Петерсеново правило ја формираме Петерсеновата шема во која упадниот бран го претставуваме со еден напонски генератор со внатерешна емс $E = 2 \cdot U_{up}(t)$ и внатрешна отпорност Z_C. Освен тоа секој надземен вод, приклучен во постројката, сметајќи дека е доволно долг, ќе го претставиме со коцентриран отпорник со отпорност Z_C. На тој начин се добива следното еквивалентно коло прикажано на сликата 2.



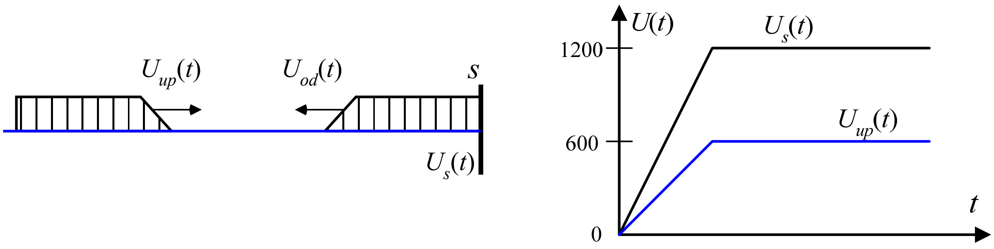
Слика 2. Петерсенова еквивалента шема за случајот а)

а) Случај кога сите 5 надземни вода се исклучени.

Кога сите 5 надземни вода се исклучени се добива точно колото прикажано на сликата 4.1.2. Во тој случај, бидејќи на собирниците s ништо не е приклучено, се добива дека важи:

$$U_s(t) = 2 \cdot U_{up}(t) = 2U_m \cdot a \cdot \left[t \cdot h(t) - (t - T_C) \cdot h(t - T_C) \right] \tag{2}$$

Обликот на напонот на собирниците $U_s(t)$ и обликот на упадниот бран се прикажани на следната слика 3.



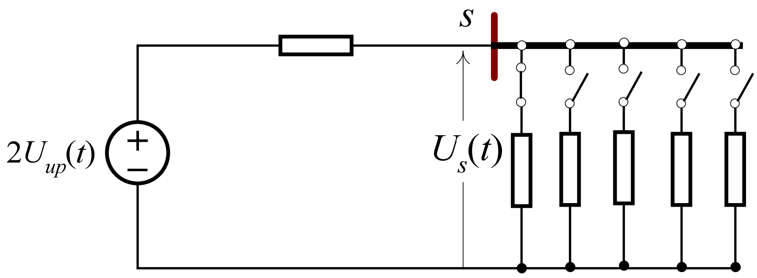
Слика 3. Облик на упадниот бран и напонот $U_s(t)$ за случајот а)

Одбиениот бран ќе го добиеме врз основа на релацијата:

$$U_s(t) = U_{up}(t) + U_{od}(t) \;\Rightarrow\; U_{od}(t) = U_s(t) - U_{up}(t) \equiv U_{up}(t)\,. \tag{3}$$

б) Случај кога еден од 5-те надземни вода е вклучен.

Кога е вклучен само еден надземен вод се добива колото од сликата 4.1.4.



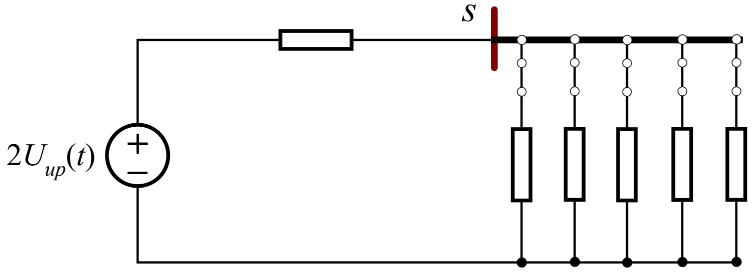
Слика 4. Петерсенова еквивалента шема за случајот б)

Јасно е дека во овој случај ќе имаме:

$$U_s(t) = 2 \cdot U_{up}(t) \cdot \frac{Z_C}{Z_C + Z_C} = U_{up}(t); \quad U_{od}(t) = 0 \;. \tag{4}$$

Бидејќи е $U_s(t) = U_{up}(t)$, врз основа на (4.1.3) се добива дека во овој случај ќе имаме U_{od} = 0 (слика 5).

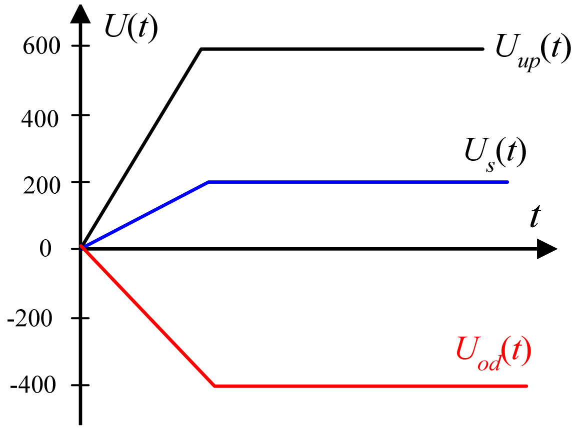
в) Случај кога еден сите 5 надземни вода се вклучени.

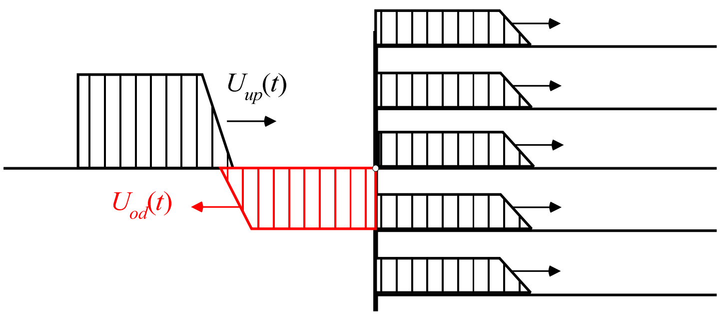


Слика 5. Петерсенова еквивалента шема за случајот в)

Кога се вклучени сите 5 надземни вода се добива колото од сликата 5. Ако со $Z_e = Z_C/5$ ја означиме еквивалентната имеданција на сите 5 приклучени вода, врз основа на колото од сл. 6 ќе добиеме:

$$U_s(t) = 2 \cdot U_{up}(t) \cdot \frac{Z_e}{Z_C + Z_e} = \frac{1}{3} \cdot U_{up}(t)\,. \tag{5}$$





Слика 6. Просторна распределба на брановите за случајот в)

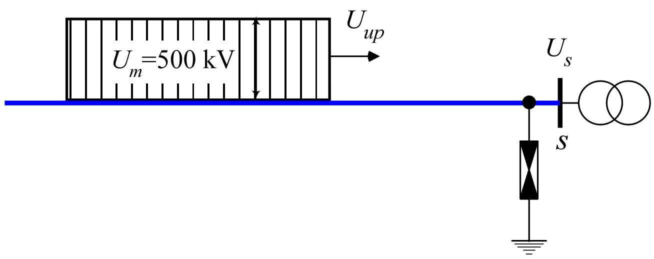
Значи, во случајот в) амплитудата на прекршените бранови (т.е. напонот на собирниците U_s) ќе биде 3 пати помала од амплитудата U_m на упадниот бран додека амплитудата на одбиениот бран ќе биде 2/3 од амплитудата на упадниот бран, т.е. $U_{od}(t) = (-2/3) \cdot U_{up}(t)$.

Од изложеното може да се заклучи дека амплитудата на напонот што ќе појави на собирниците при упад на пренапонски бран по водот ќе зависи од бројот на приклучените водови во постројката. Ви случајов, кога упадниот бран има амплитуда U_m = 600 kV, амплитудата на напонот $U_s(t)$ ќе се се движи во границите од 200 kV (за случајот кога сите 5 водови се вклучени), па се до 1200 kV, кога сите тие се исклучени. Обликот на напонот на собирниците $U_s(t)$ како и обликот на прекршените бранови што продолжуваат да се простираат по прилучените кон неа водови ќе биде ист со обликот на упадниот бран.

■ ■ ■

Задача 4.2*. Пренапонски бран, со правоаголно чело и бесконечно траење наидува на 110 kV собирници s на кои е непосредно приклучен енергетски трансформатор. Трансформаторот се штити со одводник на пренапони, поставен непосредно на неговите приклучоци. Карактеристичната импеданција на водот по којшто наидува упадниот бран изнесува Z_C = 400 Ω. Трансформаторот во првите моменти од импулсниот период се моделира со бесконечна импеданција $Z_T = \infty$. Одводникот на пренапони којшто реагира веднаш во истиот момент кога пренапонскиот бран стигнува до него може, во прва апроксимација, да се моделира со напречно (паралелно) поставен отпорник чија што вредност изнесува $R_{od} = 40\ \Omega$ и таа е константна за цело време на преодниот процес. Амплитудата на упадниот бран изнесува $U_m = 500$ kV.

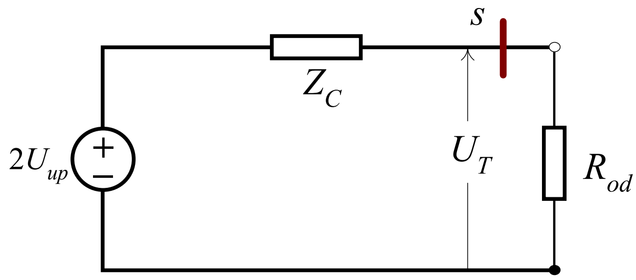
Да се пресмета максималната вредност напонот на собирниците U_s, т.е. на пренапонот на енергетскиот трансформатор $U_{T.\max}$.



Слика 1. Упад на пренапонски бран на енергетски тр-р

Р е ш е н и е:

Врз основа на Петерсеновото правило за случајов ќе ја нацртаме Петерсеновата шема. Таа е прикажана на сликата 2. Во неа одводникот е прикажан како активен отпорник со отпорност R_{od}.



Слика 2. Упад на пренапонски бран на енергетски трансформатор

Врз основа на шемата од сл. 2 се добива:

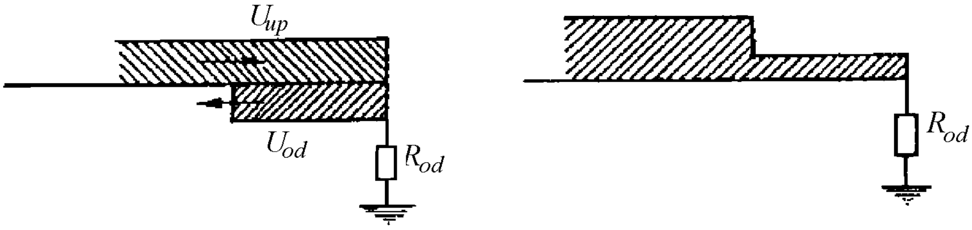
$$U_T = 2 \cdot U_{up} \cdot \frac{R_{od}}{Z_C + R_{od}} = 2 \cdot 500 \cdot \frac{40}{440} = 91 \text{ kV}.$$

Значи, максималниот пренапон што ќе се појави на клемите на енергетскиот трансформатор во случајов ќе биде само 91 kV, а тоа е многу помалку од неговиот подносив напон кој е од редот на 500 kV па и повеќе. Тоа се должи на заштитното дејство на одводникот кој со својата "мала" внатрешна отпорност успева безболно да го одведе во земјата пренапонскиот упаден бран и да ја заштити изолацијата на трансформаторот.

Од одводникот на пренапони ќе се одбие негативен бран кој започнува да се простира во упадниот вод, но во обратна (инверзна) насока. Амплитудата на одбиениот бран изнесува:

$$U_{od} = U_T - U_{up} = 91 - 500 = -409 \text{ kV}.$$

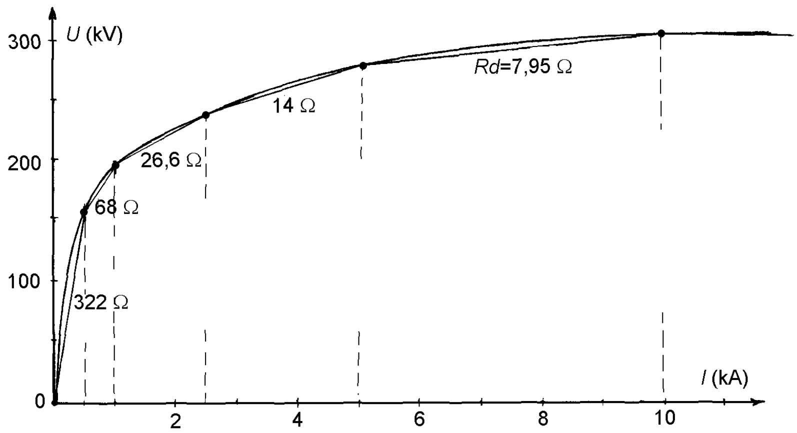
Негативната одбиена компонента на бранот, простирајќи се во инверзна насока, предизвикува намалување на напонот долж водот, како што е тоа прикажано на сликата 3. Значи доаѓа до намалување на напонот долж водот и во зоната пред одводникот на пренапони. Ова намалување на напонот со времето се шири (простира) од одводникот кон местото на атмосферското празнење.



Слика 3. Напонски бранови и просторна распределба на напонот

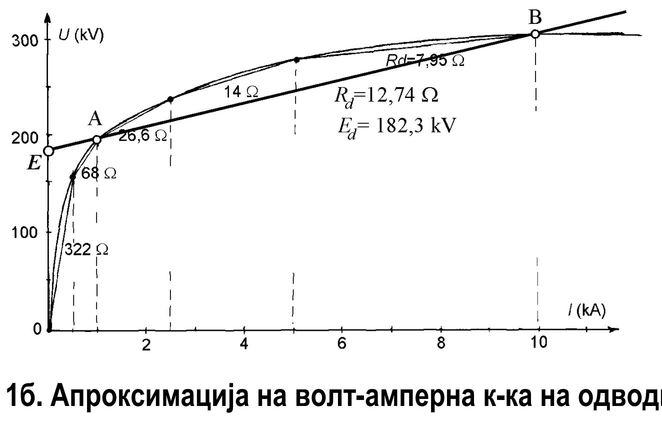
■ ■ ■

Задача 4.3. Задачата 4.2. да се реши уште еднаш но овојпат одводникот на пренапони да се моделира со модел според сликата 1б во кој по неговото реагирање тој се претставува со сериска врска од една емс и еден линеарен отпорник. Одводникот е од типот VOP 105, 10 kA, а неговата волт–амперна карактеристика е прикажана на сликата 4.3.1а.



Слика 1а. Волт-амперна к-ка на одводникот типо VOP 105, 10 kA

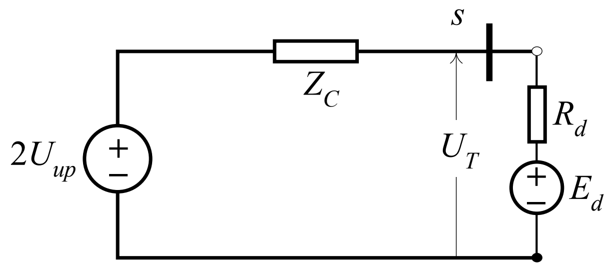
Р е ш е н и е:



Слика 1б. Апроксимација на волт-амперна к-ка на одводникот

На сликата 4б е прикажана апроксимираната волт-амперна (V-A) карактеристика на споменатиот одводник. Параметрите E_d и R_d изнесуваат: $E_d = 182.3$ kV; $R_d = 12.74\ \Omega$. Тие се проценети приближно, по графички пат, како што е тоа прикажано на сл. 4.3.1б, на тој начин што правата што минува низ точките A(1kA; 195 kV) и B(10 kA; 309.7 kV) се прогласува за V−A карактеристика на одводникот.

Бидејќи одводникот се активира веднаш по упадот на пренапонскиот бран, тој во Петерсеновата шема ќе се претстави со еквивалентниот напонски генератор, како што е тоа прикажано на сликата 2.



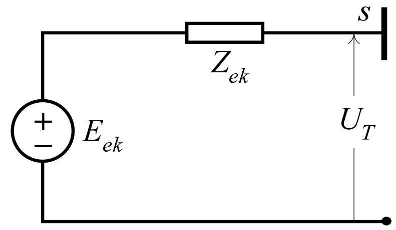
Слика 2. Упад на пренапонски бран на кој наидува на одводник

Двата напонски генератора од сликата 2. можат да се еквивалентираат со еден еквивалентен, со параметри E_{ek} и Z_{ek}:

$$Z_{ek} = Z_C \,||\, R_d = 400 \,||\, 12,74 = 12,347\ \Omega;$$

$$E_{ek} = Z_{ek} \cdot \left(2U_{up} / Z_C + E_d / R_d\right) = 207,5\ \text{kV}.$$

Сега Петерсеновото еквивалентно коло од сликата 2 можеме да го прикажеме на следниот начин (слика 3):



Слика 3. Петерсеново еквивалентно коло за разгледуваниот пример

Врз основа на сликата 3 се добива:

$$U_T = E_{ek} = 207,5\ \text{kV}.$$

Значи според уточнетиот приказ (апроксимација) на одводникот, кој дава пореалистични резултати, се доби дека амплитудата на пренапонот на трансформаторот ќе биде значително поголема, но сепак ќе биде повторно далеку од неговата дозволена вредност.

■ ■ ■

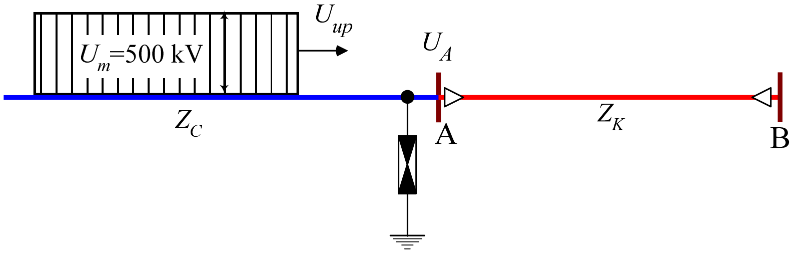
Задача 4.4♦. Пренапонски бран, со правоаголно чело и константен грб (зачеље), со амплитуда U_m = 500 kV, патува по 110 kV надземен вод со импеданција Z_C = 400 Ω, и наидува во точката А на кабелски вод со импеданција Z_K = 50 Ω, долг l_K = 1,5 km, отворен на својот крај (слика 1). На местото на премин од надземниот на кабелскиот вод, во точката А, е поставен одводник на пренапони од типот VOP 105, 10 kA. Да се пресмета:

а) дали одводникот ќе реагира во првиот момент на упадот ако е познат неговиот напон на реагирање U_{reag} = 342 kV;

б) после колку време ќе се почувствува дејството на рефлектираниот бран кошто се одбил од отворениот крај на кабелскиот вод ако е позната брзината на простирање на брановите по кабелот v_K=150 m/μs. Колкава е неговата амплитуда;

в) колкав ќе биде напонот во точката А во тој момент. Дали е тој доволно висок за да предизвика реагирање на одводникот;

д) кога ќе дојде до реагирање на одводникот. Колкав ќе биде напонот U_A веднаш по неговото реагирање. Одводникот да се моделира како и во претходната задача со линеарна V-A карактеристика $U_{od} = E_d + R_d \cdot i_{od} \equiv 182{,}3+12{,}74 \cdot i_{od}$; ($U_A = U_{od}$).



Слика 1. Приказ на системот во кој упаѓа пренапонскиот бран

■ ■ ■

Задача 4.5♣. Пренапонски бран, со правоаголно чело и експоненцијално опаѓачки грб (зачеље), според сликата 1 (U_m = 500 kV; T_Z=72 μs), патува по 110 kV надземен вод со импеданција Z_C = 400 Ω, и наидува во точката A на кабелски вод со импеданција Z_K = 50 Ω, долг l_K=1,5 km, отворен на својот крај (слика 2). На местото на премин од надземниот на кабелскиот вод, во точката A, е поставен одводник на пренапони од типот VOP 105, 10 kA. Со помош на програмата BP да се пресмета:

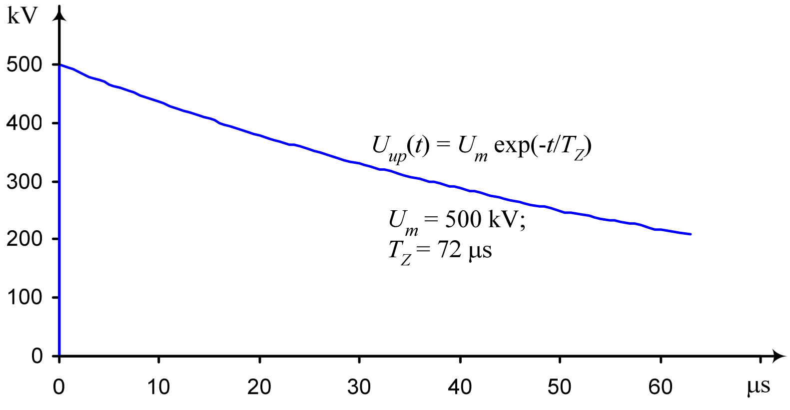
а) дали одводникот ќе реагира во првиот момент на време кога ќе упадне пренапонскиот бран во точката A. Неговиот напон на реагирање изнесува U_{reag} = 342 kV;

б) после колку време ќе се почувствува дејството на рефлектираниот бран кошто се одбил од отворениот крај на кабелскиот вод ако е позната брзината на простирање на брановите по кабелот v_K=150 m/μs. Колкава е неговата амплитуда;

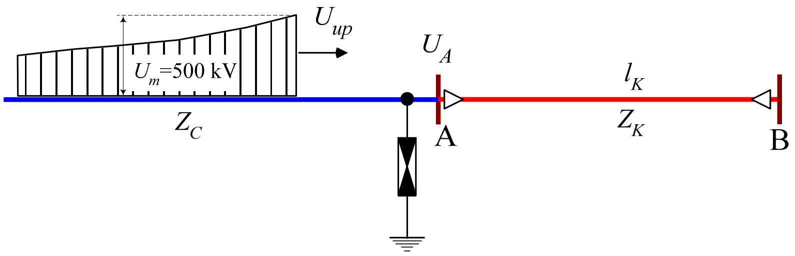
в) колкава е моментната вредност на упадниот бран во тој момент;

г) колкав ќе биде напонот во точката A во тој момент. Дали е тој доволно висок за да предизвика реагирање на одводникот;

д) доколку дојде до реагирање на одводникот на пренапони колкав ќе биде напонот U_A веднаш по неговото реагирање. Одводникот да се моделира со својата вистинска волт–амперна карактеристика.

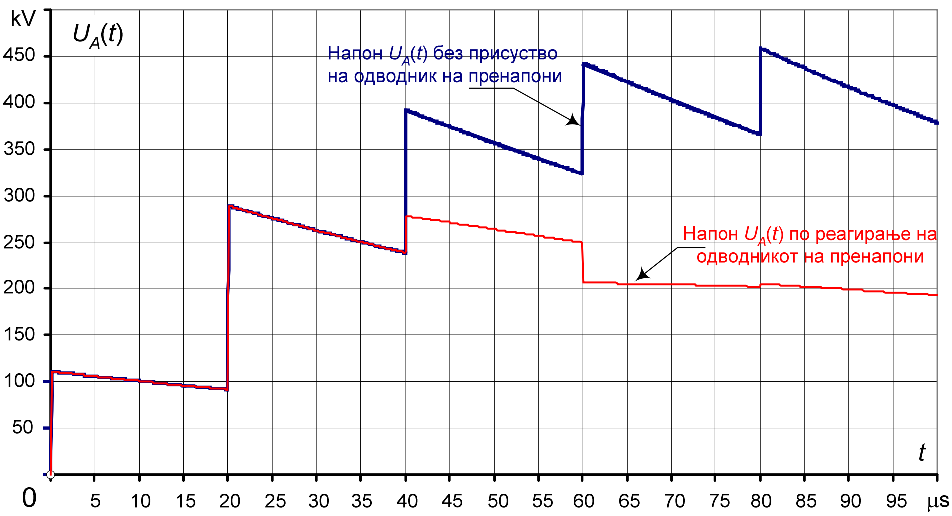


Слика 1. Облик на упадниот пренапонски бран



Слика 2. Облик на упадниот пренапонски бран

Р е ш е н и е:



Слика 3. Облик на напонот во точката А со и без одводник

На сликата 3 се прикажани облиците на напонот U_A на почетокот од кабелот за следните два случаја: 1) кога во точката А не постои одводник (дебело извлечена линија) и 2) кога постои одводник кој реагирал кога напонот А ја надминал вредноста на неговиот напон на реагирање (тенка црвена линија). Решението што се прикажува е добиено со помош на програмата ВР. Од него се заклучува следното.

а) Одводникот не реагирал веднаш по упадот на бранот во точката А, во моментот t_0 = 0, бидејќи почетната вредност на напонот изнесува U_A = 111.1 kV. Одводникот не реагирал ни во моментот t_1 = 20 μs, кога се почуствувало во точката А дејството на бранот што се рефлектирал од крајот на кабелот. Тој реагирал многу подоцна.

б) Одводникот реагирал после t_2 = 40 μs сметано од моментот кога челото на бранот ја достигнало точката А, а тоа е моментот дури после 2 рефлексии на упадниот бран од крајот на кабелот. Напонот U_A што би се постигнал на почетокот на кабелот кога не би постоел одводник на пренапони во тој момент би изнесувал U_A = 392.2 kV.

в) Моментната вредност на директниот упаден бран во точката А во моментот t_2 = 40 μs изнесува:

$$U_{up}(t_0) = U_m \cdot \exp(-t_2/T_Z) = 500 \cdot \exp(-40/72) = 287 \text{ kV}.$$

Во исто време вредноста на напонот на рефлектираниот бран којшто се движи во инверзна насока од В кон А изнесува U_{od} = 105.3 kV така што вкупниот напон во точката А би изнесувал U_A = 392.2 kV.

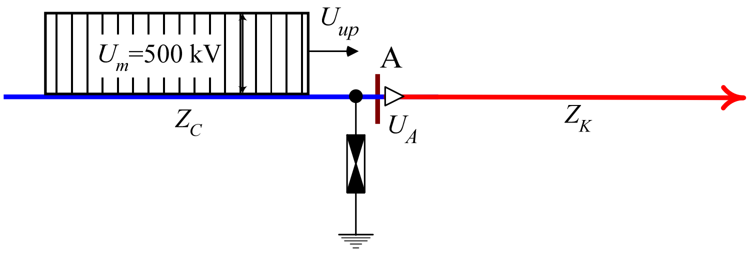
г) Амплитудата на напонот U_A непосредно пред реагирањето на одводникот, кога тој не би постоел, би изнесувала U_A = 380 kV.

д) Вредноста на напонот на одводникот непосредно по неговото реагирање изнесува U_A = U_{od} = 278 kV.

■ ■ ■

Задача 4.6*. Пренапонски бран, со правоаголно чело, бесконечно траење и амплитуда U_m = 500 kV, патува по 110 kV надземен вод со импеданција Z_C=400 Ω, наидува на долг кабелски вод со импеданција Z_K = 50 Ω. Кабелот се штити со одводник на пренапони, поставен непосредно на неговите приклучоци. Карактеристичната импеданција на водот по којшто наидува упадниот бран изнесува Z_C = 400 Ω. Одводникот на пренапони којшто реагира веднаш во истиот момент кога пренапонскиот бран стигнува до него може, во прва апроксимација, да се моделира со напречно (паралелно) поставен отпорник чија што вредност изнесува R_{od} = 40 Ω и таа е константна за цело време на преодниот процес. Да се пресмета колкава е амплитудата на пренапонот што се простира по кабелот.

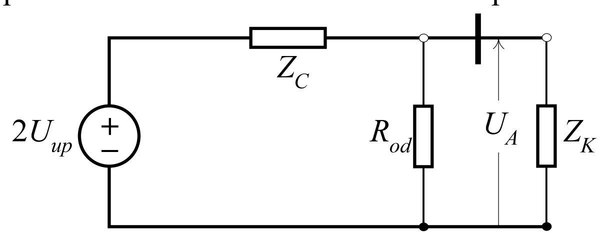
Да се пресмета максималната вредност напонот на собирниците U_s, т.е. на пренапонот на енергетскиот трансформатор $U_{T.\max}$.



Слика 1. Упад на пренапонски бран на долг кабелски вод

Р е ш е н и е:

Во овој случај Петерсеновото коло ќе го има обликот прикажан на следната слика.



Слика 2. Тевененово еквивалентно коло

Ако со Z_{ekv} ја означиме еквивалентната импеданција на кабелот и одводникот, ќе добиеме:

$$Z_{ekv} = Z_K \parallel R_{od} = \frac{Z_K \cdot R_{od}}{Z_K + R_{od}} = \frac{50 \cdot 40}{50+40} = 22,222\ \Omega\,.$$

Во тој случај за напонот во точката А ќе добиеме:

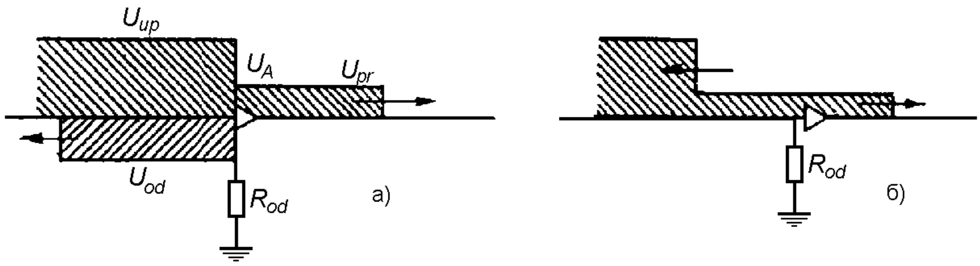
$$U_A = \alpha \cdot U_{up} = \frac{2Z_{ekv}}{Z_{ekv}+Z_C} \cdot U_{up} = 0,105263 \cdot 500 = 52,6\ \text{kV}$$

Значи, благодарејќи на одводникот на пренапони напонскиот бран којшто продолжува да се простира по кабелот ќе биде многу помал отколку во случајот кога одводик во точката А не би постоел.

Да ја пресметаме компонентата U_{od} на одбиениот бран од точката А:

$$U_{od} = U_A - U_{up} = 52,6 - 500 = -447,4 \text{ kV}$$

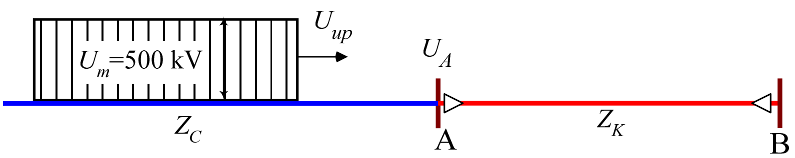
На сликата 3а се прикажани изгледот и големината на сите три компоненти од брановите: упадниот бран U_{up}, одбиениот бран U_{od} и прекршениот бран $U_{pr} = U_A$ во еден определен момент на време. На сликата 3б, пак, е прикажана просторната распределба на напонот по должината на водот и кабелот. Од сликата 3б се гледа какво е заштитното дејство на одводникот на пренапони не само за напонот по должината на кабелот туку и за напонот долж упадниот вод пред самиот одводник.



Слика 3. Напонски бранови и просторна распределба на напонот

■ ■ ■

Задача 4.7. Претходниот Задача да се реши за случајот кога кабелскиот вод има ограничена должина l_K = 300 m; $\tau_K = l_K/v_K$ = 2 μs (сл. 1). Колкава е стационарната вредност на напонот U_A а колкава на напонот U_B после доволен број рефлексии на брановите од краевите на кабелот. Задачата да се реши за случајот кога не постои одводник на пренапони во точката А.



Слика 1. Упад на пренапонски бран по кабелски вод

Решение:

Во овој случај, поради ограничената должина на кабелот, ќе дојде до појава на повеќекратна рефлексија на брановите.

Веднаш по упадот на пренапонскиот бран на кабелот напонот во точката А ќе добие вредност:

$$U_A = U_{pr} = \alpha_{1A} \cdot U_{up} = \frac{2Z_K}{Z_K + Z_C} \cdot U_{up} = 0,182 \cdot 500 = 90,9 \text{ kV}$$

Првиот рефлектиран бран од точката В ќе пристигне во точката А после време 2τ = 4 μs. Амплитудата на тој бран ќе биде:

$$\alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B} = 0,182 \cdot 500 \cdot 1 = 90,9 \text{ kV}.$$

Дел од овој бран ($(\alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B}) \cdot \beta_{2A} = 74,4\,\text{kV}$) ќе се одбие назад кон точката B а дел ќе се прекрши ($(\alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B}) \cdot \alpha_{2A} = 165,3\ \text{kV}$) и ќе продолжи да се простира по надземниот вод, во инверзна насока.

Вкупниот напон во точката A во тој момент ќе скокне на збирот од прекршениот бран $U_{pr} = \alpha_{1A} \cdot U_{up}$ што доаѓа од лево и прекршениот бран $(\alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B}) \cdot \alpha_{2A}$ што доаѓа од десно, т.е.

$$U_A = \alpha_{1A}.U_{up} + \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B} \cdot \alpha_{2A} = \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot (1 + \alpha_{2A} \cdot \beta_{2B}) = 256,2\ \text{kV}\,.$$

После време 4τ во точката A ќе пристигне нов бран од десно. Тоа е бранот којшто во $t = 2\tau$ се одбил од точката A и се упатил кон точката B и од неа се одбил и се упатил кон точката A. Неговата амплитуда ќе биде [$(\alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B}) \cdot \beta_{2A} \cdot \beta_{2B} = 74,4\ \text{kV}$]. Сега напонот во точката A повторно ќе порасне и ќе добие вредност:

$$U_A = \alpha_{1A}.U_{up} + \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B} \cdot \alpha_{2A} + \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} \cdot \alpha_{2A} =$$
$$= 90.1 + 165.3 + 135.24 = 256.2\ \text{kV}.$$

Размислувајќи на сличен начин произлегува дека после поголем број вакви рефлексии напонот U_A ќе се менува (расте) по следниот закон:

$$U_A(\infty) = \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot (1 + \alpha_{2A} \cdot \beta_{2B} + \alpha_{2A} \cdot \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A} + \alpha_{2A} \cdot \beta_{2B}^3 \cdot \beta_{2A}^2 + \cdots)\ .$$

Врз основа на последниот израз можеме да пишуваме:

$$U_A(\infty) = \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot [1 + \alpha_{2A} \cdot \beta_{2B} \cdot (1 + \beta_{2B} \cdot \beta_{2A} + \beta_{2B}^2 \cdot \beta_{2A}^2 + \cdots)]$$

Бидејќи изразот во малата заграда преставува сума на членовите од една геометриска прогресија, произлегува дека после бесконечен број такви рефлексии на брановите ќе се добие следната стационарна вреденост за напонот U_A:

$$U_A(\infty) = \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_{2A} \cdot \beta_{2B}}{1 - \beta_{2B} \cdot \beta_{2A}}\right]$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

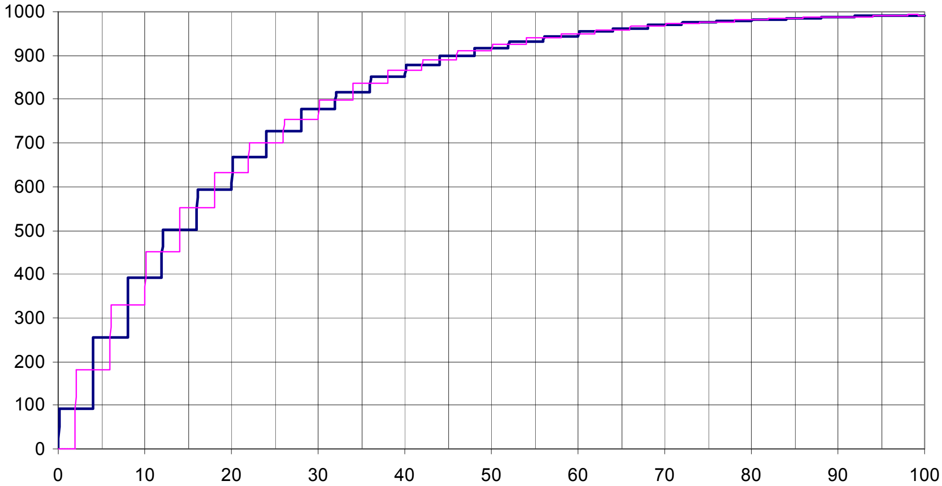
$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_K}{Z_C + Z_K} = 0,182;\ \alpha_{2B} = 2;\ \alpha_{2A} = \frac{2Z_C}{Z_C + Z_K} = 1,818;\ \beta_{2B} = 1\,;$$

$$U_A(\infty) = \alpha_{1A} \cdot U_{up} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_{2A} \cdot \beta_{2B}}{1 - \beta_{2B} \cdot \beta_{2A}}\right] = 90,9 \cdot \left[1 + \frac{1,818}{1 - 0,82}\right] = 1000\ \text{kV}.$$

На сличен начин може да се покаже дека напонот во точката B ќе расте со скокови во дискретните моменти на време $t = \tau;\ 3\tau;\ 5\tau\ldots$ итн.

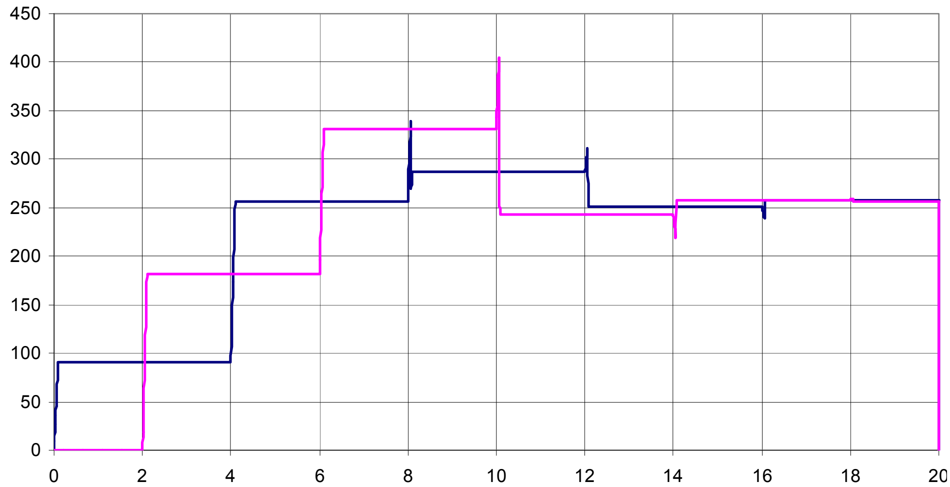
Неговата стационарна вредност, после бесконечен број такви повеќекратни рефлексии ќе изнесува, исто така $U_B(\infty) = 1000\ \text{kV}$.

На сликата 2 се прикажани облиците на напоните $U_A(t)$ (со дебела линија и темно сина боја) и $U_B(t)$ (со лилјакова боја).



Слика 2. Облик на напоните $U_A(t)$ и $U_B(t)$

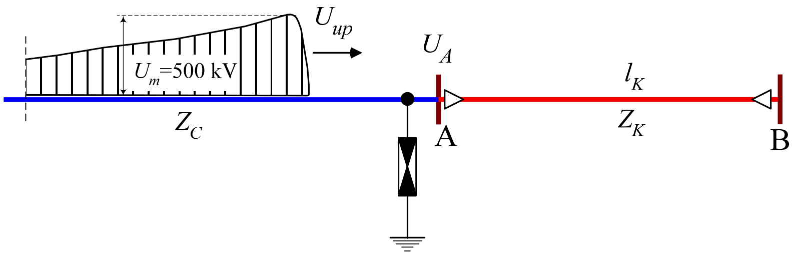
Доколку во точката A имаше поставено одводник на пренапони, тогаш во моментот t = 8 μs, кога ќе стигнеше вториот одбиен бран од крајот на кабелот со што напонот во точката A би "скокнал" на вредноста 391,4 kV, одводникот би се активирал и веднаш би ја смалил вредноста на напонот U_A на 256,2 kV и не би дозволил да ја надмине вредноста од 286,6 kV. Целиот преоден процес би се "смирил" под дејство на одводникот и тој практично би се завршил во наредните десетина микросекунди. Обликот на кривите $U_A(t)$ и $U_B(t)$ за првите 20 μs од овој случај е даден на сликата 3.



Слика 3. Облик на напоните $U_A(t)$ и $U_B(t)$ кога постои одводник

■ ■ ■

Задача 4.8. Со помош на програмата BP задачата од Задачата 4.7 да се реши за случајот кога упадниот бран има двојно-експоненцијален облик од типот 1,2/50 μs (слика 1). Колкава е максималната вредност на напонот U_A а колкава на напонот U_B после доволен број рефлексии на брановите од краевите на кабелот. Задачата да се реши за случајот кога постои и кога не постои одводник на пренапони во точката A.

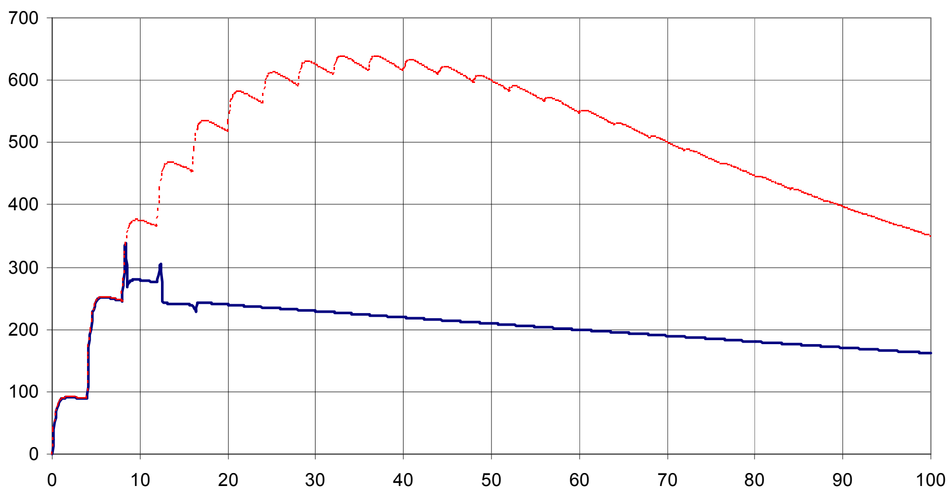


Слика 1. Упад на косоаглолен пренапонски бран по кабелски вод

Решение:

Облиците на напонот U_A во точката А за случаите без одводник (тенка црвена линија) и со одводник на пренапони (дебела сина линија) се прикажани на сликата 2. Од табелите, добиени со помош на програмата ВР се отчитува дека максималните вредности на напоните U_A и U_B изнесуваат:

- $U_{A.\max} = 638$ kV; $U_{B.\max} = 640$ kV за случајот без одводник на пренапон и
- $U_{A.\max} = 342$ kV; $U_{B.\max} = 394$ kV за случајот со одводник на пренапон.

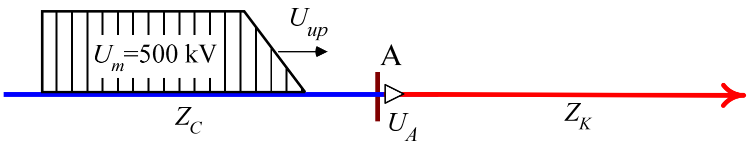


Слика 1. Облик на напонот $U_A(t)$ кога упадниот бран има двојно-експ. облик со параметри 1,2/50 μs за случаите со и без одводник

Од анализираниот Задача станува очигледно дека апроксимацијата на упадниот пренапонски бран со правоаголен импулс со бесконечно траење е нереална и дава премногу високи вредности на пренапоните бидејќи таквиот бран содржи бесконечна енергија што ја "внесува" во системот. Затоа ваквите анализи треба да се вршат со "реални" облици на упадниот бран при што се смета дека најблиску до вистинските облици на упадните барнови е двојно-експоненцијалниот облик, како во оваа задача.

■ ■ ■

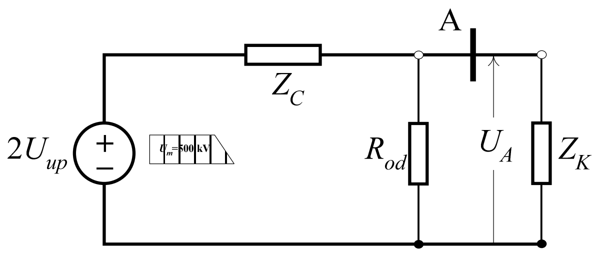
Задача 4.9*. Задачата од примерот 4.6. да се реши за случајот кога упадниот пренапонски бран со амплитуда $U_m = 500$ kV има косо чело со време на челото $T_c = 1$ μs и бесконечно траење. Да се претпостави дека не постои одводник на пренапони.



Слика 1. Упад на косоаголен бран на долг кабелски вод

Р е ш е н и е:

И во овој случај, како и во задачата 4.6, Петерсеновото коло ќе го има обликот прикажан на сликата 2. Единствена разлика е во обликот на кривата $U_{up}(t)$, која сега ќе гласи:



Слика 2. Тевененово еквивалентно коло

$$U_{up}(t) = \frac{U_m}{T_c} \cdot t \cdot h(t) - \frac{U_m}{T_c} \cdot (t - T_c) \cdot h(t - T_c)\,.$$

Ако се заменат бројните врдности се добива:

$$U_{up}(t) = 500 \cdot t \cdot h(t) - 500 \cdot (t-1) \cdot h(t-1); \quad U\,(\mathrm{kV}),\ t(\mu\mathrm{s})$$

Коефициентот на прекршување $\alpha_{1\mathrm{A}}$ за упадниот бран во точката А ќе биде:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_K}{Z_K + Z_C} = \frac{2 \cdot 40}{440} = 0{,}222 \text{ и}$$

$$U_{pr.m} = \alpha_{1A} \cdot U_{up.m} = 0{,}222 \cdot 500 = 111 \text{ kV}\,.$$

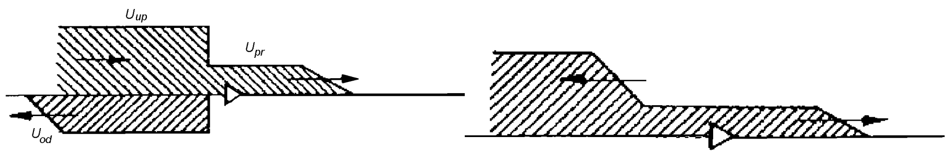
Бидејќи во точката на прекршување А не доаѓа до промена на обликот на бранот туку се менува само неговата амплитуда, за прекршениот бран, кој е наедно и напон во точката А, се добива:

$$U_{pr}(t) = U_A(t) = 111 \cdot t \cdot h(t) - 111 \cdot (t-1) \cdot h(t-1); \quad U\,(\mathrm{kV}),\ t(\mu\mathrm{s})$$

Одбиениот бран U_{od} од точката А во овој случај ќе биде:

$$U_{od}(t) = U_A(t) - U_{up}(t) = 389 \cdot t \cdot h(t) - 389 \cdot (t-1) \cdot h(t-1); \quad U\,(\mathrm{kV}),\ t(\mu\mathrm{s})$$

На сликите 3а се прикажани упадната, прекршената и одбиената компонента на напонските бранови, додека на сликата 3б е прикажана просторната распределба на напонот долж водовите.



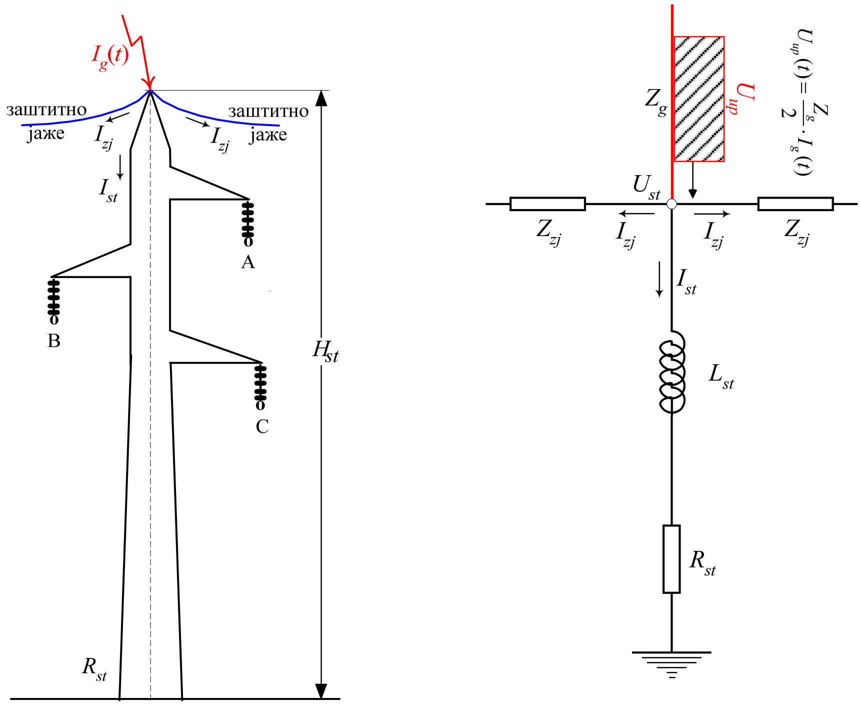
Слика 3. Напонски бранови и просторна распределба на напонот

■ ■ ■

Задача 4.10. Да се изврши пресметка на преодниот процес што настанува при удар на гром во метален заземјен столб. На столбот е изведено заштитно јаже чија што бранова импеданција изнесува $Z_z = 400\ \Omega$. Отпорноста на распростирање на заземјувачот на столбот изнесува $R_{st} = 10\ \Omega$. Столбот има височина $H_{st} = 20$ m и може да се претстави како вод со бранова импеданција $Z_{st} = 200\ \Omega$. Тој во пресметките може да се моделира и упростено, со својот индуктивитет $L_{st} = l_{st} \cdot H_{st} = 0{,}67 \cdot 20 = 13{,}4\ \mu$H, каде што $l_{st} = Z_{st} \cdot v_{st}$ е подолжната индуктивност на столбот. Атмосферското празнење во столбот се моделира со струјна инјекција на местото на ударот. Струјата на струјниот генератор на громот претставува правоаголен импулс со следниот облик:

$$I_g(t) = I_m \cdot h(t) = 30 \cdot h(t)\ \text{kA}.$$

Каналот на громот по кој што се движи струјниот импулс се моделира со вод со карактеристична импеданција $Z_g = 300\ \Omega$.



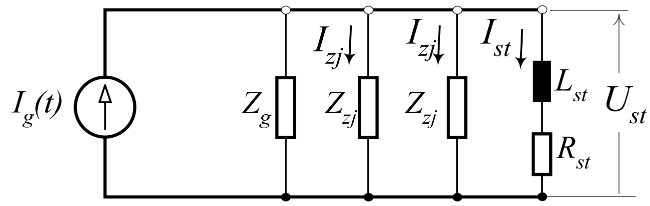
Слика 1. Удар на гром во врвот од челично-решеткаст столб

Решение:

Ударот на громот кај ваквите анализи се моделира со струен генератор со струја $I_g(t)$, приклучен помеѓу земјата и местото на ударот. Паралелно на струјниот генератор се поставува активен отпор чија што отпорност е еднаква на импеданцијата на каналот на громот. Ударот на громот може да се моделира и како упаден пренапонски бран, приклучен на местото на ударот, кој што се движи по каналот на громот Z_g. Вредноста на напонот на упадниот бран во тој случај ќе биде:

$$U_{up}(t) = \frac{Z_g}{2} \cdot I_g(t) \tag{1}$$

Во конкретниот случај ударот на громот ќе го моделираме со струен генератор, како што е тоа прикажано на сликата 2.



Слика 2. Еквивалента заменска шема за анализа

На сликата 2 е прикажано еквивалентото коло со помош на кое ќе ја вршиме анализата на преодниот процес што настанува при удар на громот во столбот. Заштитното јаже во тоа коло се претставува со два отпорника со отпорност еднаква на карактеристичната импеданција на јажето Z_{zj}. Присуството на соседните столбови со нивните заземјувачи, во случајов, не се зема предвид што, како што ќе видиме, е коректно само за првите неколку микросекунди од процесот. Но анализите покажуваат дека таа апроксимација е сосема малку влијателна врз временскиот тек на напонот на столбот $U_{st}(t)$ и како таква е прифатлива. Столбот, кој по својата природа претставува вод по којшто се простираат брановите, исто како и по заштитното јаже, како прва апроксимација можеме да го моделираме само со неговиот индуктивитет за да можеме да изведеме аналитички израз за временскиот тек $U_{st}(t)$. Поправилно би било и столбот да го претставиме со неговата бранова импеданција Z_{st}, која во случајов изнесува $Z_{st} = 200\ \Omega$, но подоцна ќе видиме дека и таа апроксимација е, повторно, сосема прифатлива.

Ако со Z_0 ја означиме паралелната комбинација од отпорниците Z_{zj}, Z_{zj} и Z_g, т.е.

$$Z_0 = Z_{zj} \parallel Z_{zj} \parallel Z_g = \frac{Z_g \cdot (Z_{zj}/2)}{Z_g + (Z_{zj}/2)} \tag{2}$$

тогаш за врската помеѓу одделните електрични величини во лапласов домен, врз основа на колото од сликата 2, можеме да пишуваме:

$$Z_{st}(p) = R_{st} + p \cdot L_{st}; \quad Z_{ek}(p) = Z_0 \parallel Z_{st}(p) = \frac{Z_0 \cdot Z_{st}(p)}{Z_0 + Z_{st}(p)}$$

$$I_{st}(p) = I_g(p) \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + Z_{st}(p)} = \frac{I_m}{p} \cdot \frac{Z_0}{(Z_0 + R_{st}) + p \cdot L_{st}}. \tag{3}$$

$$U_{st}(p) = Z_{st}(p) \cdot I_{st}(p) = \frac{I_m}{p} \cdot \frac{Z_0 \cdot (R_{st} + p \cdot L_{st})}{(Z_0 + R_{st}) + p \cdot L_{st}} \tag{4}$$

Со инверзна лапласова трансформација на изразот (4) се добива временскиот тек на напонот на врвот од столбот $U_{st}(t)$:

$$U_{st}(t) = Z_0 \cdot I_m \cdot e^{-t/T} + \frac{I_m \cdot R_{st}}{1 + R_{st}/Z_g + 2R_{st}/Z_{zj}} \cdot \left(1 - e^{-t/T}\right), \tag{5}$$

каде што временската константа на колото T изнесува:

$$T = \frac{L_{st} \cdot (R_{st} + Z_{zj}/2)}{Z_g \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_g}. \tag{6}$$

Од изразот (5) гледаме дека во првиот момент на ударот ($t = 0$) напонот на врвот од столбот добива вредност:

$$U_{st}(0) = Z_0 \cdot I_m = \frac{Z_g \cdot Z_{zj}/2}{Z_g + Z_{zj}/2} \cdot I_m \tag{7}$$

која што е наедно и најголемата негова вредност бидејќи потоа тоа тој започнува да опаѓа, така што после бесконечно долго време, или практично после 3 до 4 временски константи T, тој ја добива својата стационарна вредност $U_{st}(\infty)$:

$$U_{st}(\infty) = \frac{I_m \cdot R_{st}}{1 + R_{st}/Z_g + 2R_{st}/Z_{zj}} = I_m \cdot \frac{Z_g \cdot R_{st} \cdot Z_{zj}/2}{Z_g \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_g} \tag{4.10.8}$$

Лесно може да се покаже дека изразот (4.10.5) може да се напише и на следниот начин:

$$U_{st}(t) = Z_0 \cdot I_m \cdot e^{-t/T} + Z_\infty \cdot I_m \cdot \left(1 - e^{-t/T}\right); \quad Z_\infty = \frac{Z_0 \cdot R_{st}}{Z_0 + R_{st}}, \tag{9}$$

од каде што произлегува дека е:

$$U_{st}(\infty) = \frac{R_{st} \cdot Z_0}{Z_0 + R_{st}} \cdot I_m = \left[R_{st} \parallel Z_g \parallel \frac{Z_{zj}}{2} \right] \cdot I_m . \tag{10}$$

Во конкретниов случај ќе имаме:

$$Z_0 = Z_g \parallel Z_{zj} \parallel Z_{zj} = 300 \parallel 400 \parallel 400 = 120\ \Omega ;$$

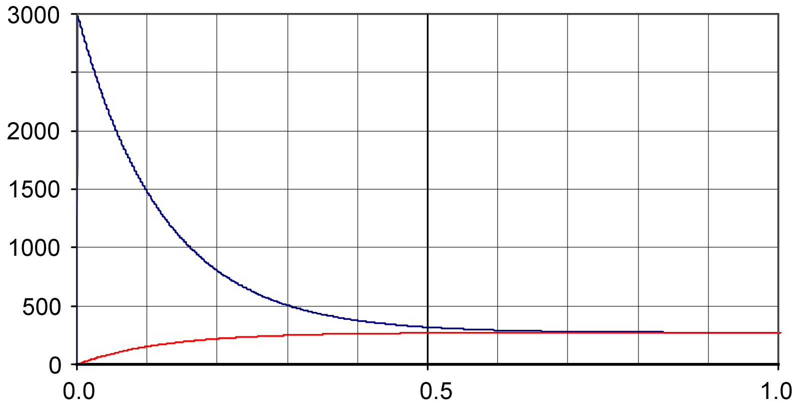
$$Z_\infty = Z_0 \parallel R_{st} = \frac{Z_0 \cdot R_{st}}{Z_0 + R_{st}} = 9{,}23077\ \Omega;$$

$$T = \frac{L_{st} \cdot (Z_g + Z_{zj}/2)}{Z_g \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_{zj}/2 + R_{st} \cdot Z_g} = 0{,}103\ \mu\text{s} ;$$

$$U_m(0) = Z_0 \cdot I_m = 120 \cdot 30 = 3600\ \text{kV}$$

$$U_m(\infty) = Z_\infty \cdot I_m = 9{,}231 \cdot 30 = 276{,}9\ \text{kV} ;\ U_m(t > 3T) \approx U_m(\infty) .$$

На сликата 3 е прикажан обликот на напонот $U_{st}(t)$ (темно сина дебела линија) како и напонот на отпорноста R_{st} (тенка црвена линија). Се забележува дека целиот преоден процес е практично завршен после $t = 4T \approx 0{,}41\ \mu$s.



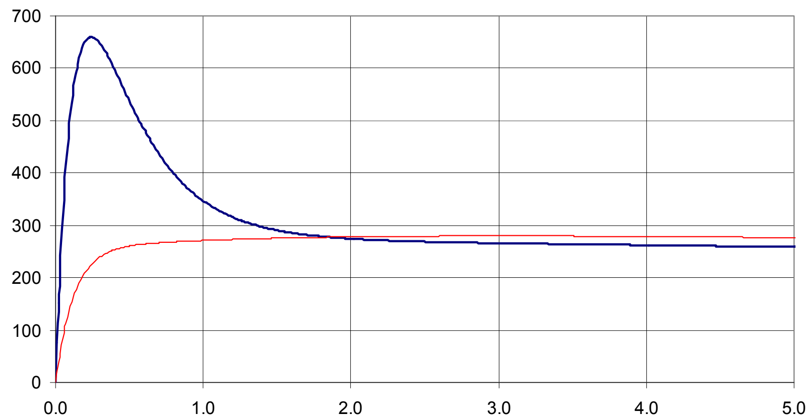
Слика 3. Облик на напонот на врвот од столбот $U_{st}(t)$

Врз основа на релациите (9) и дијаграмот од сликата 3 може да се извлечат следните заклучоци.

Во случајот кога струјниот бран има рамно чело со бесконечна стрмнина во првиот момент на време при упад на струјниот бран во системот, напонот на столбот $U_{st}(0)$ ќе биде дефиниран само од еквивалентната импеданција Z_0 во која учествува заштитното јаже и каналот на громот додека во неа не учествува отпорноста на распростирање на заземјувачот

R_{st}, како врвот од столбот да е изолиран од земјата. Тоа е така затоа што индуктивност на столбот, т.е. "врската" на столбот со земјата, на самиот почеток не допушта течење на струјата низ столбот во земјата туку целата струја на громот мора да се инјектира во заштитното јаже и назад по каналот на громот, а тоа е многу неповолно бидејќи вотој случај, како што се гледа од примерот, напонот на врвот од столбот добива вредност којашто е за околу 13 пати поголема од нејзината стационарна вредност.

Но тоа практично трае помалку од 1 μs. Постепено, со текот на времето, струјата почнува да продира во индуктивитетот L_{st} и патот на струјата на громот кон земјата се отвора. Кога процесот ќе се стационира ќе нема промени (di/dt = 0) и ќе биде како индуктивитетот воопшто да го нема. Тогаш практично целата струја на громот ќе оди во земјата, а напонот на врвот од столбот ќе биде приближно $U_s \approx R_{st} \cdot I_m$.



Слика 4. Облик $U_{st}(t)$ за случај на двојно-експ. бран 1,2/50 и 5/50 μs

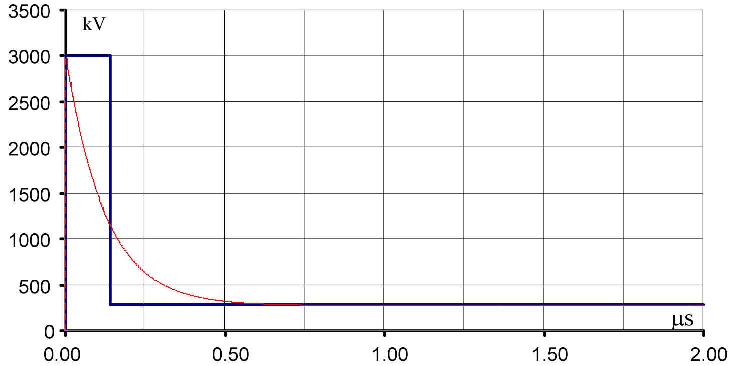
Се разбира дека ова преставува само теориско разгледување бидејќи случај на струен импулс на громот со рамно чело и бесконечно траење во природата не постои. Реалните опасности во стварноста се многу помали, а како илустрација на тоа ни послужат кривите прикажани на сликата 4 на кои е прикажан обликот $U_{st}(t)$ за случаите кога струјата на громот има двојно-експоненцијален облик со параметри 1,2/50 μs (темно сина боја) и 5/50 μs (испрекината црвена линија).

Резултатите од анализата на последниов случај (сл. 4) се добиени со помош на програмата BP.

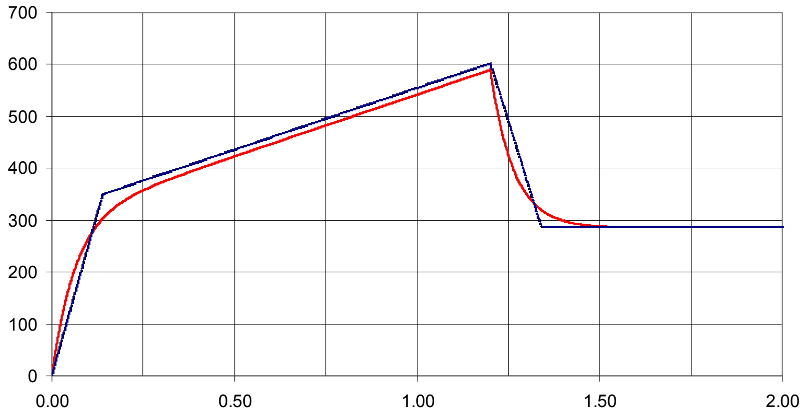
■ ■ ■

Задача 4.11. Задачата од примерот 4.10 да се реши со помош на програмата BP "егзактно", кога столбот се третира како вод, т.е. елемент со распределени параметри. Добиените резултати да се споредат со претходите "приближни" резултати каде што водот е прикажан само со својот индуктивитет. Анализите да се направат за следните два случаја: а) струјниот импулс е со правоаголен облик $I_g(t) = I_m \cdot h(t)$, како во примерот 4.10 и б) струјниот импулс има косоаголно чело и рамен грб, $I_g(t) = I_m \cdot t \cdot h(t) - I_m \cdot (t - T_c) \cdot h(t - T_c)$; T_c = 1,2 μs; I_m = 30 kA.

Решение:



Слика 1. Облик $U_{st}(t)$ за правоаголен бран I_m = 30 kA



Слика 2. Облик $U_{st}(t)$ за случај на косоаголен бран T_c=1,2 μs

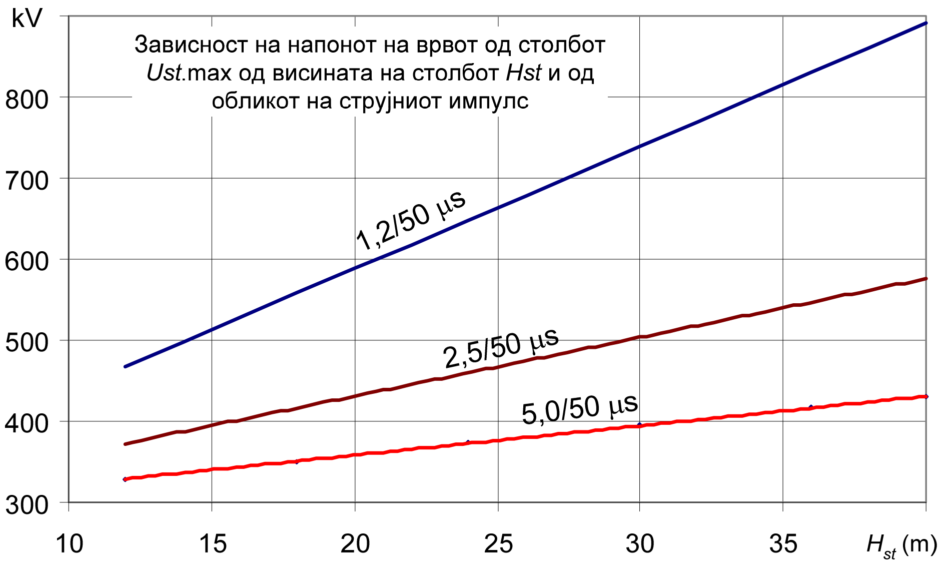
Очигледно е дека моделирањето на столбот само со својот индуктивитет е прифатливо бидејќи грешката што се прави е занемарлива.

■ ■ ■

Задача 4.12. Со помош на програмата BP да се определи зависноста на максималната вредност на напонот на врвот од столбот $U_{st.\max}$ од височината на столбот H_{st} и од времето на челото T_c т.е. обликот на струјниот импулс за случајот разгледуван во задачата 4.10 (I_m = 30 kA; R_{st} = 10 Ω; Z_g = 300 Ω; Z_{zj} = 400 Ω; $Z_0 = Z_g || Z_{zj}/2$ = 120 Ω).

Р е ш е н и е:

Со повеќекратна примена на програмата BP се добива бараната зависност. Пресметките се правени за случај на косоаголен бран со разни времиња на челото T_c и за разни височини на столбот. Обликот на напонот на врвот од столбот што притоа се добива има има изглед како на сликата 4.11.3, т.е. максимумот $U_{st.\max}$ се постига на крајот на периодот на челото, така што обликот на струјниот импулс во периодот на грбот не е воопшто влијателен врз вредноста на $U_{st.\max}$.



Слика 4.12.1. Зависност $U_{st.\max}$ (H_{st}) за случај на косоаголен бран со разни времиња на челото T_c=1,2; 2.5 и 5.0 μs

Од резултатите може да се извлече заклучокот дека максималниот напон на столбот $U_{st.\max}$ се состои од две компоненти, една која што се должи на падот на напон на еквивалентниот омски отпор на столбот $R_{st} \cdot I_{st.\max}$ и друга која што се должи на индуктивниот пад на напон $L_{st} \cdot dI_{st.\max}/dt$, т.е.:

$$U_{st.\max} = R_{st} \cdot I_{st.\max} + L_{st} \cdot dI_{st.\max}/dt \approx \left[R_{st} \cdot I_m + L_{st} \cdot \frac{I_m}{T_C} \right] \cdot \frac{Z_\infty}{R_{st}}. \qquad (4.12.1)$$

Во последната релација со $I_{st.\max}$ е означена максималната струја во столбот која што се постига во $t = T_c$, со I_m е означена темената вредност на струјниот импулс додека со Z_∞ е означена еквивалентната (влезна) импеданција на столбот во стационарен режим кога неговиот индуктивитет не се противи на течењето на струјата I_{st}.

За илустрација ќе го земеме случајот со T_c = 1.2 μs и H_{st} = 20 m. За овој случај од дијаграмите на сл 4.12.1 може да се отчита дека максималниот напон на врвот на столбот изнесува $U_{st.\max}$ = 588,2 kV. Понатаму имаме:

$$Z_\infty = Z_0 \parallel R_{st} = \frac{Z_0 \cdot R_{st}}{Z_0 + R_{st}} = \frac{120 \cdot 10}{120 + 10} = 9,231\ \Omega;$$

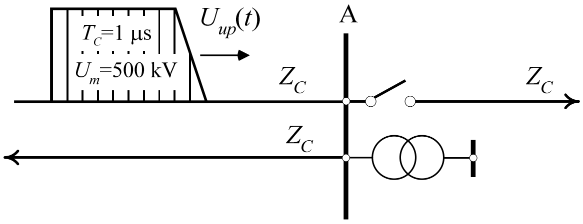
$$L_{st} = l_{st} \cdot H_{st} = 0,667 \cdot 20 = 13,34\ \mu\text{H}; \quad Z_\infty / R_{st} = 0,9231$$

$$U_{st.\max} \approx \frac{Z_\infty}{R_{st}} \cdot \left[R_{st} I_m + L_{st} \frac{I_m}{T_C} \right] = 0,9231 \cdot \left[10 \cdot 30 + 13,34 \cdot \frac{30}{1,2} \right] = 584,8\ \text{kV}.$$

Очигледно е дека апроксимативната формула (4.12.1) е сосема прифатлива.

■ ■ ■

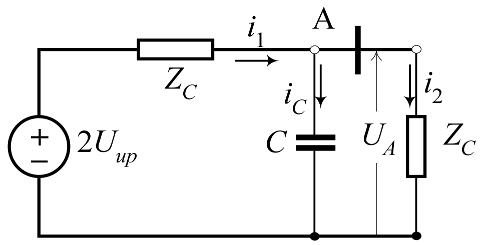
Задача 4.13. Косоаголен напонски бран со рамен грб со параметри U_m = 500 kV, T_c = 1 μs) се движи по вод со карактеристична импеданција Z_c = 400 Ω и упаѓа во трансформаторска станица, како на сликата 1. Сите апарати во трафостаницата можат да се еквивалентираат со еден единствен сумарен влезен капацитет којшто изнесува C = 5000 pF. Да се определи обликот на напонот $U_A(t)$ на собирниците A и неговото еквивалентно време на чело $T_{c.ekv}$ што тој ќе го добие по деформацијата предизвикана од присуството на кондензаторот C. Доколку на собирниците А е приклучен одводник на пренапони чиј напон на реагирање изнесува U_{reag} = 342 kV, да се утврди дали и кога тој ќе реагира.



Слика 1.

Р е ш е н и е:

Врз основа на шемата од слика 1 во согласност со Петерсеновото правило може да се формира следното еквиваленто коло, прикажано на сликата 2. Притоа важи: $Z_1 = Z_2 = Z_C$, но заради општост на постапката, во задачата се работи со различни вредности на карактеристичните импеданции Z_1 и Z_2.



Слика 2. Петерсеново еквивалентно коло за системот од сл. 1

За Петерсеновото коло од сликата 2 може да се пишува:

$$2 \cdot U_{up} = Z_1 \cdot i_1 + Z_2 \cdot i_2 = Z_1 \cdot (i_C + i_2) + Z_2 \cdot i_2 ,$$

$$\frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_C \cdot dt = U_C = Z_2 \cdot i_2 \Rightarrow \; i_C = Z_2 \cdot C \cdot \frac{di_2}{dt} .$$

Ако i_C од последната равенка се изрази преку i_2 во претходната, ќе се добие:

$$2U_{up} = (Z_1 + Z_2) \cdot i_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot C \cdot \frac{di_2}{dt} .$$

или земајќи предвид дека важи $U_2 = U_C = Z_2 \cdot i_2$,

$$2U_{up} = \frac{(Z_1 + Z_2)}{Z_2} \cdot U_2 + Z_1 \cdot C \cdot \frac{dU_2}{dt} .$$

Нека упадниот бран привремено го претставиме како косоаголен, т.е. $U_{up}(t) = s \cdot t = (U_m/T_C) \cdot t$. Тогаш применувајќи ја Лапласовата трансформација на последната диференцијална равенка, добиваме:

$$\frac{2U_m}{T_C} \frac{1}{p^2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \cdot U_2(p) + p \cdot Z_1 \cdot C \cdot U_2(p) ,$$

$$U_2(p) = \frac{2U_m}{p^2} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot C} \cdot \frac{1}{p + (Z_1 + Z_2)/(Z_1 \cdot Z_2 \cdot C)} .$$

Решението на непознатата $U_2(t)$ во временски домен се добива со инвезна Лапласова трансформација. Тоа гласи:

$$U_2(t) = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1+Z_2)\cdot T_C}\cdot\left[t - T\cdot\left(1-e^{-t/T}\right)\right]\cdot h(t)\,; \quad T = \frac{Z_1\cdot Z_2}{Z_1+Z_2}\cdot C\,.$$

Временскиот тек според последниот израз важи за периодот на челото на бранот, т.е. за $0 \le t \le T_C$. За времиња $t > T_C$, според принципот на суперпозиција, се добива:

$$U_2(t) = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1+Z_2)\cdot T_C}\cdot\left[t - T\cdot\left(1-e^{-t/T}\right)\right]\cdot h(t) -$$

$$-\frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1+Z_2)\cdot T_C}\cdot\left[(t-T_C) - T\cdot\left(1-e^{-(t-T_C)/T}\right)\right]\cdot h(t-T_C)\,.$$

Стрмнината на прекршениот бран $s=dU_2/dt$, која е наедно и стрмнина на напонот на собирниците U_A, во време на челото на упадниот бран ќе биде:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1+Z_2)\cdot T_C}\cdot\left(1-e^{-t/T}\right).$$

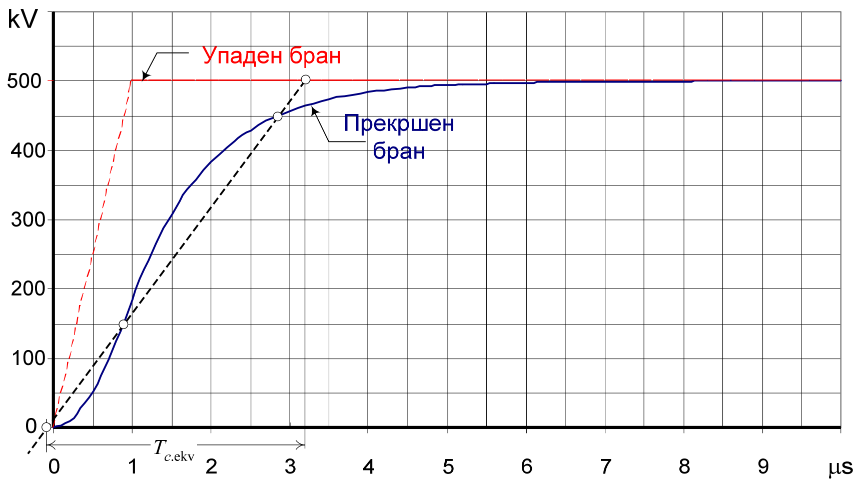
Очигледно е дека е таа најмала во t=0 а најголема во $t = T_C$, и изнесува:

$$s_{\max} = \left(\frac{dU_2}{dt}\right)_{t=Tc} = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1+Z_2)\cdot T_C}\cdot(1-e^{-T_C/T}) = \frac{\alpha\cdot U_m}{T_C}\cdot(1-e^{-T_C/T})\,.$$

Ако должината на челото на деформираниот прекршен бран ја определуваме според нагибот на тангентата на кривата $U_2(t)$ во $t = T_C$, тогаш за новото, еквивалентно, време на чело би добиле:

$$T = \frac{Z_1\cdot Z_2}{Z_1+Z_2}\cdot C = 1\ \mu\text{s}\,; \quad T_{C.\text{ekv}} = \frac{T_C}{1-e^{-T_C/T}} = \frac{1{,}0}{1-e^{-1/1}} = 1{,}6\ \mu\text{s}\,.$$

Но поправилно би било времето на чело да се определи врз основа на временскиот период Δt за којшто напонот U_2 од вредноста $0{,}3\cdot U_m$ ќе се зголеми на вредноста $0{,}9\cdot U_m$, како што е тоа графички прикажано на сликата 3. За таа цел ќе биде потребно да се определи временскиот тек на напонот на собирниците $U_2(t) = U_A(t)$.



Слика 3.

На сликата 3 е прикажан временскиот тек на прекршениот бран, т.е. напонот на собирниците $U_A(t)$ (со дебела сина линија) и обликот на упадниот бран $U_{up}(t)$ (тенка црвена линија). Од сликата јасно се гледа дека присуството на капацитетот C во постројката предизвикало деформација (намалување на стрмнината), т.е. ублажување на обликот на напонот во периодот на неговото чело, додека амплитудата и понатаму останува иста како и за случајот кога кондензаторот не постои.

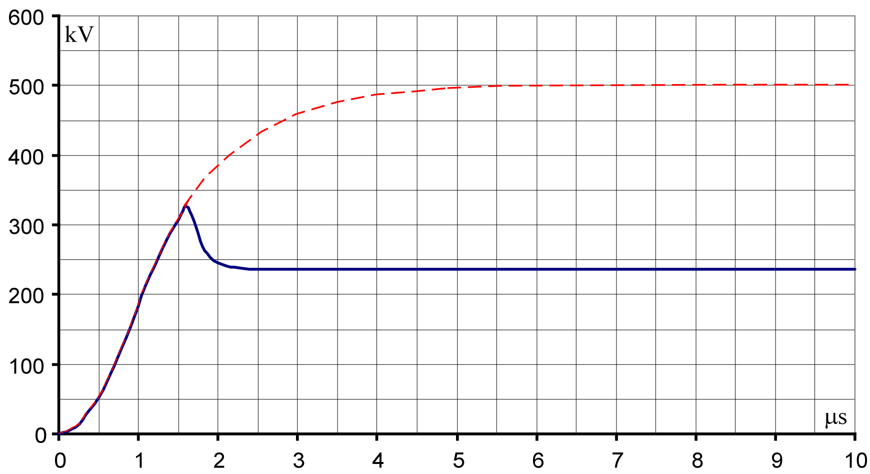
Од дијаграмот отчитуваме дека е $U_2 = 0{,}3 \cdot U_m = 150$ kV за $t_1 = 0{,}86$ μs, додека $U_2 = 0{,}9 \cdot U_m = 450$ kV за $t_2 = 2{,}84$ μs. Значи $\Delta t = t_2 - t_1 = 1{,}98$ μs. Според тоа "еквивалентото" време на чело на деформираниот бран ќе биде:

$$T_{C.\text{ekv}} = (t_2 - t_1) \cdot \frac{100}{60} = \frac{2{,}84 - 0{,}86}{0{,}6} = \frac{1{,}98}{0{,}6} = 3{,}3 \ \mu\text{s}.$$

Значи, со самото минување покрај кондензаторот, упадниот бран се деформирал и продолжил да се простира по вториот вод, но со намалена стрмнина, така што тој би можел повторно да се третира како косоаголен бран но со време на чело 3,3 μs, односно со стрмнина $s = 500/3{,}3 = 151{,}5$ kV/μs.

Бидејќи стационарната вредност што ќе ја постигне напонот U_A изнесува $U_A(\infty) = U_m = 500$ kV; јасно е дека доколку на собирнциите А има приклучено одводник на пренапони, тој ќе реагира и ќе се активира. Од дијаграмот на сл. 4.13.3 се отчитува дека $U_A(t{=}1{,}7\ \mu\text{s}) = U_{reag} = 342$ kV, што значи дека одводникот би се активирал во $t_{reag} = 1{,}7$ μs.

Временскиот тек на напонот $U_A(t)$, односно обликот на прекршениот напонски бран којшто се простира по вториот вод во тој случај би изгледал како на сликата 4 (полна дебела сина линија).



Слика 4. Случај кога на собирниците А е приклучен одводник

■ ■ ■

Задача 4.14. Да се оцени колкава би била стационарната вредност на напонот $U_A(\infty)$ на собирниците А во примерот од претходната задача за случајот да е вклучен и третиот вод. Дали во тој случај би дошло до реагирање на одводникот.

Решение:

Во случај да биде вклучен и третиот вод би имале:

$$Z_1 = Z_C = 400\ \Omega; \quad Z_2 = \frac{Z_C}{2} = 200\ \Omega; \quad \alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{400}{600} = \frac{2}{3}$$

$$T = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot C = 0{,}667\ \mu\text{s}.$$

$$U_A(\infty) = U_2(\infty) = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)} = \alpha \cdot U_m = \frac{2}{3} \cdot 500 = 333{,}3\ \text{kV}.$$

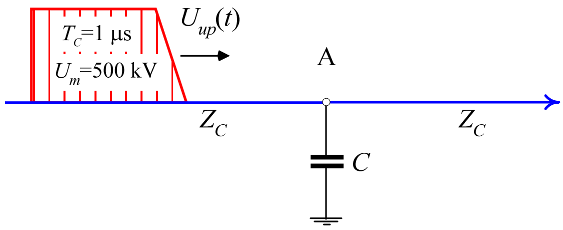
Бидејќи е $U_A(\infty) < U_{reag} = 342$ kV, се заклучува дека одводникот на пренапони нема да реагира, т.е. во овој случај тој не е неопходен.

■ ■ ■

Задача 4.15◊. Косоаголен напонски бран со рамен грб со параметри $U_m = 500$ kV, $T_c = 1$ μs) се движи по вод со карактеристична импеданција $Z_c = 400\ \Omega$ и минува покрај паралелно поставен кондензатор којшто има задача да ја намали стрмнината на упадниот бран (слика 1).

Да се пресмета вредноста на капацитетот C на кондензаторот така што еквивалентото време на чело на прекршениот, или поточно речено "пропуштениот", бран биде $T_{c.\text{ekv}} = 5$ μs.

За така избраниот капацитет C на кондензаторот да се нацрта зависноста $U_A(t)$ на прекршениот бран за првите 10 μs и да се утврди по графички начин дали пресметката на потребниот капацитет C на кондензаторот е правилно извршена.



Слика 1.

Напатствие:

Проценката на величината $T_{c.\text{ekv}}$ може да се изврши врз база на максималната стрмнина на прекршениот бран $s_{\max}$, која според изложеното во задачата 4.13, изнесува:

$$s_{\max} = \left(\frac{dU_2}{dt}\right)_{t=Tc} = \frac{2U_m \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2) \cdot T_C} \cdot (1 - e^{-T_C/T}) = \frac{\alpha \cdot U_m}{T_C} \cdot (1 - e^{-T_C/T})$$

Во задачата може да се земе дека просечната стрмнина на челото на прекршениот бран е два пати помала од максималната, т.е.:

$s_{\text{med}} = (s_{\max} + s_{\min})/2 = s_{\max}/2$

или:

$$s_{\text{med}} = \frac{s_{\max}}{2} = \frac{U_m \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2) \cdot T_C} \cdot (1 - e^{-T_C/T});\quad T = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot C = \frac{Z_C \cdot C}{2}.$$

Ако се земе предвид дека важи:

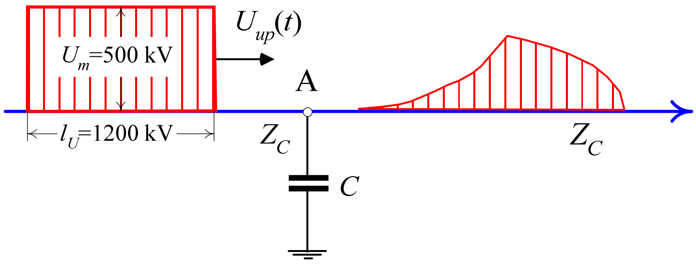
$$s_{\text{med}} = \frac{U_m}{T_{c.\text{ekv}}},$$

од последното произлегува дека вредноста на еквивалентното чело $T_{c.\text{ekv}}$ приближно ќе биде:

$$T_{C.\text{ekv}} = \frac{(Z_1 + Z_2)}{Z_2} \cdot \frac{T_C}{1 - e^{-T_C/T}} = \frac{2T_C}{1 - e^{-T_C/T}}.$$

■ ■ ■

Задача 4.16. Правоаголен пресечен бран со рамно чело и амплитуда U_m = 500 kV патува по вод со карактеристична импеданција Z_C = 400 Ω и минува покрај паралелно поставен кондензатор C =15 nF (слика 1). Да се определи обликот на пропуштениот бран којшто ќе продолжи да се простира по водот. Колкава е неговата стрмнина а колкава е неговата амплитуда. Должината на упадниот бран изнесува l_U = 1200 m, односно неговото траење $T_T = l_U/v$ = 4 μs.



Слика 1. Деформација на обликот на куси бранови

Р е ш е н и е:

Кога упадниот бран имаше правоаголен облик со рамно чело и бесконечно траење, обликот на прекршениот бран по поминувањето покрај кондензаторот C се опишување со следната релација:

$$U_A(t) = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\cdot U_m \cdot \left(1-e^{-t/T}\right)\cdot h(t) = \alpha \cdot U_m \cdot \left(1-e^{-t/T}\right)\cdot h(t);$$

$$T = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1+Z_2}\cdot C.$$

Во конкретниов случај пресечениот упаден бран можеме да го претставиме како збир (суперпозиција) на два правоаголни брана со бесконечно траење со исти амплитуди U_m, но различен поларитет, т.е.:

$$U_{up}(t) = U_m \cdot h(t) - U_m \cdot h(t-T_T)\,. \tag{1}$$

Бидејќи системот е линеарен ќе можеме да го примениме принципот на суперпозиција. Според овој принцип одзивот во едно коло под дејство на екситација којашто може да се претстави како суперпозиција од повеќе парцијални екситации може да се добие како збир од одзивите на колото на секоја екситација одделно. Тоа во случајов би значело дека за напонот $U_A(t)$ ќе важи:

$$U_A(t) = \alpha \cdot U_m \cdot \left(1-e^{-t/T}\right)\cdot h(t) - \alpha \cdot U_m \cdot \left(1-e^{-(t-T_T)/T}\right)\cdot h(t-T_T)\,. \tag{2}$$

Последната релација може да се напише и малку поинаку:

$$U_A(t) = \begin{cases} \alpha \cdot U_m \cdot (1-e^{-t/T_T}) \text{ за } t \le T_T, \\ \alpha \cdot U_m \cdot (e^{-(t-T_T)/T} - e^{-t/T_T}) \text{ за } t > T_T. \end{cases} \tag{3}$$

Од последните изрази може да се заклучи дека напонот U_A ќе ја постигне својата максимална вредност $U_{A.\max}$ во моментот $t = T_T$:

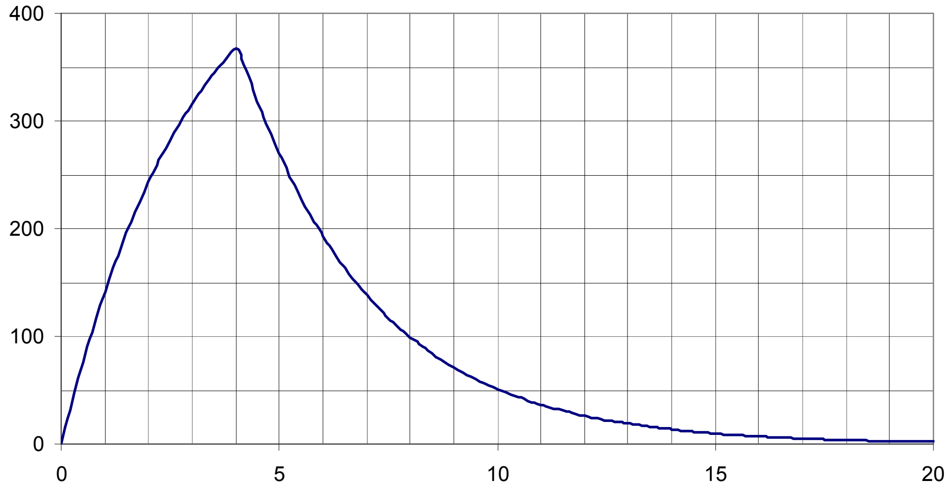
$$U_{A.\max} = \alpha \cdot U_m \cdot \left(1-e^{-T_T/T}\right). \tag{4}$$

Во конкретниов случај ќе имаме:

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2} = \frac{2Z_C}{Z_C+Z_C} = 1;$$

$$T = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1+Z_2} \cdot C = \frac{Z_C \cdot C}{2} = \frac{400 \cdot 15 \cdot 10^{-9}}{2} = 3\ \mu\text{s},$$

$$U_{A.\max} = 1 \cdot 500 \cdot \left(1 - e^{-4/3}\right) = 368,2\ \text{kV}.$$



Слика 2. Изглед на бранот "пропуштен" од кондензаторот *C*

На сликата 2 е прикажан обликот на прекршениот бран којшто се формира кога упадниот правоаголен бран го преминува кондензаторот C и продолжува да се простира по вториот вод, т.е. зависноста $U_A(t)$ во првите 20 μs. Очигледна е силната деформација на неговиот облик, т.е. неговото "развлекување" и смалувањето на неговата амплитуда за повеќе од 26%.

Не е на одмет во оваа прилика да се спомене дека наполно исти деформации на упадните бранови се случуваат и кога упадниот бран минува "низ" редено приклучен индуктивитет L. Релациите со коишто се опишува прекршениот бран се и во тој случај идентични со овде изведените релации коишто важат за случајот на паралелно приклучен капацитет, само што временската константа на колото во тој случај би била: $T = L/(Z_1+Z_2)$.

Се поставува прашањето колкав треба да биде капацитетот C на кондензаторот доколку сакаме, на пример, максималниот напон $U_{A.\max}$, којшто е меродавен за напонските напрегања на изолацијата, да биде половина од амплитудата на упадниот бран, т.е. $U_{A.\max} = 250$ kV.

За решавањето на ваквата задача повторно тргнуваме од релацијата (4.16.4), само што сега ни е позната нејзината лева страна, т.е. вредноста на напонот $U_{A.\max}$, додека не ни е позната само временската констнта на колото $T = Z_1 \cdot Z_2 \cdot C/(Z_1+Z_2)$, односно вредноста на капацитетот C. После определен број математички трансформации на изразот (4) се добива следната релација:

$$T = \frac{-T_T}{\ln\left(1 - \dfrac{U_{A.\max}}{\alpha \cdot U_m}\right)}.$$

Со замена на бројните вредности се добива:

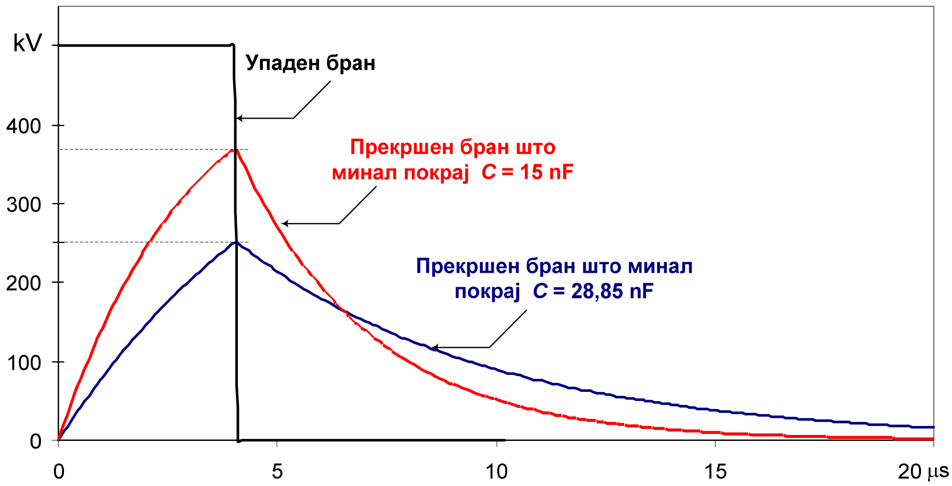
$$T = \frac{-4}{\ln\left[1 - 250/(1 \cdot 500)\right]} = 5,77\ \mu\text{s}.$$

Сега може да се пресмета и капацитетот C на кондензаторот:

$$T = \frac{C \cdot Z_C}{2} = 5,77 \cdot 10^{-6} \Rightarrow C = \frac{2T}{Z_C} = \frac{2 \cdot 5,77 \cdot 10^{-6}}{400} = 28,85 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{F}.$$

Значи кондензаторот со капацитет C = 28,85 pF ќе ја "преполови" амплитудата на пропуштениот бран.

На сликата 3 се прикажани упадниот пресечен бран (црна линија) и пропуштените бранови од попречно приклучен кондензатор со капацитет C = 15 nF (црвена линија) и C = 28,85 nF (сина линија).

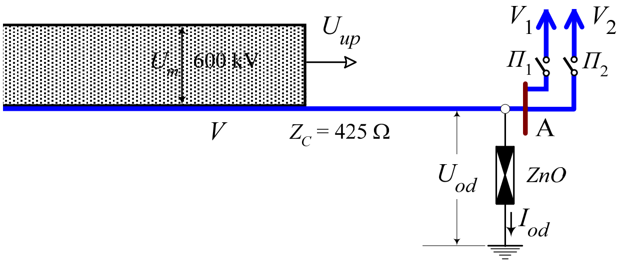


Слика 3. Облици на упадниот бран и прекршените бранови "пропуштени" од кондензатор со *C* = 15 nF и *C* = 28,85 nF

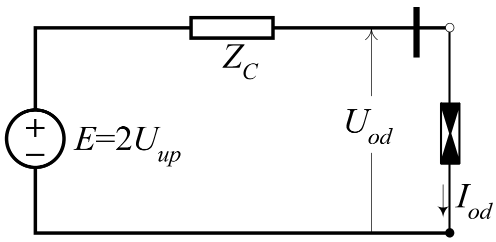
■ ■ ■

5. ЗАДАЧИ ОД РАЗНИ ОБЛАСТИ

Задача 5.1. Правоаголен упаден бран U_{up} со бесконечна должина и амплитуда U_m = 600 kV, движејќи се по вод со бранова импеданција Z_C = 425 Ω, наидува на собирницата A, која претставува крај од водот (точка A) (сл. 1). Останатите два вода V1 и V2, кои што имаат исти карактеристики како и водот V, се исклучени. На самиот крај од водот е инсталиран цинк-оксиден (ZnO) одводник на пренапони чија што волт – амперна карактеристика може да се опише со релацијата $U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha}$.



Слика 1. Упад на пренапонски бран



Слика 2. Еквивалентна шема за анализа

Номиналната струја на одведување на одводникот изнесува I_n = 10 kA а преостанатиот напон при оваа струја изнесува U_{od} = 280 kV. Исто така е познато дека при струја на одведување I_{od} = 5 kA напонот на одводникот изнесува U_{od} = 274 kV.

Потребно е:

а) Да се пресметаат вредностите на константите C и α за тој одводник;

б) Да се пресметаат вредностите на напонот U_{od} и струјата I_{od} што ќе се воспоставaт кај одводникот веднаш по пристигнувањето на упадниот бран;

в) Колкав ќе биде преостанатиот напон U_{Pr1} на одводникот доколку е вклучен прекинувачот П1 на водот V1 чијашто бранова импеданција изнесува исто така Z_C = 425 Ω. Колкав ќе биде преостанатиот напон U_{Pr2} на одводникот доколку се вклучени обата прекинувача П1 и П2.

Р е ш е н и е:

а) Пресметка на константите C и α.

Напонот и струјата на одводникот на пренапони се поврзани со следната релацијата:

$$U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha}.$$

За секој одводник може да се напишат две равенки кои ќе ја даваат врската меѓу преостанатиот напон и струјата на одведување за различни работни точки. Во задачата, се дадени две такви точки и за нив важи:

$$U_{od1} = C \cdot I_{od1}^{\alpha}; \quad U_{od2} = C \cdot I_{od2}^{\alpha}$$

$$\frac{U_{od1}}{U_{od2}} = \left(\frac{I_{od1}}{I_{od2}}\right)^{\alpha}$$

$$\frac{280}{274} = 2^{\alpha} \Rightarrow \alpha = \log_2 1,022 = 0,031251$$

$$C = \frac{U_{od}}{I_{od}^{\alpha}} = \frac{280}{10^{0,031251}} = 260,56$$

б) Пресметка на напонот и струјата на одводникот U_{od} и I_{od}.

Според еквивалентната шема прикажана на сликата 2 важат следните релации:

$$E = 2U_m = Z_C \cdot I_{od} + U_{od}$$

$$U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha}$$

$$E = Z_C \cdot I_{od} + C \cdot I_{od}^{\alpha} \Rightarrow f(I_{od}) = E - Z_C \cdot I_{od} - C \cdot I_{od}^{\alpha} = 0$$

Трансцедентната равенка ќе ја решиме интеративно, со примена на Њутновиот метод, според следниот алгоритам:

$$I_{k+1} = I_k - \frac{f(I_{od})}{f'(I_{od})};\ k = 0, 1, 2, \dots$$

Ако за почетна вредност на струјата на одведување се усвои 5 kA, тогаш според Њутновиот метод ќе се добие:

$$I_1 = I_0 - \frac{f(I_0)}{f'(I_0)} = I_0 - \frac{2 \cdot U_m - Z_C \cdot I_0 - C \cdot I_0^{\alpha}}{-Z_C - C \cdot \alpha \cdot I_0^{\alpha-1}} = 5 - \frac{260{,}7 \cdot 5^{0{,}031} + 425 \cdot 5 - 2 \cdot 600}{425 + 260{,}7 \cdot 0{,}031 \cdot 5^{0{,}031}} = 2{,}19 \text{ kA}$$

После само три итерации се добива:

$I_{od} = 2{,}1952$ kA.

Сега можеме да го пресметаме напонот на одводникот:

$$U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha} = 260{,}56 \cdot 2{,}1952^{0{,}031251} = 267{,}04 \text{ kV}.$$

в) Пресметка на преостанатиот напон на одводникот U_{Pr} по вклучување на водовите V_1 и V_2

Со вклучување на првиот вод V_1 ќе се добие уште еден елемент кој е паралелно поврзан на одводникот, а има исти карактеристики како и водот по кој патува бранот. Во тој случај ќе важи следната релација:

$$E = Z_C \cdot (I_{od} + I_{Z_C}) + U_{od} = Z_C \cdot I_{od} + 2 \cdot U_{od} = Z_C \cdot I_{od} + 2 \cdot C \cdot I_{od}^{\alpha}$$

Повторно се доби едена трансцедентна равенка во која како непозната се јавува струјата низ одводникот I_{od}. Нејзината вредност ќе ја добиеме итеративно, како и во претходниот случај, со примена Њутновиот метод:

$$I_1 = I_0 - \frac{f(I_0)}{f'(I_0)} = I_0 - \frac{2 \cdot U_m - Z_C \cdot I_0 - 2 \cdot C \cdot I_0^{\alpha}}{-Z_C - 2 \cdot C \cdot \alpha \cdot I_0^{\alpha-1}}$$

Ако за почетно решение се усвои $I_0 = 2$ kA, после две итерации се добива $I_{od} = 1{,}57972$ kA. Потоа за напонот на одводникот за тој случај се добива вредноста $U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha} = 264{,}31 \text{ kV}$.

Ако се вклучи и вториот вод, на сличен начин, се добива релацијата:

$$E = Z_C \cdot I_{od} + 3 \cdot C \cdot I_{od}^{\alpha},$$

од која, на начин идентичен како и во претходниот случај, после само неколку итерации се добиваат следните резултати:

$I_{od} = 0{,}985$ kA, $U_{od} = 260{,}44$ kV.

■ ■ ■

Задача 5.2. Челично-решеткаст столб од еден 110 kV надземен вод со височина $h_{st} = 25$ m е снабден со висечки изолаторски вериги. Секоја изолаторска верига се состои од вкупно n капести изолатори од типот U160 BS а таквите капести изолатори имаат височина од 146 mm и широчина на чинијата од 280 mm, поради што некогаш тие се означувале со ознаката

K 146/280. Вкупната должина на меѓуелектродното растојание d, коешто е меродавно за изолационата цврстина на веригата за импулсни пренапони, изразено во (m), изнесува:

$d = 0{,}146 \cdot n = 1{,}022$ m.

Се посматра преоден процес којшто се јавува при удар на гром во врвот од столбот. Струјата од громот притоа може да се претстави со струен бран со амплитуда I_M= 40 кА којшто има косо чело со време на челото T_C = 2 μs и рамен грб со бесконечно траење. Анализите покажуваат (видете ја задачата 4.12 од Збирката задачи) дека во тој случај напонот на врвот од столбот $U_{st}(t)$, којшто е приближно ист со напонот што ја напрега изолаторската верига на најгорната фаза "А", $U_{iz}(t)$, има облик како на сликата 2 каде што се:

$$U_L \approx L_{st} \cdot S = L_{st} \cdot (I_m / T_C); \quad U_R = R_{st} \cdot I_m; \quad U_{\max} = U_L + U_R .$$

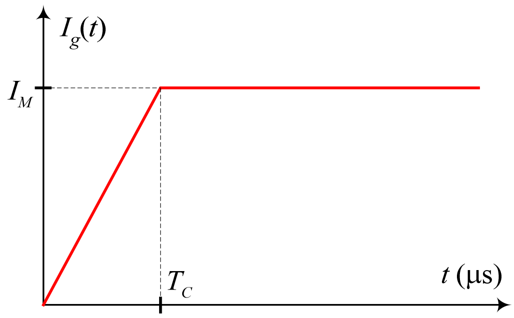
Потребно е:

а) да се нацрта обликот на волт-секундната (V–s) карактеристика на подносливиот импулсен напон на изолаторската верига ако таа може аналитички да се опише со помош на изразот (5.25) (страна 85);

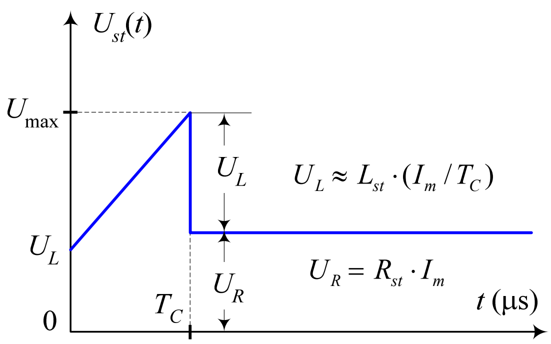
б) да се пресмета темената вредност на пренапонот $U_{\max}$ што ја напрега изолацијата во моментот $t = T_C$ ($U_{\max} = U_{iz}(t{=}T_C)$) и да се утврди дали ќе дојде до прескок во тој момент, т.е. дали е $U_{\max} > U_{50\%}(t{=}T_C)$;

в) да се испита дали може да дојде до прескок на изолацијата по изминувањето на периодот на челото, за $t > T_C$, ако веќе не настанал прескок во периодот на челото;

г) колкава е минималната вредност на амплитудата на струјата на громот $I_{M..\min}$ која ќе предизвика прекок на челото на бранот. Колкава е веројатноста P_0 таа струја да биде надмината. Во пресметките да се примени експоненцијалниот закон за распределба.



Слика 1. Облик на струјниот бран



Слика 2. Облик на напонот $U_{st}(t) \approx U_{iz}(t)$

Притоа, во текстот од задачата се воведени следните обележувања:

R_{st} = импулсна отпорност на заземјувачот од столбот.

L_{st} = индуктивност на столбот. Нејзината вредност изнесува: $L_{st} = l_{st} \cdot h_{st}$; ($l_{st}$ = 0,65 μH/m);

$S = I_M/T_C$ – стрмнина на струјниот бран во периодот на челото.

Бројни вредности: R_{st} = 10 Ω; h_{st} = 25 m; $L_{st} = 0{,}65 \cdot h_{st}$ = 16,25 μH; I_m = 40 kA; T_C = 2 μs.

Решение:

а) Волт-секундната (V-s) карактеристика на изолацијата е опишана со следната релација:

$$U_{50\%} = K_1 + \frac{K_2}{t^{3/4}},$$

каде што константите K_1 и K_2 изнесуваат:

$K_1 = 400 \cdot d = 400 \cdot 1{,}022 = 408{,}8$ kV и

$K_2 = 710 \cdot d = 710 \cdot 1{,}022 = 725{,}62$ kV×μs$^{3/4}$.

Врз основа на претходниот израз, со пресметаните константи K1 и K2 ќе го добиеме графичкиот облик на V-s карактеристика на посматраната изолаторска верига (слика 3).

Слика 3. Волт-секундна карактеристика за изолаторската верига

б) Прескок на изолацијата во периодот на грбот на пренапонот

Максималниот напон се добива во моментот $t = T_c$, и тогаш, според сликата 2 важи:

$$U_{\max} = U_L + U_R = L_{st} \cdot (I_m / T_C) + R_{st} \cdot I_m = 10 \cdot 40 + 16{,}25 \cdot (40/2) = 725 \text{ kV} .$$

Од друга страна, за подносливиот напон во моментот $t=T_C$, се добива:

$$U_{50\%} = K_1 + \frac{K_2}{T_C^{3/4}} = 840{,}3 \text{ kV}$$

Од пресметките произлегува дека $U_{\max} < U_{50\%}$ од каде што се заклучува дека нема да дојде до прескок.

в) Пресметка на темената вредност на пренапонот U_{max}

Кога времето тежи кон бесконечќност ($t \to \infty$) 50% прескочен напон а изолацијата ќе тежи кон вредноста на константата K_1, т.е. $U_{50\%} \to 408{,}8$ kV . Од друга страна, за $t > T_C$, за максималниот напон се добива $U_{\max} = R_{st} \cdot I_M = 400$ kV, што покажува дека и во овој случај нема да дојде до прескок бидејќи е $U_{50\%} > U_{\max}$.

г) Пресметка на најмалата амплитуда на струја $I_{M.\min}$ која ќе предивика прескок

Решението на овој дел од задачата ќе го добиеме со решавање на следниот услов:

за $t = T_C$ $U_{50\%} = U_{\max} = U_R + U_L$.

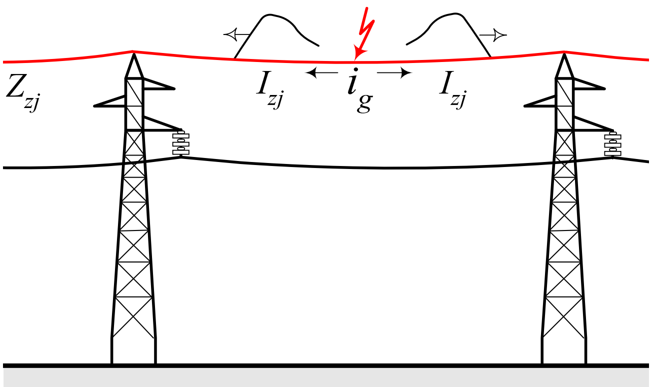
$$K_1 + \frac{K_2}{T_C^{3/4}} = L_{st} \cdot \frac{I_m}{T_C} + R_{st} \cdot I_m \quad \Rightarrow I_m = \frac{K_1 + K_2 / T_C^{3/4}}{L_{st} / T_C + R_{st}} = 46{,}36 \text{ kA}$$

Веројатноста P_0 оваа амплитуда на струјата на громот да биде надмината изнесува:

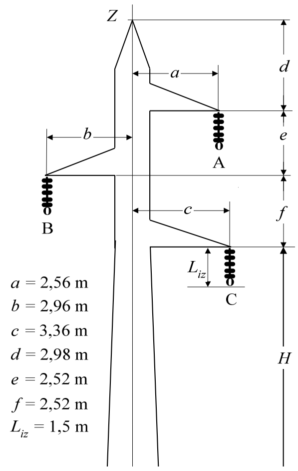
$$P_0 = P(I > I_m) = e^{-\frac{I_m}{26{,}1}} = 0{,}169 .$$

■ ■ ■

Задача 5.3. Се посматра хоризонатален распон l = 300 m од еден 110 kV надземен вод (слика 1). Основната височина на столбовите (височина до најниската конзола) изнесува H = 16,8 m, додека вкупната височина на столбовте во распонот изнесува $h_{st} = H+d+e+f$ = 24,82 m (слика 2). Водот е снабден со заштитно јаже од типот Fe III 50 mm^2 (d_{zj} = 9 mm) коешто ги штити фазните спроводници од директни удари на громот под заштитен агол α. Провесите на фазните спроводници и заштитното јаже се исти и изнесуваат: $f_{pr} = f_{zj}$ = 9 m.



Слика 1. Удар на гром во заштитното јаже во средината од распонот



Слика 2. Димензии на главата на столбовите

Потребно е да се пресмета:

а) Заштитниот агол α и веројатноста P_d за пробив на громобранската заштита т.е. веројатноста за директен удар на громот во фазните спроводници;

б) Брановата импеданција на заштитното јаже Z_{zj} како и коефициентот на спрега k_{zp} помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник на најгорната фаза "A";

в) Максималната вредност на пренапонот $U_{\max}$ што ќе се појави помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник од фазата "A" при удар на гром во средината од распонот. Струјата на громот може да се апроксимира со бран којшто има стрмно чело и рамен грб, со амплитуда I_m = 60 kA и време на чело T_C = 3 μs. Да се скицира обликот на импулсниот пренапон што ќе се појави помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник во средината од распонот;

г) Веројатноста за појава на прескок P_{zj} од заштитното јаже кон фазниот спроводник од фазата "A" при удар на гром во средината од распонот.

д) Да се изврши моделирање на случајот разгледуван под в) со помош на програмата "Sredina vo raspon.xls". Да се провери дали за максималната вредност на пренапонот $U_{\max}$ се добиваат слични резултати.

Р е ш е н и е:

а) Пресметка на заштитниот агол α

Заштитниот агол се пресметува според податоците од сликата 2:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\,(\frac{a}{d+L_{iz}}) = 29,74°$$

Кога е познат заштитниот аголот, може да се пресмета и веројатноста P_d за пробив на громобранската заштита, според следната равенката:

$$\log P_d = \frac{\alpha \cdot \sqrt{H_{st}}}{90} - 4 = -2,35374; \quad \Rightarrow \quad P_d = 10^{-2,35374} = 0,004\,.$$

б) Пресметка на брановата импеданција Z_C

Брановата импеданција на заштитното јаже Z_{zj} како и коефициентот на спрега k_{zp} помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник на најгорната фаза "А" се определуват со помош на следните равенки:

$$Z_{11} = 60 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_{zj,sr}}{d_{11}}, \; Z_{12} = 60 \cdot \ln \frac{D_{12}}{d_{12}}.$$

Најпрво ќе треба да се определи $h_{zj,sr}$, како и растојанијата d_{12} и D_{12}.

$$h_{zj,sr} = h_{st} - (2/3) \cdot f_{zj} = 24,82 - (2/3) \cdot 9 = 18,82 \text{ m}$$

$$d_{12} = \sqrt{(d + L_{iz})^2 + a^2} = 5,16 \text{ m}$$

$$D_{12} = h_{st} + H + f + (e - L_{iz}) = 45,16 \text{ m}$$

Понатаму, користејќи ги релациите за пресметка на импеданциите се добива:

$$Z_{11} = 60 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_{zj,sr}}{d_{11}} = 541,9 \; \Omega; \; Z_{12} = 60 \cdot \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} = 130,157 \; \Omega$$

Коефициентот на спрега k_{zp} се определува преку односот:

$$k_{zp} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}} = 0,24.$$

в) Пресметка на максималната вредност на пренапонот $U_{\max}$

Максималната вредност на пренапонот $U_{\max}$ што ќе се појави помеѓу заштитното јаже и фазниот спроводник од фазата "А" при удар на гром во средината од распонот ќе се определи со помош на следната релација:

$$U_{\max} = \frac{Z_{zj} \cdot S \cdot \tau}{4} \cdot \left(1 - k_{zp}\right) = \frac{Z_{zj} \cdot \frac{I_m}{T_C} \cdot \frac{l}{c}}{4} \cdot \left(1 - k_{zp}\right) = 2059,2 \text{ kV}$$

г) Пресметка на веројатноста за прескок од з. јаже кон фазниот спроводник

Веројатноста за појава на прескок P_{zj} од заштитното јаже кон фазниот спроводник од фазата "А" при удар на гром во средината од распонот се определува преку релацијата:

$$P_{zj} = e^{-\frac{I_m}{2,61}} \cdot e^{-\frac{S_{\min}}{15,65}}.$$

За да може таа да се пресмета, најпрво треба да се определат минималните вредности на стрмнината и амплитудата на струјата на громот $S_{\min}$ и $I_{\min}$. Тие се пресметуваат со помош на следните релации:

$$S_{\min} = \frac{3000 \cdot s}{Z_{zj} \cdot \tau \cdot (1 - k_{zp})}, \; I_{\min} = S_{\min} \cdot \tau.$$

Величината s што фигурира во последниот израз е всушност растојанието помеѓу фазниот спроводник и заштитното јаже во средина распонот. Тоа изнесува s = 5,16 m. Понатаму имаме:

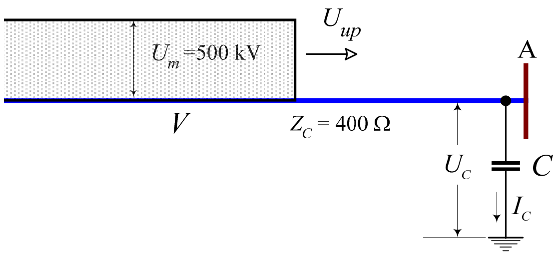
$$S_{\min} = \frac{3000 \cdot s}{Z_{zj} \cdot \tau \cdot (1 - k_{zp})} = 38,395 \text{ kA}/\mu\text{s}; \quad I_{\min} = S_{\min} \cdot \tau = 38,395 \text{ kA}$$

$$P_{zj} = e^{-\frac{I_m}{2,61}} \cdot e^{-\frac{S_{\min}}{15,65}} = e^{-\frac{38,395}{2,61}} \cdot e^{-\frac{38,395}{15,65}} = 0,01975$$

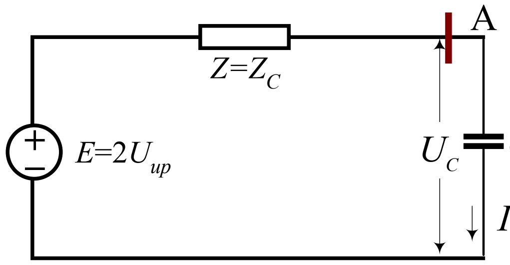
■ ■ ■

Задача 5.4. Надземен вод со номинален напон од 110 kV е приклучен на собирницата на една постројка. На истата собирница е приклучена и една кондензаторска батерија за компензација на рекативната моќност чија номинална моќност изнесува S_n = 5 MVAr.

Да се определи обликот на напонот на собирниците ако по водот доаѓа пренапон кој може да се претстави со бран со правоаголно чело и амплитуда U_m = 500 kV и бесконечно траење ако се карактеристичната импеданција на водот изнесува Z_C = 400 Ω.



Слика 1. Упаден бран во постројката



Слика 2. Еквивалентна шема за анализа

Р е ш е н и е:

Упадниот бран ќе се претстави со следната релација:

$$U_{up}(t) = U_m \cdot h(t)$$

Кондензаторската батерија е со капацитет:

$$C = \frac{S_n}{\omega \cdot U_n^2} = \frac{S_n}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_n^2} = \frac{5}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 110^2} = 1,315 \cdot 10^{-6} = 1,3\,\mu\text{F}$$

Имајќи предвид дека екситација во колото е напонот $U_{up}(t) = U_m h(t)$ чија Лапласова танформација изнесува $U_{up} = \frac{U_m}{s}$, според петерсоновото коло, прикажано на сликата 2, ќе важат следните релации:

$$2U_{up} = I \cdot (ZC + \frac{1}{Cs})$$

$$U_C(s) = \frac{I}{Cs} = \frac{1}{Cs} \cdot \frac{2 \cdot U_{up}}{Z + \frac{1}{Cs}} = \frac{1}{Cs} \cdot \frac{2 \cdot \frac{U_m}{s}}{\frac{ZCs+1}{Cs}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{2U_m}{ZCs+1}$$

Со воведување на константата $T = ZC$, претходната релација ќе го добие обликот:

$$U_C(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{2U_m}{Ts+1}.$$

Применувајќи инверзна лапласова трансформација, добиениот резултат ќе се прикаже во временски домен, односно за напонот на собирницата ќе се добие:

$$U_C(t) = 2U_m \cdot (1 - e^{-t/T}) \cdot h(t)$$

Временската константа изнасува T = 400·1,3 = 520 μs.

И покрај тоа што упадниот бран има бесконечно стрмно чело, од последниот израз се гледа дека напонот на кондензаторот (т.е. напонот на собирицата А) ќе има деформирано чело. Стрмнината на тој напон ќе биде најголема во $t = 0^+$ и ќе изнесува:

$$a = \left(\frac{dU_C}{dt}\right)_{t=0} = \frac{2U_m}{T} = \frac{2\cdot 500}{520} = 1{,}92\ \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}\ .$$

Рефлектирамата компонента на бранот се определува како разлика меѓу напонот на собирницата и упадниот бран:

$$U_{od}(t) = U_C(t) - U_{up}(t) = 2U_m(1-e^{-t/T})\cdot h(t) - U_m\cdot h(t) = U_m\cdot(1-2e^{-t/T})\cdot h(t)\ .$$

■ ■ ■

Задача 5.5*. Да се пресмета обликот на напонот на собирницата за случајот од задачата 5.4, сметајќи дека упадниот бран има правоаголен облик со истата амплитуда U_m и отсечен грб со вкупно траење $T_t = 100\ \mu\text{s}$.

Решение:

Во овој случај упадниот бран се претставува со релацијата:

$$U_{up}(t) = U_m h(t) - U_m h(t-T_t) = U_m\cdot[h(t) - h(t-T_t)]$$

Во лапласов домен овој бран може да се претстави како:

$$U_{up} = U_m\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s}e^{-sT_t}\right) = \frac{U_m}{s}(1-e^{-sT_t})\ ;$$

Со примена на истото петерсеново коло како во претходната задача, за напонот U_c ќе добиеме:

$$U_C(t) = 2U_m\times\{(1-e^{-t/T})\cdot h(t) - [1-e^{-(t-T_t)/T}]\cdot h(t-T_t)]\}$$

$$U_{od}(t) = U_m\times\{(1-2e^{-t/T})\cdot h(t) - [1-2e^{-(t-T_t)/T}]\cdot h(t-T_t)]\}$$

■ ■ ■

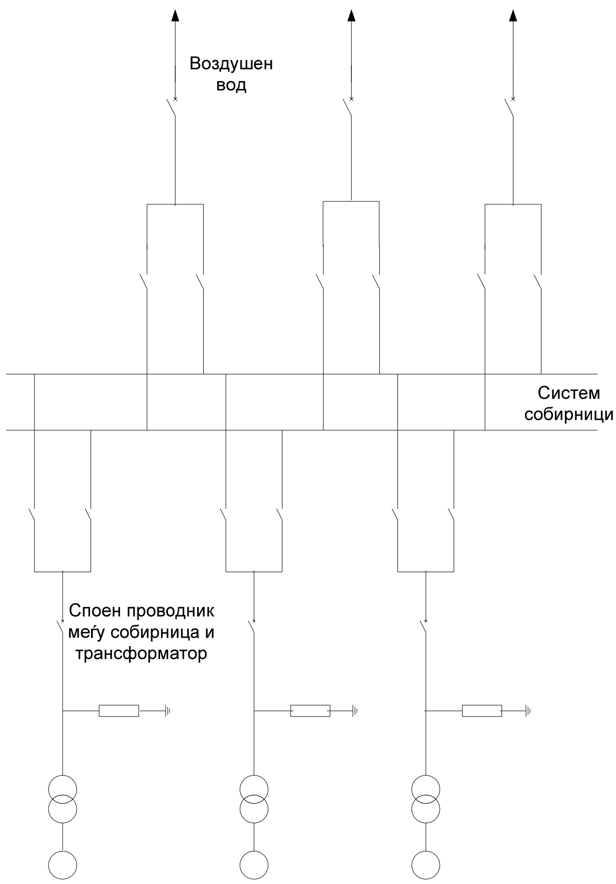
Задача 5.6. На сликата 1 е прикажана 400 kV разводна постројка. Да се провери дали заштитата од атмосферските пренапони со помош на одводници приклучени непосредно пред трансформаторот е добро одбрана. Капацитетот на собирниците да се занемари, а во обзир да се земе само простирањето на бранот меѓу собирниците и трансформаторот. Да се претпостави дека стрмнината на бранот е a=1500 kV/μs, а амплитудата на бранот е одредена со ударниот прескочен напон на изолацијата на водот. Номиналните подносливи атмосферски ударни напони за изолацијата на водовите се 1300 kV, а за изолацијата на опремата во постројката и кај трансформаторите се 1425 kV. Задачата да се реши за најдобрата и најкритичната конфигурација.

Сите водови и спојни процодници имаат еднакви карактеристични импеданси Z. Спојните проводници имаат должина d = 500 m. Карактеристиките на одводниците на пренапони се следните: номинален напон на одводникот U_n = 336 kV, номинална фреквенција f = 50 Hz, струја на одведување I_{od} = 10 kA, максимален ударен напон на реагирање за стандарден бран $U_{100\%}$ = 1100 kV, максимална преостаната вредност на напонот за номинална струја на одведување $U_{p\,r}$= 1100 kV.

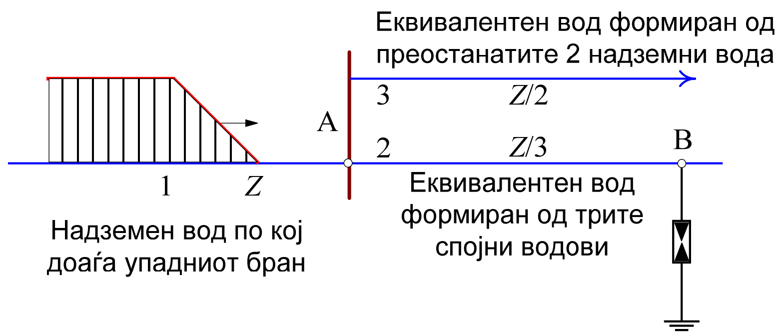
Да се смета дека упадниот бран има растечко чело и константен грб.

Решение:

Најповолна конфигурација од аспект на атмосферските пренапони е онаа кога сите водови се приклучени. Во тој случај се добива упростена заменска шема, како што е прикажано на сликата 2.



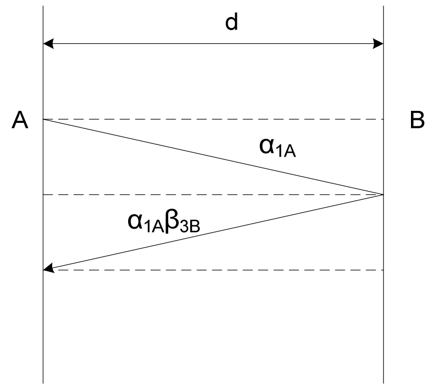
Слика 1



Слика 2

Точката А е местото каде упадниот бран доаѓа до останатиот дел од системот, односно до спојните проводници и другите два надземни вода. Со еквивалентирање на воздушните водови се добива еквивалентен вод 2, чија импеданса е Z/2. Со пареleлно спојување на спојните проводници се добива еквивалентен вод 3, чија импеданса е Z/3. Трансформаторот се заменува со бесконечна голема влезна импеданса.

Во продолжение е потребно да се определат коефициентите на прекршување и одбивање следејќи го мрежниот дијаграм прикажан на слика 3.



Слика 3

Коефициентите на прекршување α_{1A} и β_{3B} ќе се определат на следниот начин:

$$\frac{1}{Z_{ekv}}=\frac{3}{Z}+\frac{2}{Z} \quad \Rightarrow Z_{ekv}=\frac{Z}{5};$$

$$\alpha_{1A}=\frac{2Z_{ekv}}{Z_{ekv}+Z}=\frac{1}{3}; \quad \beta_{3B}=\frac{Z_{tr}-Z_{ekv}}{Z_{ekv}+Z_{tr}}=\frac{Z_{tr}(1-\frac{Z_{ekv}}{Z_{tr}})}{Z_{tr}(1+\frac{Z_{ekv}}{Z_{tr}})}=1$$

Коефициентот на одбивање за бранот кој доаѓа по еквивалентниот вод 3 кој се одбива од точката А, ќе се добие како:

$$\frac{1}{Z_{ekv}}=\frac{1}{Z}+\frac{2}{Z} \quad \Rightarrow Z_{ekv}=\frac{Z}{3}; \quad \beta_{3B}=\frac{Z_{ekv}-\frac{Z}{3}}{Z_{ekv}+\frac{Z}{3}}=0$$

Амплитудата на упадниот бран е ограничена со ударниот подносли напон на изолацијата на воздушниот вод, па според влезните параметри на задачата U_m=1300 kV. Упадниот бран има облик:

$$U_{up}(t)=a\cdot t\cdot h(t)-a\cdot(t-T_c)\cdot h(t-T_c)\text{, каде } T_c=\frac{U_m}{a}=0{,}867\ \mu\text{s}.$$

Напонот на собирницата А се добива како:

$$U_A(t)=\alpha_{1A}\cdot a[t\cdot h(t)-(t-T_c)\cdot h(t-T_c)]+\alpha_{1A}\beta_{3B}a\cdot[(t-2T)\cdot h(t-2T)-(t-T_c-2T)\cdot h(t-T_c-2T)] \quad (1)$$

Напонот на собирницата В по надоаѓањето на напонскиот бран ќе се определи со следната релација:

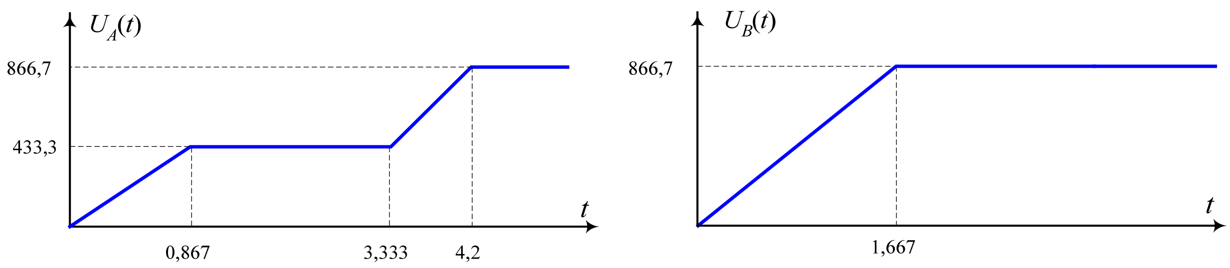
$$U_B(t)=\alpha_{1A}\cdot(1+\beta_{3B})\cdot a\cdot[(t-T)\cdot h(t-T)-(t-T_c-T)\cdot h(t-T_c-T)] \quad (2)$$

Временската константа T има вредност $T=(d/v)=1{,}667$ µs

Со замена на вредностите за T_c и T во релациите за напоните, се добиваат графиците за промена на напонот во зависност од времето (слика 4).

$$U_A(t)=500\times[t\cdot h(t)-(t-0{,}8667)\cdot h(t-0{,}8667)+(t-3{,}33)\cdot h(t-3{,}33)-(t-4{,}2)\cdot h(t-4{,}2)]$$

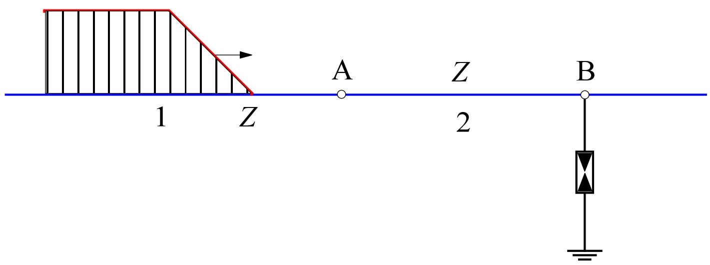
$$U_B(t)=1000\times[(t-1{,}667)\cdot h(t-1{,}667)-(t-2{,}533)\cdot h(t-2{,}533)]$$



Слика 4

Напонот кој ќе се појави на собирница В (пред трансформаторот) нема да ја надмине вредноста на реагирање на одводникот (<1100 kV).

Најкритична конфигурација ќе биде онаа кога е приклучен само еден доводен вод и еден споен проводник, т.е. еден агрегат. Шемата за овој случај е прикажана на слика 5.



Слика 5

Коефициентот на прекршување на бранот кој доаѓа од водот 1 и се прекршува во точката А, се добива според релацијата:

$$\alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2Z}{2Z} = 1$$

Коефициентот на одбивање од точката В се добива со следната релација:

$$\beta_{2B} = \frac{Z_{tr} - Z_2}{Z_2 + Z_{tr}}\Big|_{Z_{tr}=\infty} = 1$$

Во случајов важат истите релации за временската промена на напонот во секоја од собирниците (релации 1 и 2). Заменувајќи ги соодветните вредности за коефициентите за прекршување и одбивање, се добиваат релациите кои ја опишуваат промената на напонот во точките А и В.

$$U_A(t) = 1500[th(t) - (t-0,8667)h(t-0,8667) + (t-3,33)h(t-3,33) - (t-4,2)h(t-4,2)]$$

$$U_B(t) = 3000[(t-1,667)h(t-1,667) - (t-2,533)h(t-2,533)]$$

Од последната релација произлегува дека во моментот t=2,533 μs напонот на собирницата В ќе добие вредност U_B=2598 kV, која е повисока од вредноста при која одводникот реагира. Моментот на реагирање на одводникот одговара на ударен напон на реагирање за стандарден бран $U_{100\%}$ = 1100 kV. Тој може да се определи од релацијата која ја прикажува временската промена на напонот во точката В (непосредно пред трансформаторот).

$$U_{100\%} = \alpha_{1A} \cdot a \cdot (1+\beta_{2B})(t_{reag} - T)$$

$$\Rightarrow \; t_{reag} = \frac{U_{100\%}}{\alpha_{1A} \cdot a \cdot (1+\beta_{2B})} + T = \frac{1100}{1 \cdot 1500 \cdot (1+1)} + 1,667 = 2,033 \; \mu\text{s}$$

Највисок напон на собирниците ќе се добие во моментот непосредно пред пристигнувањето на рефлектиранaта компонента од одводникот, откако тој реагирал, односно во моментот t=T+$t_{reag.}$ Според релацијата 1, за овој момент се добива вредност:

$$U_{A\max} = U_A \times (t_{reag} + T) = \alpha_{1A} \cdot a \cdot [(t_{reag} + T) - (t_{reag} + T - T_c)] + \alpha_{1A} \cdot \beta_{2B} \cdot a \cdot (t_{reag} + T)$$

$$U_{A\max} = 1849 \text{ kV}$$

Во овој случај напонот е повисок од ударниот подноslив напон, па предложената заштита не е доволна. Пренапонската заштита може да се подобри со поставување на одводници на пренапони блиску до собирниците, односно пред самите приклучоци за надземните водови.

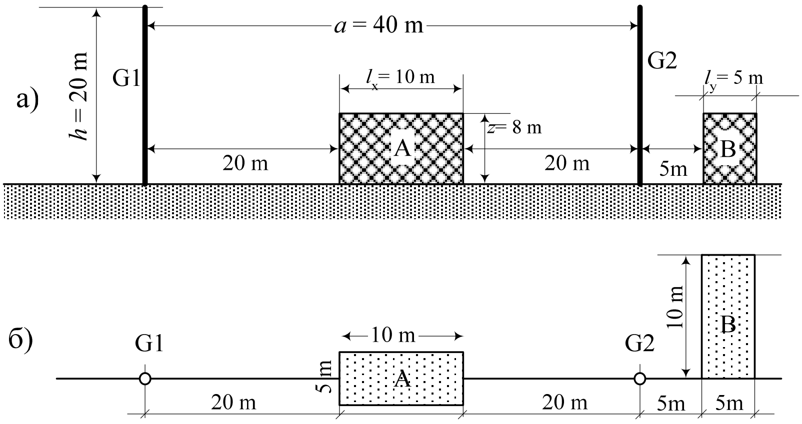
■ ■ ■

6. ИСПИТНИ ЗАДАЧИ – РЕШЕНИ И НЕРЕШЕНИ

ИСПИТ ПО ТЕХНИКА НА ВИСОК НАПОН 2 – I дел (05.04.2007 г.)

1. Задача. Два објекта A и B, во форма на паралелопипед, со идентични димензии, се штитат со два стапести громобрана, како што е тоа прикажано на сликите 1а (поглед од страна) и 1б (поглед од горе). Обата громобрана се со исти височини h = 20 m и се поставени на меѓусебно растојание a = 40 m. Објектите се со височина z = 8 m и основа во форма на правоаголник со страници l_x=10 m и l_y = 5 m.

Да се утврди дали обата објекта се ефикасно заштитени од директни удари на гром.



Слика 1. Диспозиција на објектите и громобраните од задачата бр. 1.

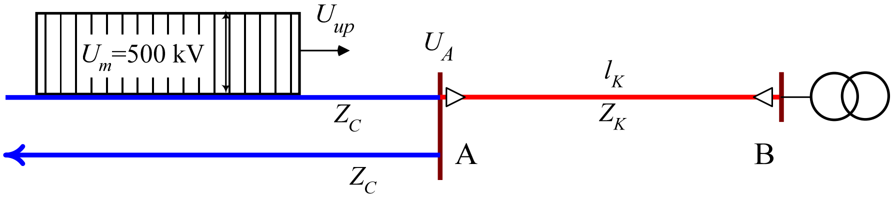
2. Задача. На сликата 2 е прикажан еден систем којшто се состои од два 110 kV надземни вода со бесконечни должини и карактеристични импеданции Z_C = 400 Ω, и еден кабел со должина l_K = 300 m и карактеристична импеданција Z_K = 50 Ω. Брзината на простирање на брановите во кабелот изнесува v_K = 150 m/μs. На крајот од кабелот е приклучен енергетски трансформатор којшто се моделира со својот влезен капацитет со вредност C = 2000 pF.

По еден од надземните водови упаѓа правоаголен бран со амплитуда Um = 500 kV. Во t = 0 тој стигнува до собирницата (точката A). Да се пресмета:

а) вредноста на напонот U_A во првиот момент непосредно по упаѓањето на напонскиот бран во точката A;

б) обликот на напонот во точката A, $U_A(t)$, во првите 5 μs од преодниот процес;

в) обликот на напонот во точката B, $U_B(t)$, во првите 5 μs од преодниот процес.



Слика 2. Приказ на анализираниот систем во задачата бр. 2.

Поени: Задача 1) 50 поени; Задача 2). а) 10 поени; б) 20 поени; в) 30 поени.

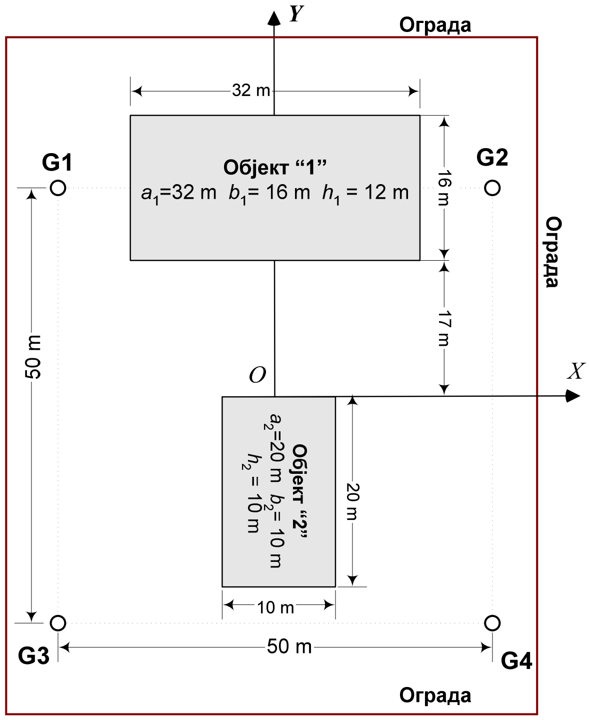
Време: 60 мин.

I КОЛОКВИУМ ПО ТЕХНИКА НА ВИСОК НАПОН 2 – I дел (21.04.2007 g.)

1. Задача. Два објекта 1 и 2, во форма на паралелопипед, со димензии: a_1 = 32 m; b_1 = 16; h_1 = 12 m и a_2 = 20 m; b_2 = 10; h_2 = 10 m, се штитат со четири стапести громобрани, **G1**…**G4** како што е тоа прикажано на слика-та 1. Сите громобрани се со исти височини h = 22 m. Растојанието помеѓу секои два соседни громобнати изнесува d = 50 m.

а) да се утврди дали објектите 1 и 2 се доверливо заштитени од директни атмосферски празнења со громобраните;

б) да се пресмата колкав ќе биде просечниот годишен број на атмосферските празнења во громобранската заштита ако кераунич-кото ниво за теренот на којшто се поставени објектите изнесува T_d=40 денови/го-дишно.

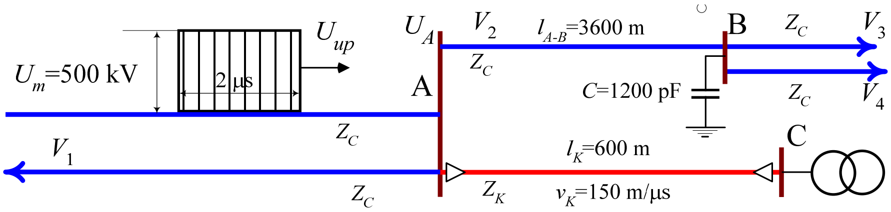


Слика 1. Диспозиција на објектите

2. Задача. Пренапонски правоаголен бран со рамно чело и траење T = 2 μs, упаѓа во точката на раздел A по вод со бранова имеданција Z_C = 400 Ω. Останатите водови прикажани на сликата 2 исто така имаат бранова имеданција Z_C = 400 Ω, додека кабелот има Z_K = 50 Ω. Оттука се разгранува во 3 правци: по бескоенчно долгиот вод V1, по бесконечниот вод V2 и по кабелот K, чија должина изнесува l_K = 600 m. На крајот од кабелот е приклучен енергетски трансформатор кој има бесконечна влезна импеданција така што кабелот може да се третира како вод отворен на својот крај. Бранот што продолжува да се простира по водот V2, долг 3600 m, по изминати $l_{A\text{-}B}$ = 3600 m наидува на собирница која може да се третира како кондензатор со капацитет C = 1200 pF и продолжува да се простира и понатаму по водовите V3 и V4. Потребно е следното:

а) Да се определи и скицира обликот на напонот U_A во точката A, во првите 20 μs сметано од моментот кога упадниот бран U_{up} стигнал во точката A.

б) а) Да се определи и скицира обликот на напонот U_B во точката B, во првите 20 μs сметано од моментот кога упадниот бран U_{up} стигнал во точката B.

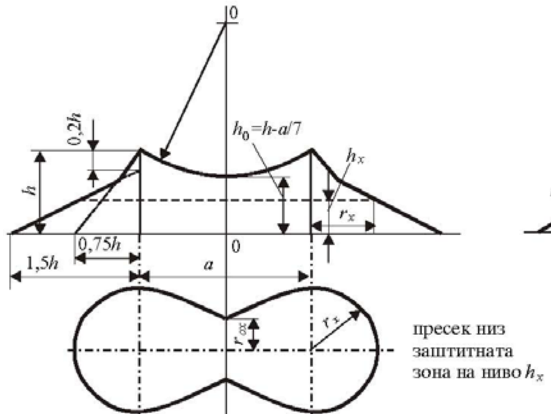


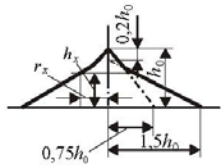
Слика 2. Приказ на анализираниот систем во задачата бр. 2.

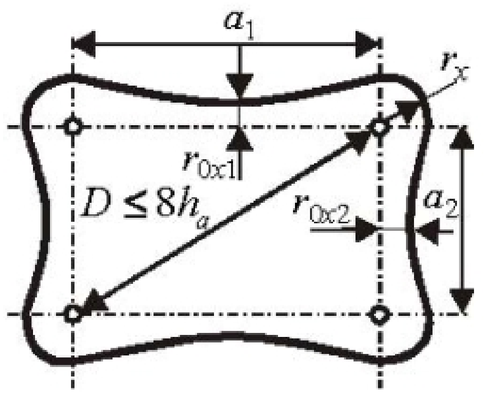
Р Е Ш Е Н И Е   Н А   З А Д А Ч И Т Е

1. Задача: Заштита на Објектот 1: $r_x = p\cdot\frac{1,6\cdot(h-h_x)}{1+h_x/h} = p\cdot\frac{1,6\cdot h_a}{1+h_x/h}$; $p=1$ за $h\le 30$ m;

$$h_a = h - h_x;\quad r_{0x}\equiv b_x = r_x\cdot\frac{12,5}{7}\cdot\frac{7\cdot h_a - a}{12,5\cdot h_a - a}.\quad N_g = 0,04\cdot T_d^{1,25} = 0,04\cdot 40^{1,25} = 4,024 \text{ уд/km}^2$$







$$h_x = h_1 = 12 \text{ m};\quad h_a = h - h_x = 22-12 = 10 \text{ m};\quad r_x = p\cdot\frac{1,6\cdot h_a}{1+h_x/h} = 1\cdot\frac{1,6\cdot 10}{1+12/22} = 10,353 \text{ m}$$

$$r_{0x}\equiv b_x = r_x\cdot\frac{12,5}{7}\cdot\frac{7\cdot h_a - a}{12,5\cdot h_a - a} = 10,353\cdot\frac{12,5}{7,5}\cdot\frac{7\cdot 10-50}{12,5\cdot 10-50} = 9,93 \text{ m}.\ (\ b_x > b_1/2 = 8 \text{ m}).$$

Бидејќи е $b_x > b_1/2$ значи дека целиот објекот 1 не е заштитен од двата громобрана G1 и G2.

Заштита на објектот 2: $D = a\sqrt{2} = 50\cdot 1,41 = 70,5$ m; $8\cdot h_a = 8\cdot 10 = 80$ m; $D < 8\cdot h_a \Rightarrow$ објектот 2 е добро штитен. б) Удари во гр. заштита: $N = (a+3,5.h)^2\cdot N_g = 0,127^2\cdot 4,024 = 0,065$ уд/год.

2. Задача:

Коеф. на прекршување α_{1A} за упадниот бран ќе биде:

$$Z_2 \equiv Z_{1A.ekv} = Z_C \,||\, Z_C \,||\, Z_K = 400\,||\,400\,||\,50 = 40\ \Omega;\quad \alpha_{1A} = \frac{2Z_2}{Z_C+Z_2} = \frac{2\cdot 40}{400+40} = 0,18182.$$

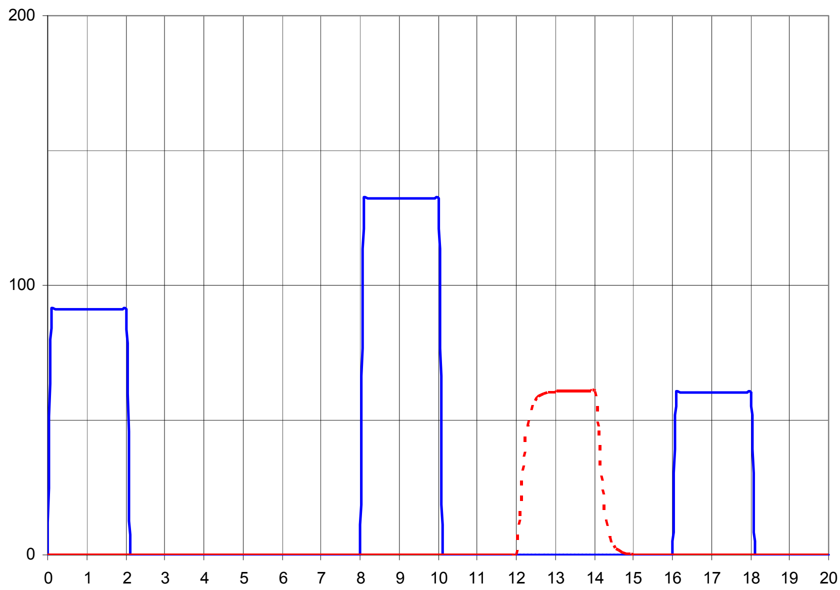
а) Упадниот бран $U_{up} = U_m$ во точката А ќе се прекрши и напонот U_A веднаш (t=0) ќе добие вредност: $U_A = U_{up}\cdot\alpha_{1A} = 500\cdot 0,18181 = 90,9$ kV. Овој бран ќе се простира по кабелот и послење време $\tau_K = l_K/v_K = 4$ μs ќе стигне до неговиот крај, тотално ќе се рефлектира од точката С и после $2\tau_K$ ќе стигне во точката А. Тука тој ќе се прекрши, со коефициент на рефлексија α_{KA} = 1,45455, така што после $2\tau = 8$ μs, напонот U_A ќе добие вредност $U_A = 90,9\cdot 1,45455 = 132,2$ kV.

Дел од овој бран ќе продолжи, како прекршен, да се простира по упадниот вод во негативен правец, а дел ќе се рефлектира од точката А (0,45455·90,9=41,32 kV) и ќе се упати повторно кон точката С. Од таму ќе се рефлектира тотално и повторно ќе се појави во точката А после 4t = 16 ms. Тука тој ќе се прекрши така што напонот ќе биде $U_A = \alpha_{KA}\cdot 41,32 = 1,45455\cdot 41,32 = 60,1$ kV.

По водот А-В ќе се простира бран од 90,9 kV кон точката В. Таму ќе стигне после τ = 3600/300 = 12 μs и ќе наиде на кондензаторот C=1200 pF. Облекот на напонот што ќе се воспостави после пистигнувањето на бранот ќе биде (видете ја задачата 4.13 од Збирката):

$U_B(t) = \alpha_B\cdot U_{B.up}\cdot\left[\left(1-e^{-t'/T}\right)\cdot h(t') - \left(1-e^{-(t'-T_T)/T}\right)\cdot h(t'-T_T)\right]$, каде што е:

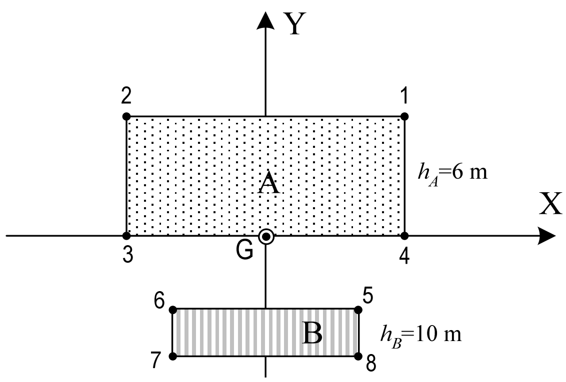
$T = C \cdot Z_{B.ek} = 1200 \cdot 400/3 = 0{,}16\ \mu s$; $T_T = 2\ \mu s$.



$U_A(0) = 90.9$ kV
$U_A(8) = 132.2$ kV
$U_A(16) = 60.1$ kV
$U_B(12) = 0$ kV
$U_B(12{,}5) = 57{,}1$ kV
$U_B(13) = 60{,}5$ kV
$U_B(14) = 60{,}6$ kV
$U_B(14{,}5) = 3{,}5$ kV
$U_B(15) = 0{,}1$ kV.

ИСПИТ ПО ТЕХНИКА НА ВИСОК НАПОН 2 – I дел (12.05.2007)

1. Задача. На сликата 1 е прикажана диспозицијата на една 35 kV разводна постројка. 35 kV дел од постројката (површина означена со "A" на сликата) е сместен на отворено и има габарит од 40×30 m. Координатите на точките 1, 2, 3 и 4, со кои е опишана оваа површина се дадени во табелата T1. Височината на објектите од 35 kV дел изнесува $h_A = 6$ m.



Слика 1. Диспозиција на објектите и громобранот од задачата бр. 1.

Громобранот G се наоѓа сместен во координатниот почеток на системот. Неговата височина h не е позната и треба да се пресмета во задачата.

Другиот дел од постројката е зградата во која е сместен 10 kV дел од постројката и командните простории. Височината на зградата изнесува $h_B = 10$ m. Нејзиниот габарит изнесува 20×5 m и е опишан со точките бр. 5, 6, 7 и 8, чии што координати се дадени, исто така, во табелата T1.

Да се пресмета најмалата височина на громобранот h така што сите објекти од делот A како и зградата B да бидат заштитени од директни удари на гром.

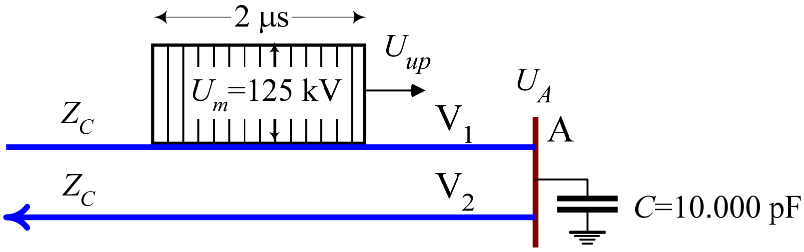
Табела T1. Координати на точките од објектите A и B на сликата 1.

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8
X (m)	20	-20	-20	20	10	-10	-10	10
Y (m)	15	15	-15	-15	-10	-10	-15	-15
Z (m)	6	6	6	6	10	10	10	10

2. Задача. Правоаголен бран со амплитуда U_m = 125 kV и траење T_T = 2 μs, наидува по 20 kV вод и упаѓа во 20 kV постројка (слика 2). Еквивалентниот капацитет на целата опрема во 20 kV дел од постројката изнесува C = 10 nF = 10.000 pF. Сите водови имаат исти карактеристики и иста бранова импеданција Z_C = 400 Ω.

a) Да се пресмета временскиот тек на напонот на собирницата A, $U_A(t)$,

b) Колкава ќе биде амплитудата на напонот U_A ако е исклучен водот V2.



Слика 2. Приказ на анализираниот систем во задачата бр. 2.

Поени: Задача 1) 50 поени; Задача 2). a) 30 поени; б) 20 поени.

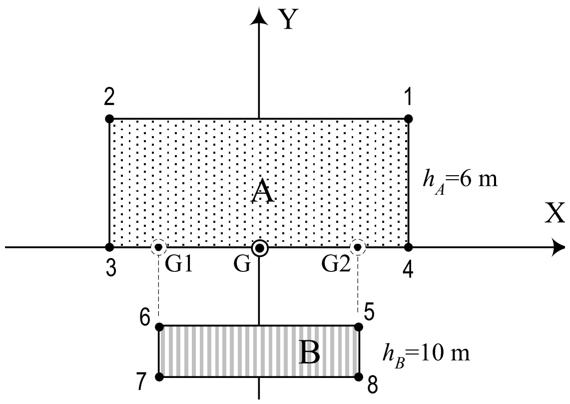
Време: 120 мин.

12. ДОМАШНИ ЗАДАЧИ

Задача Д.1. За облакодерот од задачата 3.7 (L = 20 m, W = 20 m и H = 60 m) којшто има рамен покрив во форма на квадрат е потребно да се изведе надворешна громобанска заштита. За таа цел предвидува поставување 4 идентични громобрани во темињата од покривот на зградата, секој со висина h_a.

Да се пресметаат потребната височина на громобраните h_a. При решавањето на задачата да се примени класичниот графоаналитички пристап, според релациите (3.1) ÷ (3.4) и итеративна постапка, на ист начин како што е тоа направено во задачата 3.7.

Задача Д.2. Се посматра проблемот од испитната задача по ТВН2 од 12.05.2007 година кој сега треба да се реши со помош на компјутерската програма "Zastita od grom.xls". Се работи за постројката од сликата Д.2.1 која има 35 kV дел (област A, дефинирана со точките 1, 2, 3 и 4 во која се наоѓа 35 kV расклопна опрема со височина h_A = 6 m) и 10 kV дел сместен во затворен објект (зграда B со височина h_B = 10 m, дефинирана со точките 5, 6, 7 и 8). Координатите на точките 1, 2,…, 7 и 8, се дадени во табелата Т1.



Слика Д.2.1. Диспозиција на објектите и громобранот од задачата Д.2.

Громобранот G кој треба да ги штити објектите A и B од директни удари на гром е сместен во координатниот почеток на системот. Неговата височина h не е позната и треба да се определи со помош на програмата "Zastita od grom.xls" така што веројатноста да дојде до пробив на заштитата т.е. да дојде до директен удар на гром во објектите од областа A или во зградата B да биде еднаква на 1%. Колкав ќе биде годишниот број на празнења во громобранот G, N_G=?, пресметан со помош на компјутерската програма ако е познато дека постројката е лоцирана во област со T_d = 45 денови/год.

Доколку не е можна ефикасна заштита со еден громобран (ризик ≤ 1%), да се предвиди решение со два громобрана, поставени во точките G1 и G2.

Табела Т1. Координати на точките од објектите A и B на сликата Д.2.1.

Точка	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	G	G1	G2
X (m)	20	-20	-20	20	10	-10	-10	10	0	-10	10
Y (m)	15	15	0	0	-10	-10	-15	-15	0	0	0
Z (m)	6	6	6	6	10	10	10	10	0	0	0

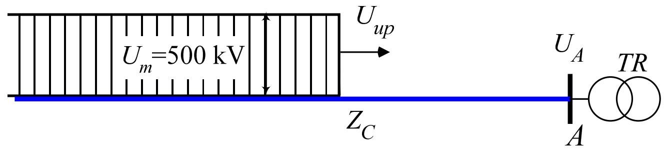
Задача Д.3. На сликата Д.3.1 е прикажан случај кога правоаголен бран со бесконечна должина и амплитуда U_m , движејќи се по вод со бранова импеданција Z_C, наидува на крајот од водот (точка A) каде што е приклучен енергетски трансформатор со влезен капацитет C. Потребно е:

а) Да се нацрта еквивалентото коло што произлегува од примената на Петерсеновото правило за разгледуваниот случај;

б) Со примена на Лапласовата трансформација да се изведе изразот за временскиот тек на напонот $U_A(t)$ што ја напрега изолацијата од трансформаторот;

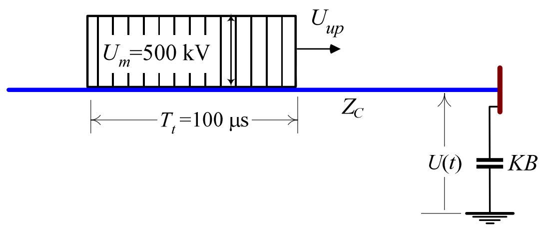
в) Каков ќе биде временскиот тек на одбиениот бран $U_{od}(t)$ којшто ќе се одбие од точката на дисконтинуитет А;

г) Да се скицира обликот на напоните $U_A(t)$ и $U_{od}(t)$ за следните бројни вредности на параметрите од посматраното коло: $Z_C = 400\ \Omega$; $C = 2000$ pF ; $U_m = 500$ kV.



Слика Д.3.1. Приказ на системот во кој упаѓа пренапонскиот бран

Задача Д.4. Надземен вод со номинален напон од 110 kV е приклучен на собирницата од една постројка. На истата собирница е приклучена и една кондензаторска батерија за компензација на реактивната моќност чија номинална моќност изнесува $S_n = 5$ MVAr. Да се определи обликот на напонот на собирниците $U(t)$ ако по водот доаѓа пренапон кој може да се претстави со бран со правоаголно чело и амплитуда $U_m = 500$ kV и рамен грб со вкупно траење $T_t = 100\ \mu$s. Карактеристичната импеданција на водот изнесува $Z_C = 400\ \Omega$.



Слика Д.4.1. Приказ на системот со кондензаторската батерија во кој упаѓа пренапонскиот бран

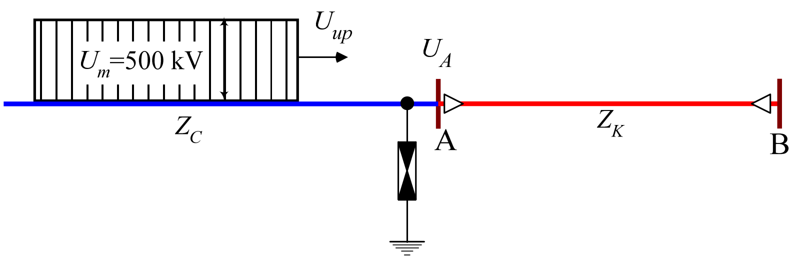
Задача Д.5. Пренапонски бран, со правоаголно чело и константен грб (зачеље), со амплитуда $U_m = 500$ kV, патува по 110 kV надземен вод со импеданција $Z_C = 400\ \Omega$, и наидува во точката А на кабелски вод со импеданција $Z_K = 50\ \Omega$, долг $l_K = 1{,}5$ km, отворен на својот крај (слика 4.4.2). На местото на премин од надземниот на кабелскиот вод, во точката А, е поставен одводник на пренапони од типот VOP 105, 10 kA. Да се пресмета:

а) дали одводникот ќе реагира во првиот момент на упадот ако е познат неговиот напон на реагирање $U_{reag} = 342$ kV;

б) после колку време ќе се почувствува дејството на рефлектираниот бран кошто се одбил од отворениот крај на кабелскиот вод ако е позната брзината на простирање на брановите по кабелот $v_K = 150$ m/μs. Колкава е неговата амплитуда;

в) колкав ќе биде напонот во точката А во тој момент. Дали е тој доволно висок за да предизвика реагирање на одводникот;

д) кога ќе дојде до реагирање на одводникот. Колкав ќе биде напонот U_A веднаш по неговото реагирање. Одводникот да се моделира како и во претходната задача со линеарна V-A карактеристика $U_{od} = E_d + R_d \cdot i_{od} \equiv 182{,}3 + 12{,}74 \cdot i_{od}$; ($U_A = U_{od}$).

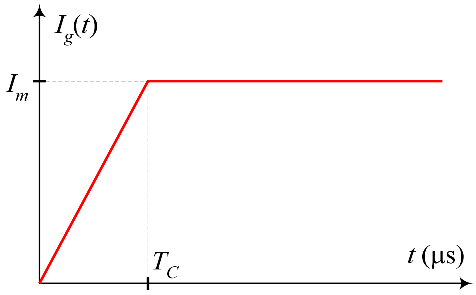


Слика Д.5.1. Приказ на системот во кој упаѓа пренапонскиот бран

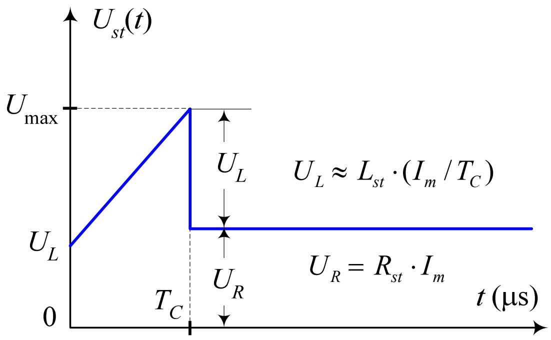
Задача Д.6. Челично-решеткаст столб од еден 110 kV надземен вод со височина h_{st} е снабден со висечки изолаторски вериги. Секоја изолаторска верига се состои од вкупно n капести изолатори од типот U160 BS а таквите капести изолатори имаат височина од 146 mm и широчина на чинијата од 280 mm, поради што некогаш тие се означувале со ознаката K 146/280. Вкупната должина на меѓуелектродното растојание d, коешто е меродавно за изолационата цврстина на веригата за импулсни пренапони, изразено во (m), изнесува:

$$d = 0{,}146 \cdot n.$$

Се посматра преоден процес којшто се јавува при удар на гром во врвот од столбот. Струјата од громот притоа може да се претстави со еден бран со косо чело со време на челото T_C и со рамен грб со бесконечно траење и амплитуда I_m (слика Д.6.1.).



Слика Д.6.1. Облик на струјниот бран



Слика Д.6.2. Облик на напонот $U_{iz}(t) \approx U_{iz}(t)$

Анализите покажуваат дека во тој случај напонот на врвот од столбот $U_{st}(t)$, којшто е приближно ист со напонот што ја напрега изолаторската верига на најгорната фаза "A", $U_{iz}(t)$, има облик како на сликата Д.6.2 (видете ја задачата 4.12 од Збирката задачи) каде што се:

$$U_L \approx L_{st} \cdot S = L_{st} \cdot (I_m / T_C); \quad U_R = R_{st} \cdot I_m; \quad U_{max} = U_L + U_R.$$

Притоа се воведени следните обележувања:

R_{st} = импулсна отпорност на заземјувачот од столбот.

L_{st} = индуктивност на столбот. Нејзината вредност изнесува: $L_{st} = l_{st} \cdot h_{st}$; ($l_{st}$ = 0,8 μH/m);

$S = I_m/T_C$ – стрмнина на струјниот бран во периодот на челото:

Потребно е:

а) да се нацрта обликот на волт-секундната (V–s) карактеристика на подносливиот импулсен напон на изолаторската верига ако таа може аналитички да се опише со помош на изразот (5.25) (страна 85?);

б) да се пресмета темената вредност на пренапонот U_{max} што ја напрега изолацијата во моментот $t = T_C$ ($U_{max} = U_{iz}(t{=}T_C)$) и да се утврди дали ќе дојде до прескок во тој момент, т.е. дали е $U_{max} > U_{50\%}(t{=}T_C)$;

в) да се испита дали може да дојде до прескок на изолацијата по изминувањето на периодот на челото, за $t > T_C$, ако веќе не настанал прескок во периодот на челото;

г) колкава е минималната вредност на амплитудата на струјата на громот $I_{m.\min}$ која ќе предизвика прекок на челото на бранот. Колкава е веројатноста P_0 таа струја да биде надмината. Во пресметките да се примени експоненцијалниот закон за распределба.

Бројни вредности:

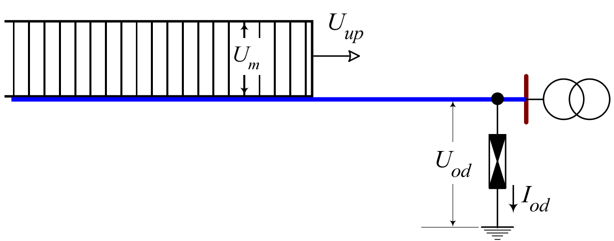
ред. број	Презиме	Име	Индекс	n	d	I_m	T_C	h_{st}	L_{st}	R_{st}
				/	m	kA	μs	m	μH	Ω
1	Буреска	Игор	076/2005	6	0,876	30	1.2	22	17,6	12
2	Карадаков	Сашко	378/2002	7	1,022	30	1.2	22	17,6	13
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	8	1,168	30	1.2	22	17,6	14
4	Николовски	Павле	313/2004	6	0,876	35	1.5	25	20,0	15
5	Стојановска	Љупка	350/2002	7	1,022	35	1.5	25	20,0	10
6	Стрезовска	Николина	094/2005	8	1,168	35	1.5	25	20,0	11
7	Тасева	Станка	284/2004	6	0,876	40	2.0	30	24,0	12
8	Тодоров	Сашко	355/2002	7	1,022	40	2.0	30	24,0	13

Задача Д.7. Се посматра случајот прикажан на сликата Д.3.1 кога правоаголен упаден бран U_{up} со бесконечна должина и амплитуда U_m, движејќи се по вод со бранова импеданција Z_C, наидува на крајот од водот (точка А) каде што е приклучен енергетски трансформатор. На самиот крај од водот, пред трансформаторот, е инсталиран одводник на пренапони од серијата VOP – 6E, со номинален напон U_n (видете ја табелата 7.2. на страна 119?). Капацитетот на трансформаторот C, во случајов, може да не се земе предвид во анализите. Потребно е:

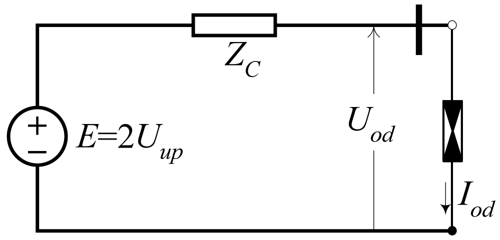
а) Ако волт-амперната карактеристика (V–A) на одводникот може да се опише со релацијата (7.1), т.е. $U_{od} = C \cdot I_{od}^{\alpha}$, да се пресметаат вредностите на константите C и α за тој одводник. Пресметката на овие константи да се изврши со помош на податоците за напонот U_{od} и струјата I_{od} што одговараат на точките за 5 и 10 kA од табелата 7.2.

б) Да се пресметаат вредностите на напонот U_{od} и струјата I_{od} што ќе се воспостават кај одводникот веднаш по неговото реагирање.

в) Колкав ќе биде преостанатиот напон U_{pr} на одводникот во разгледуваниот случај. Притоа е потребно да се води сметка за дефиницијата на поимот преостанат напон на одводникот, со која се води сметка и за вредноста на напонот на реагирање $U_{reag.\ 1,2/50}$ на чело. Колкаво ќе биде заштитното ниво на одводникот U_z а колкав коефициентот на заштита k_z ако е познат подносливиот ударен напон на изолацијата на трансформаторот $U_{podn} = U_{50\%.\mathrm{TR}} = 450$ kV.



Слика Д.7.1. Упад на пренапонски бран



Слика Д.7.2. Еквивалентна шема за анализа

Бројни вредности:

ред. број	Презиме	Име	Индекс	U_m kV	Z_C Ω	U_n kV	$U_{reag.\ 1,2/50}$ kV	$U_{50\%.TR}$ kV
1	Бурески	Игор	076/2005	600	400	105	342	450
2	Карадаков	Сашко	378/2002	625	390	117	381	550
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	650	380	126	411	450
4	Николовски	Павле	313/2004	675	360	105	342	550
5	Стојановска	Љупка	350/2002	600	400	117	381	450
6	Стрезовска	Николина	094/2005	625	390	126	411	550
7	Тасева	Станка	284/2004	650	380	105	342	450
8	Тодоров	Сашко	355/2002	675	360	117	381	550
9				600	400	126	411	450
10				625	390	105	342	550

Задача Д.8. Надземен 110 kV вод со должина L=60 km минува низ терен со кераунично ниво T_d. Просечната височина на столбовите изнесува h_{st}. Водот е снабден со заштитно јаже коешто ги штити фазните спроводници од директни удари на громот под заштитен агол α. Просечниот распон помеѓу столбовите од надземниот вод изнесува l. Водот е снабден со уреди за автоматско повторно вклучување (АПВ). Веројатноста за успешно дејствување на ова АПВ притоа изнесува $P_{АПВ}$ = 0,8. Другите податоци кои што се однесуваат на разгледуваниот случај се исти со оние од задачата Д.6. Тие се дадени во долната табела. Потребно е да се пресмета следното:

а) Просечниот годишен број на удари на громот во посматраниот надземен вод N_L:

б) Просечниот годишен број на удари на громот во столбовите од водот N_{st}, годишниот број на удари на громот во заштитното јаже N_{zj};

в) Просечниот годишен број на удари на громот во столбовите од водот N_{st};

г) Колкава е веројатноста P_0 да дојде до прескок на изолацијата при удар на гром во столб. Пресметките да се направат со помош на моделот од задачата Д.6, сметајќи дека челото на струјниот бран T_C е познато и дека до прескок доаѓа на челото од импулсниот пренапон, во t = T_C, под услов амплитудата на струјата на громот I_m да биде поголема од вредноста на струјата $I_{m.\min}$, пресметана во задачата Д.6.

д) Колкава е веројатноста P_{zj} да дојде до прескок од заштитното јаже кон фазниот спроводник на најблиската фаза при удар на громот во средината од распонот ако растојанието помеѓу нив изнесува s = 5,2 m. Коеф. на спрега з. јаже – спроводник е k_{zp} = 0,25.

ѓ) Колкава е веројатноста P_d да дојде до пробив на громобранската заштита и до директен удар на громот во фазните спроводници. Колкав е во тој случај и просечниот број на директни удари во фазните спроводници N_d во текот на годината;

е) Колкав е просечниот годишен број на испади N_{isp} на водот под дејство на атмосферските пренапони ако се земат предвид само испадите поради повратните прескоци при удар на громот во столбовите од надземниот вод. Колкав ќе биде бројот на испади N'_{isp} на водот ако уредот за АПВ не функционира.

Бројни вредности:

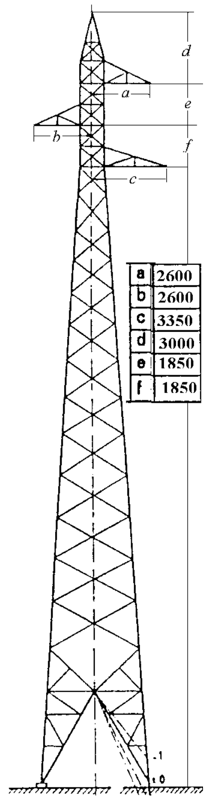
ред. број	Презиме	Име	Индекс	n /	d m	l m	T_d денови	α (°)	T_C μs	h_{st} m	R_{st} Ω
1	Бурески	Игор	076/2005	6	0,876	250	30	25	1.2	22	12
2	Карадаков	Сашко	378/2002	7	1,022	275	30	30	1.2	22	13
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	8	1,168	300	30	35	1.2	22	14
4	Николовски	Павле	313/2004	6	0,876	250	35	25	1.5	25	15

5	Стојановска	Љупка	350/2002	**7**	**1,022**	**275**	**35**	**30**	**1.5**	**25**	**10**
6	Стрезовска	Николина	094/2005	**8**	**1,168**	**300**	**35**	**25**	**1.5**	**25**	**11**
7	Тасева	Станка	284/2004	**6**	**0,876**	**250**	**40**	**30**	**2.0**	**30**	**12**
8	Тодоров	Сашко	355/2002	**7**	**1,022**	**275**	**40**	**35**	**2.0**	**30**	**13**
9				**8**	**1,168**	**300**	**40**	**25**	**2.0**	**30**	**14**

Задача Д.9. Се посматра челично-решеткаст столб тип S, производ на ЕМО-Охрид, наменет за 110 kV надземни водови (слика Д.9.1). Основната височина на столботот изнесува $H_{\text{ст.осн.}}$. Вкупната височина на столбот h_{st} се добива со додавање на главата на столбот, т.е.: $h_{st} = H_{\text{ст.осн.}} + d + e + f$.

Столбот е снабден со висечки изолаторски вериги составени од по n капести изолатори од типот U160 BS (K 146/280). Распонот помеѓу два секои соседни столба изнесува L. Импулсната отпорност на распростирање на заземјувањето на столботот е R_{st}.

Со помош на програмата "Udar vo stolb.xls" да се изврши анализа на временскиот тек на преодниот процес којшто се јавува при удар на гром во врвот од столбот. Да се скицира обликот на напонот $U_{iz}(t)$ што ја напрега изолацијата во текот на првите 10 μs од преодниот процес. Да се скицираат и обликот на струјата во столбот како и струјата во заштитното јаже во првите 10 μs. Во анализите со помош на програмата "Udar vo stolb.xls" ударот на громот се моделира со инјекција во врвот од столбот на струен импулс со косо чело, со зададена стрмнина S, и рамен грб со бесконечно траење (слика Д.6.1). Времето на челото T_C се смета за познато, т.е. зададено. Амплитудата на струјата на громот во тој случај изнесува $I_m = S \cdot T_C$. Колква е минималната струја $I_{m.\min}$ која при зададената стрмнина S ќе предизвика прескок на изолацијата.

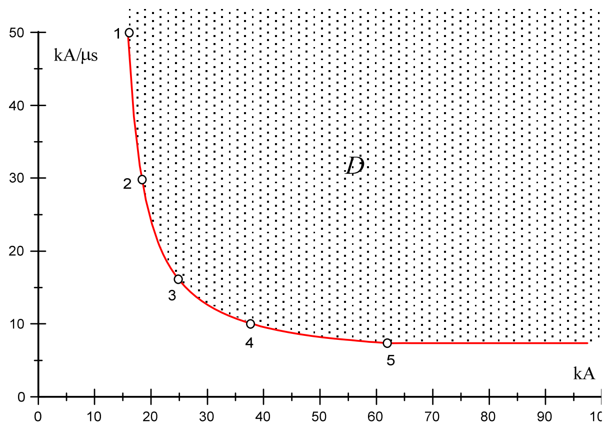


Слика Д.9.1

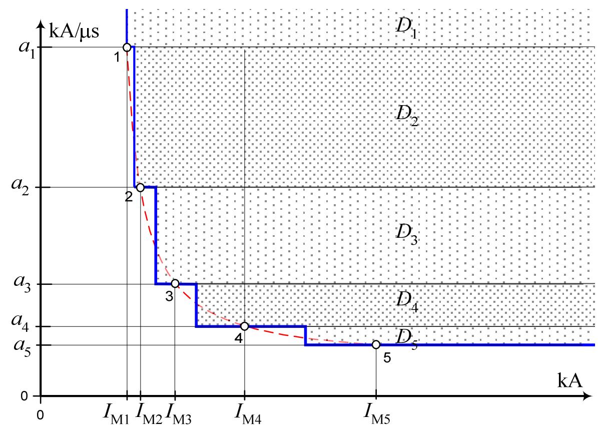
Бројни вредности:

ред. број	Презиме	Име	Индекс	n	d	L	$H_{столб.осн.}$	S	T_C	h_{st}	R_{st}
				/	m	m	m	(kA/μs)	μs	m	Ω
1	Буревски	Игор	076/2005	**6**	**0,876**	**250**	**16.8**	**20**	**1.2**	**24.5**	**12**
2	Карадаков	Сашко	378/2002	**7**	**1,022**	**275**	**17.8**	**25**	**1.2**	**25.5**	**13**
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	**8**	**1,168**	**300**	**18.8**	**30**	**1.2**	**26.5**	**14**
4	Николовски	Павле	313/2004	**6**	**0,876**	**325**	**19.8**	**20**	**1.5**	**27.5**	**15**
5	Стојановска	Љупка	350/2002	**7**	**1,022**	**250**	**20.8**	**25**	**1.5**	**28.5**	**10**
6	Стрезовска	Николина	094/2005	**8**	**1,168**	**275**	**22.8**	**30**	**1.5**	**30.5**	**11**
7	Тасева	Станка	284/2004	**6**	**0,876**	**300**	**24.8**	**15**	**2.0**	**32.5**	**12**
8	Тодоров	Сашко	355/2002	**7**	**1,022**	**325**	**16.8**	**20**	**2.0**	**24.5**	**13**
9				**8**	**1,168**	**250**	**17.8**	**25**	**2.0**	**25.5**	**14**

Задача Д.10. Се посматра случајот од задачата Д.9. Со помош на програмата "Udar vo stolb.xls" да се определи кривата на опасни параметри на зададениот столб. Резултатот да се прикаже табеларно (со 5 точки) и графички. Потоа со определената крива да се пресмета веројатноста за пресок P_0 при директен удар на гром во столботот.



Слика Д.10.1. Крива на опасни параметри (о.п.)



Слика Д.10.2. Апроксимација на кривата на о.п.

Напатствие: Веројатноста P0 се добива со нумеричка интеграција на интегралот (9.50):

$$P_0 = \iint_D p(I,S)\cdot dI\cdot dS\,,$$

каде што D е областа на интеграција, т.е. областа означена со штрафирани линии, десно од кривата на опасни параметри (слика Д.10.1). Овој интеграл нумерички се пресметува приближно, како сума од парцијалните интеграли кога областа на интеграција D се дели на 5 подобласти $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ и $D5$, како што е тоа направено на сликата Д.10.2. Притоа се смета дека променливите I и S се независни и дека подлежат на експоненцијалниот закон на распределба. Во тој случај бараната верјатност P0 ќе ја добиеме, во согласност со изразот (9.52), како сума од 5 членови (подинтеграли):

$$P_0 \approx P(I \ge I_{\mathrm{M1}})\cdot P(a > a_1) + \sum_{i=1}^{4} P(I \ge I_{m.i})\cdot P(a_{i+1} \le a < a_i)\cdot(a_i - a_{i+1})\,,$$

каде што $I_{\text{ср}.i}$ е средна вредност од струите $I_{\mathrm{M}i}$ и $I_{\mathrm{M}i+1}$, т.е. $I_{\text{ср}.i} = (I_{\mathrm{M}i}+I_{\mathrm{M}i+1})/2$.

Со оглед на горе кажаното произлегува дека бараната веројатнпст P_0 во случајов ќе биде:

$$P_0 \approx e^{-\frac{I_{\mathrm{M1}}}{26{,}1}}\cdot e^{-\frac{a_1}{15{,}65}} + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\frac{I_{\text{ср}.i}}{26{,}1}}\cdot\left(e^{-\frac{a_{i+1}}{15{,}65}} - e^{-\frac{a_i}{15{,}65}}\right)\cdot(a_i - a_{i+1})\,;\;\; n = \text{број на точки на кривата }\;(n=5)\,.$$

Напомена: Кривата на опасни параметри може да се добие и со примена на постапката опишана во учебникот (точка 9.5.3.6 на страна 148?). Најнапред се определува функцијата $\varphi(t)$, т.е. одзивот $u_{iz}(t)$ за единечна акција ($S = 1$). За таа цел во првиот работен лист (Vlez) во келијата B17 се става вредност 1. Потоа во Chart-тот Grafik се воведува уште една крива (trend line) која претставува полином од втор или трет ред со кој може да се опише кривата $u_{iz}(t)$. Така, на пример, ако кривата $u_{iz}(t)$ ја опишеме со полином од трет ред, ќе добиеме:

$u_{iz}(t) = 0.4064*t^3 - 13.782*t^2 + 224.47*t + 209.7$

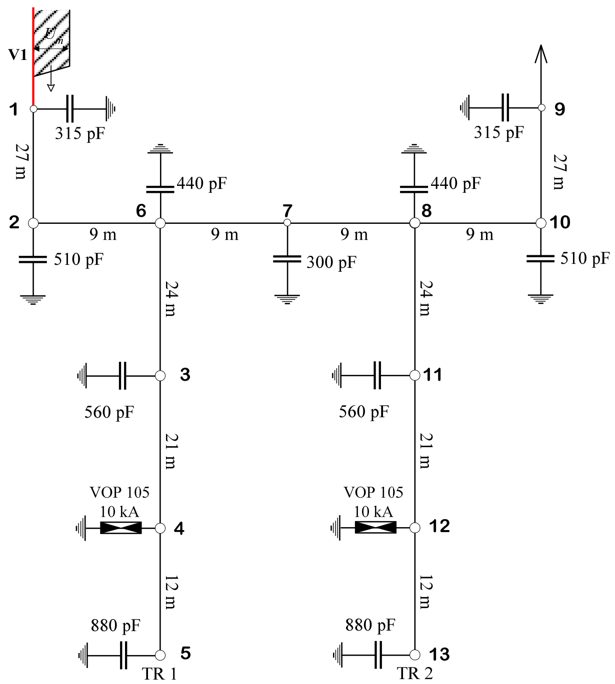
или $\varphi(t) \equiv u_{iz}(\mathrm{t}) = A_3\cdot t^3 + A_2\cdot t^2 + A_1\cdot t + A_0$.

Сега обликот на кривата $U_{iz}(t)$ за произволна стрмнина S ќе се добие (приближно) со помош на изразот (9.49) (во кој се зема дека е компонентата од работниот напон $U_P = 0$):

$U_{iz}(t) = S\cdot\varphi(t) = S\cdot(A_3\cdot t^3 + A_2\cdot t^2 + A_1\cdot t + A_0)$.

Понатаму проблемот на определувањето на пресекот на кривата $U_{iz}(t)$ и кривата на волт-секундната карактеристика $U50\%(t)$ се сведува на решавање на еден нелинеарен систем од две равенки со две непознати кој може лесно да се реши итеративно, на пример, со Њутоновата тангентна метода.

Задача Д.11. На сликата Д.11.1 е прикажана заменската шема од една трансформаторска станица, формирана заради анализа на брановите преодни процеси во неа при упад на бран од атмосферско потекло по некој од приклучните водови. Упадниот бран има косо чело и рамен грб со позната амплитуда U_m и време на чело T_C. Упаѓа во постројката по приклучниот вод V1.



Слика Д.11.1. Еквивалентна шема на ТС 110/10 kV/kV "Струмица 1"

Со помош на програмата "RP Strumica.xls" да се направи анализа на временските текови на напоните во сите точки од постројката при упад на зададениот упаден бран Врз основа на таквите анализи да се утврдат максималните вредности на напоните што ќе се појават во поедините точки од постројката со цел да се утврди дали ќе дојде до пробив или прескок на некој од апаратите во постројката или на некој од енегретските трансформатори, приклучени во точките 5 и 13. Одводниците се од типот VOP 105/10 kA. За нив се познати следните карактеристики:

$U_{reag} = 342$ kV; $U_{od} = C \cdot i_{od}^{\alpha}$; $C = 217{,}5$ kV; $\alpha = 0{,}1525$.

Резултатите од пресметките на максималните вредности на пренапоните, $U_{i.\max}$; i=1,15), да се сместат во табелата Д.11.1.

Табела Д.11.1. Резултати од пресметките на темените вредности на напоните во постројката

Точка i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{i.\max}$ (kV)															

Да се прикажат (скицираат) зависностите $U_4(t)$ и $U_5(t)$ на напоните на одводникот и енергетскиот трансформатор TR 1 за првите 5 μs од преодниот процес.

Истите анализи да се повторат и за случајот кога класичните Si-C одводници тип VOP 105/10 kA во постројката се заменат со ZnO одводници чиј што напон на реагирање е $U_{reag}=0$ а нивната волт-амперна карактеристика $U_{od} = C \cdot i_{od}^{\alpha}$ ги има следните параметри: C=260 kV; $\alpha = 0{,}03$.

Пробив односно прескок на изолацијата кај поедините апарати во постројката (разделувачи, прекинувачи, мерни трансформатори и сл.) настанува ако напонот $U(t)$ на апаратот во било кој момент го надмине нивниот подноислив импулсен напон кој изнесува $U_{подн.} = 550$ kV. За трансформаторите TR 1 и TR 2 треба да се применува критериумот според кривата $U_d(t)$ од сл. 10.1, каде што $U_{doz} = 450$ kV.

Бројни вредности:

ред. број	Презиме	Име	Индекс	U_m (kV)	Tc µs
1	Бурески	Игор	076/2005	**550**	**0.25**
2	Карадаков	Сашко	378/2002	**600**	**0.30**
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	**650**	**0.35**
4	Николовски	Павле	313/2004	**700**	**0.35**
5	Стојановска	Љупка	350/2002	**580**	**0.05**
6	Стрезовска	Николина	094/2005	**620**	**0.15**
7	Тасева	Станка	284/2004	**650**	**0.25**
8	Тодоров	Сашко	355/2002	**680**	**0.50**
9				**725**	**1.00**
10				**575**	**0.50**

Задача Д.12. Се посматра удар на гром во столб од приклучниот надземен вод V1 кој што се наоѓа на растојание x од постројката од претходната задача. Отпорноста на распростирање на заземјувачот на столбот изнесува R_{st} , а амплитудата на струјата на громот е I_m. На местото на ударот на громот доаѓа до појава на повратен прескок после кое на спроводникот каде што настанал прескокот се формира напонски бран со бесконечно стрмно чело и со амплитуда $U_m = R_{st} \cdot I_m$. Познато е уште и следното: $Z = 440\ \Omega$; $h_{pr.sr} = 10$ m. Да се пресмета:

а) Колкаво ќе биде челото на бранот кој по изминатиот пат од x метри ќе дојде на влезот на постројката. Дали овој бран ќе биде опасен за изолацијата на трансформаторот TR 1;

б) На првиот столб од водот V1, пред самиот влез во постројката, се поставува заштитно искриште со снижено изолационо ниво, чија што волт-секундна карактеристика може да се опише со следната релација:

$$U_{50\%}(t) = K_1 + K_2 / t^{0,75} \text{ (kV)}; \quad U_{50\%} \text{ (kV)}; \quad t\ (\mu\text{s}).$$

Да се утврди дали ќе дојде до отсекување на упадниот бран и кога ќе се случи тоа. Дали таквиот отсечен бран ќе биде опасен за изолацијата на на трансформаторот TR 1;

в) Да се даде приказ на напоните $U_4(t)$ и $U_5(t)$ на одводникот и на енергетскиот трансформатор TR 1 за првите 5 µs од преодниот процес во случајот под б).

Сите пресметки да се направат со помош на програмата "RP Strumica.xls".

Бројни вредности:

ред. број	Презиме	Име	Индекс	x m	R_{st} Ω	I_m kA	K_1 kV	K_2 kV
1	Бурески	Игор	076/2005	**360**	**12**	**85**	**250**	**500**
2	Карадаков	Сашко	378/2002	**360**	**13**	**80**	**265**	**545**
3	Миловановиќ	Марио	258/2005	**660**	**14**	**75**	**275**	**550**
4	Николовски	Павле	313/2004	**660**	**15**	**70**	**280**	**600**
5	Стојановска	Љупка	350/2002	**960**	**10**	**85**	**250**	**500**
6	Стрезовска	Николина	094/2005	**960**	**11**	**82**	**265**	**520**
7	Тасева	Станка	284/2004	**60**	**12**	**78**	**240**	**525**
8	Тодоров	Сашко	355/2002	**330**	**13**	**75**	**250**	**500**
9				**600**	**14**	**72**	**280**	**560**
10				**870**	**15**	**65**	**265**	**600**