

Vežbe TVN2 - Zadaci

Ispitivanje visokim naizmeničnim naponom industrijske učestanosti

Ispitni transformatori su monofazni transformatori prilagođeni laboratorijskim ispitivanjima, kod kojih je veliko rasipanje postignuto zahvaljujući otvorenom magnetnom kolu (u stanju su da izdrže kratak spoj na sekundarnoj strani relativno duže vreme). Parametri ispitnog transformatora su:

- primarni napon od 0.22 kV do 10 kV,
- sekundarni napon od 100 kV do 750 kV i
- reaktansa rasipanja u opsegu od 2 do 15 %.

Snaga ispitnog transformatora se određuje na osnovu kapacitivnosti objekta koji se ispituje i vrednosti ispitnog napona U_{isp} . Kapacitivnosti ispitivanih objekata su:

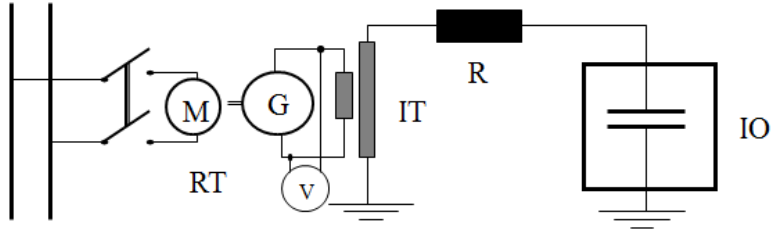
- izolatori: od 35 pF do 60 pF,
- provodni izolatori: od 150 pF do 250 pF,
- strujni transformatori: od 200 pF do 400 pF,
- energetske transformatori: od 600 pF do 4000 pF i
- visokonaponski kablovi: od 150 pF/m do 300 pF/m.

1. Za ispitivanje provodnih izolatora naizmeničnim naponom industrijske učestanosti korišćen je ispitni transformator sa parametrima $x_t=10\%$, $S_{nt}=25$ kVA, $m=3/100$ kV/kV koji se napaja pomoću motor-generatorske grupe sa parametrima $x_g=40\%$, $S_{ng}=25$ kVA, $U_n=3$ kV.

a) Odrediti broj provodnih izolatora koji se mogu istovremeno ispitivati, a da transformator ne bude preopterećen. Kapacitivnost jednog provodnog izolatora je $C_1=195$ pF. Ispitni napon iznosi 100 kV.

b) Odrediti otpornost zaštitnog otpornika koji treba priključiti na visokonaponskoj strani transformatora da bi se mogao očitavati napon na niskonaponskoj strani i da se pad napona u sistemu kompenzuje.

c) Proceniti da li se korišćenjem zaštitnog otpornika struja kratkog spoja ograničava na vrednost od 1 A.

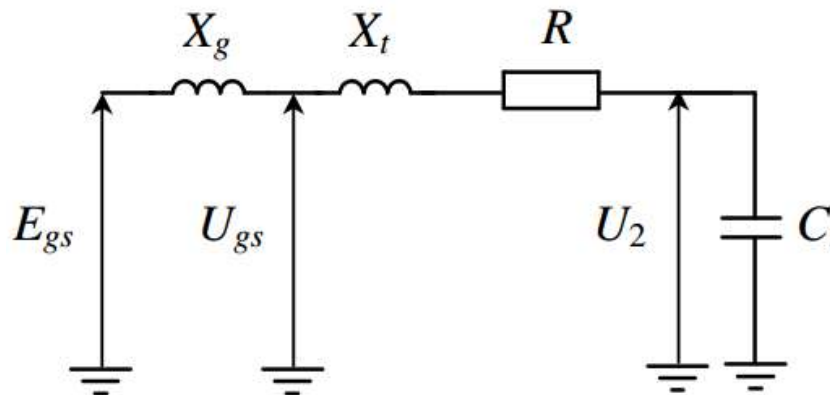


Slika 1. Napajanje ispitnih transformatora iz motor-generatorske grupe

Na Slici 1 su:

- IO - ispitivani objekat,
- RT-regulacioni transformator,
- IT -ispitni transformator i
- R - otpornik za ograničenje struje kratkog spoja u slučaju preskoka.

Rešenje:



Slika 2. Zamenska šema

a) Ako istovremeno ispitujemo n provodnih izolatora, njihova ekvivalentna kapacitivnost je jednaka kapacitivnosti paralelne veze $C = nC_1$. Snaga te paralelne veze kondenzatora treba da je jednaka nazivnoj snazi ispitnog transformatora:

$$S_{nt} = S_c = \frac{U_2^2}{X_c} = \frac{U_2^2}{\frac{1}{\omega n C_1}} = U_2^2 \omega n C_1$$

$$nC_1 = \frac{S_{nt}}{U_2^2 \omega} = \frac{25 \cdot 10^3}{2\pi 50 \cdot (100 \cdot 10^3)^2} = 7,958 nF \Rightarrow n = \frac{7,958 \cdot 10^{-9}}{195 \cdot 10^{-12}} \approx 40$$

b) Reaktansu transformatora i generatora treba svesti na visokonaponsku stranu ($U_2 = 100$ kV):

$$X_t = \frac{x_t}{100} \frac{U_2^2}{S_{nt}} = \frac{10}{100} \frac{10^{10}}{25 \cdot 10^3} = 40000 \Omega$$

$$\underline{U}_{gs} - (R + jX_t)\underline{I} - \underline{U}_2 = 0$$

$$\underline{I} = j\omega n C_1 \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_{gs} = (R + jX_t) j\omega n C_1 \underline{U}_2 + \underline{U}_2 = \underline{U}_2 (1 - X_t \omega n C_1 + jR \omega n C_1)$$

$$\frac{U_{gs}}{U_2} = \sqrt{(1 - X_t \omega n C_1)^2 + (R \omega n C_1)^2} = 1$$

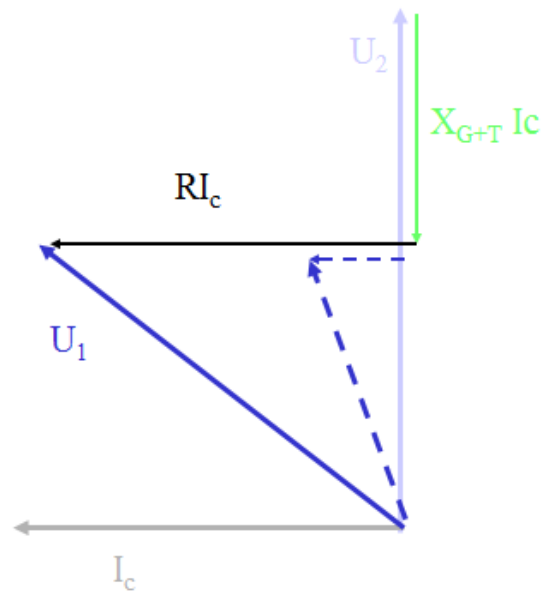
$$\Rightarrow R = \frac{1}{\omega n C_1} \sqrt{\left(\frac{U_{gs}}{U_2}\right)^2 - (1 - X_t \omega n C_1)^2}$$

$$R = \sqrt{\frac{X_t(2 - \omega n C_1 X_t)}{\omega n C_1}} = 174350 \Omega$$

c)

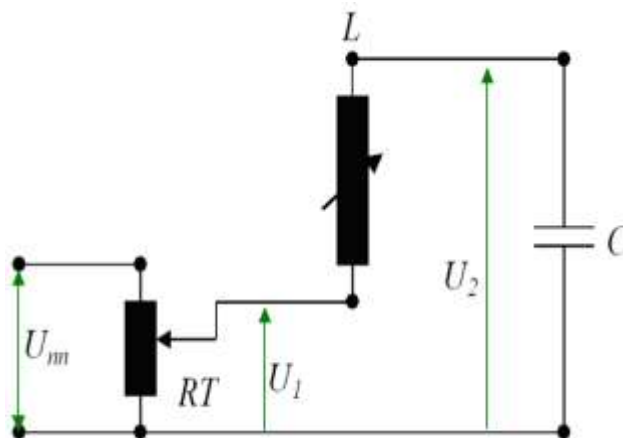
$$X_g = \frac{x_g}{100} \frac{U_2^2}{S_{ng}} = \frac{10}{100} \frac{10^{10}}{25 \cdot 10^3} = 160000 \Omega$$

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + (X_t + X_g)^2}} = 0,377 \text{ A} < 1 \text{ A}$$



2. Serijskim rezonantnim kolom ispituje se visokonaponski kabl dužine 2 m i kapacitivnosti 200 pF. Napon na sekundaru regulacionog transformatora je 5 kV, a napon na ispitivanom kabl se meri elektrostatičkim voltmetrom i ima vrednost 25 kV. Odrediti induktivnost rezonantnog kola. Odrediti silu koja deluje u elektrostatičkom voltmetru ako su dimenzije njegovih elektroda $S=10^{-2} \text{ m}^2$ i $d=5 \text{ cm}$.

Rešenje:



$$U_2 = U_1 - j\omega L I_C$$

$$I_C = j\omega C U_2$$

$$L = \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) / \omega^2 C = \frac{1 - \frac{5}{25}}{314^2 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} = \frac{0.8}{39,438410^{-6}} = 20,28 \text{ kH}$$

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{S}{d^2} U_2^2 = 0,5 \cdot 8,852 \cdot 10^{-12} \frac{10^{-2}}{25 \cdot 10^{-4}} 25^2 \cdot 10^6 = 1,1 \text{ N}$$

Udarni naponski generator

3. Za poznate parametre udarnog naponskog generator (Slika 1.) odrediti vreme čela, T_s , i začelja, T_r , njegovog naponskog talasa. Proveriti da li se dobijena vremena slažu sa dozvoljenim tolerancijama u odnosu na standardni atmosferski udarni talas. Parametri udarnog naponskog generator su:

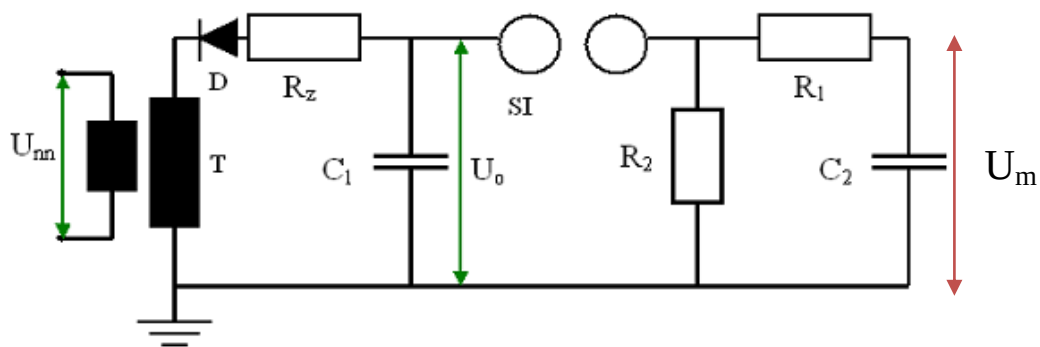
$U_0 = 10 \text{ kV}$ – napon punjenja kondenzatora,

$R_1 = 35 \Omega$ – otpornik koji definiše čelo talasa,

$R_2 = 300 \Omega$ - otpornik koji definiše začelje talasa,

$C_1 = 200 \text{ nF}$ - opteretni kondenzator koji se puni i

$C_2 = 10,8 \text{ nF}$ – rasteretni kondenzator koji definiše čelo talasa.



Slika 1. Šema jednostepenog udarnog naponskog generatora

Rešenje:

Maksimalna vrednost udarnog napona za šemu na slici ima vrednost:

$$U_m = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 10 \cdot 10^3 \frac{200}{200 + 10,8} = 9.487666 kV$$

Vreme čela je:

$$T_s = 3,243 \cdot R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 3,243 \cdot 35 \cdot \frac{200 \cdot 10,8}{200 + 10,8} \cdot 10^{-9} = 1,1630493 \mu s$$

$$T_s \approx R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, C_1 \gg C_2 \rightarrow T_s \approx R_1 \cdot C_2 = 35 \cdot 10,8 \cdot 10^{-9} = 0,378 \mu s$$

Vreme začelja je:

$$T_r = 0,693 \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2) = 0,693 \cdot 300 \cdot (200 + 10,8) \cdot 10^{-9} = 43,82532 \mu s$$

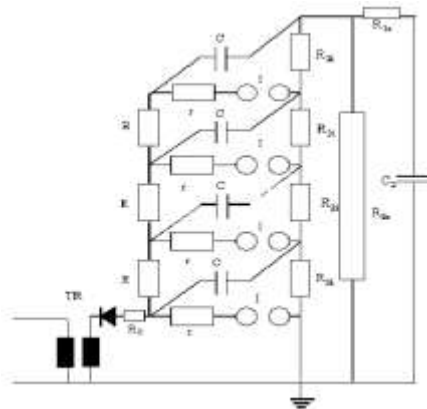
$$C_1 \gg C_2 \rightarrow T_r \approx R_2 \cdot C_1 = 300 \cdot 200 \cdot 10^{-9} = 60 \mu s$$

Standardni atmosferski talas 1,2/50 μs ima dozvoljenu toleranciju za čelo $T_\epsilon = 1,2 \pm 0,36 \mu s$, i začelje $T_z = 50 \pm 10 \mu s$:

$$p_{s\%} = \left| \frac{1,1630493 - 1,2}{1,2} \right| \cdot 100\% = 3,079225\% \rightarrow 0,036950 \mu s < 0,36 \mu s$$

$$p_{r\%} = \left| \frac{43,82532 - 50}{50} \right| \cdot 100\% = 12,34936\% \rightarrow 6,17468 \mu s < 10 \mu s$$

4. Jednostepeni udarni generatori mogu da proizvedu napon koji je malo manji od temene vrednosti izlaznog napona iz transformatora, napona punjenja. Za dobijanje vrlo visokih udarnih napona koristi se veći broj kaskada od kondenzatora, otpornika i iskrišta, koji čine višestepeni udarni generator (Slika 2).



Slika 2. Šema višestepenog udarnog generatora

Za šemu sa Slike 2. poznati parametri su:

$U_0=35\text{kV}$ – napon punjenja kondenzatora,

$C = 10\mu\text{F}$ - kondenzatori punjenja udarnog generatora,

$r=10\Omega$ - interni otpornici unutar svakog stepena koji definišu čela talasa,

C_2 - kondenzator koji definiše čelo talasa,

R_{1e} - eksterni otpornik koji definiše čelo talasa zajedno sa internim otpornicima r ,

$R_{2e}=1\text{k}\Omega$ - otpornik koji definiše začelje talasa,

$R_{2i} = 2,5\text{M}\Omega$ - otpornici koji sprečavaju rasterećivanje kondenzatora C unutar kontura sa iskrištima i definišu začelje talasa i

R – otpornici reda $\text{M}\Omega$ koji sprečavaju rasterećivanje kondenzatora C unutar kontura sa iskrištima.

Potrebno je odrediti broj stepeni, n , vrednost rasteretnog kondenzatora, C_2 , i vrednost rasteretnog otpora čela, R_{1e} , tako da izlazni naponski talas višestepenog udarnog naponskog generator bude sklopni udarni talas sa vremenom čela $T_s=250\pm 50\text{ }\mu\text{s}$, i začelja $T_r=2500\pm 1500\text{ }\mu\text{s}$ i amplitudom napona 32kV .

Rešenje:

U zadatku su nepoznate tri veličine, a poznata su tri parametra udarnog naponskog talasa. Tri jednačine sa tri nepoznate imaju oblik:

$$U_m = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 35 \cdot 10^3 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 32\text{kV}$$

$$T_s = 3,243 \cdot R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 250\mu\text{s}$$

$$T_r = 0,693 \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2) = 2500\mu\text{s}$$

U prethodne tri jednačine neophodno je uvrstiti formule koje važe za parameter višestepenog udarnog naponskog generator:

$$C_1 = \frac{C}{n}$$

$$R_1 = n \cdot r + R_{1e}$$

$$R_2 = \frac{n \cdot R_{2i} \cdot R_{2e}}{n \cdot R_{2i} + R_{2e}}$$

Nakon uvrštavanja sistem jednačina ima oblik:

$$n \cdot C_2 = 0,091 \cdot C = 0,91 \mu F$$

$$(n \cdot r + R_{1e}) \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 77,08 \mu s$$

$$R_{2i} \gg R_{2e} \rightarrow R_2 = R_{2e} \rightarrow \frac{C}{n} + C_2 = \frac{3607,504}{R_{2e}} = 3,607504 \mu F \rightarrow 10 + n \cdot C_2 = n \cdot 3,607504$$

Prva jednakost se koristi u trećoj jednakosti i na taj način se dobija:

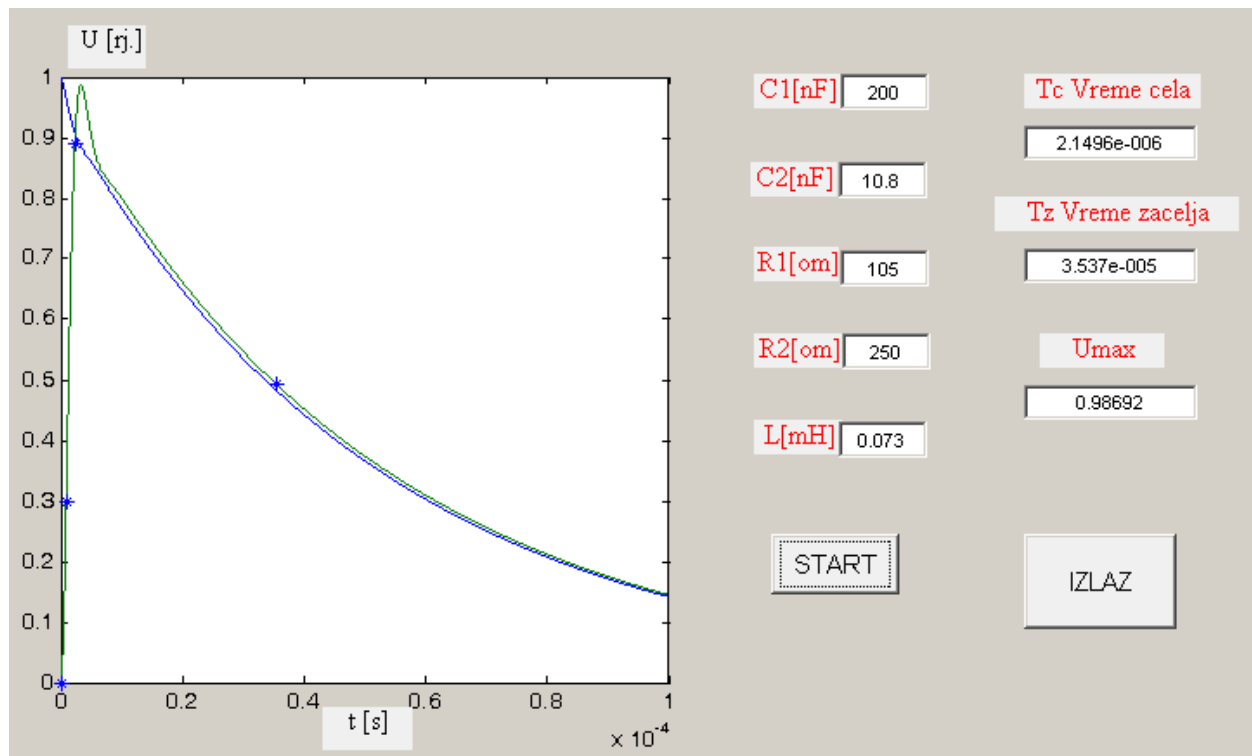
$$10 + 0,91 = n \cdot 3,607504 \rightarrow n = 3,024 \rightarrow n = 4$$

$$C_2 = \frac{0,91 \mu F}{4} = 0,2275 \mu F$$

$$C_1 = 2,5 \mu F$$

Izraz iz koga se izračunava nepoznata otpornost glasi:

$$(4 \cdot 10 + R_{1e}) \cdot \frac{2,5 \cdot 0,2275}{2,7275} = 77,08 \rightarrow R_{1e} = 329,645 \Omega$$



5. Generator udarnog napona koji se sastoji od dva stepena služi za ispitivanje koaksijalnog kabla, čiji su poluprečnici 7cm i 15cm, a dužina 5m. Poznati su kapaciteti čela $C=10nF$. Potrebno

je odrediti otpor čela i otpor začelja kao i koeficijent iskorišćenja generatora. Udarni naponski talas je standardnog oblika 1,2/50μs.

Rešenje:

Kapacitivnost ispitivanog objekta je:

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot l \cdot \varepsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}}{\ln \frac{15}{7}} = \frac{278,0156}{0,7621} \cdot 10^{-12} = 0,365 nF$$

Kapacitivnost čela za dvostepeni generator ima duplo manju vrednost:

$$C_1 = \frac{C}{2} = 5 nF$$

Traženi otpori se izračunavaju iz formula za vremena čela i začelja:

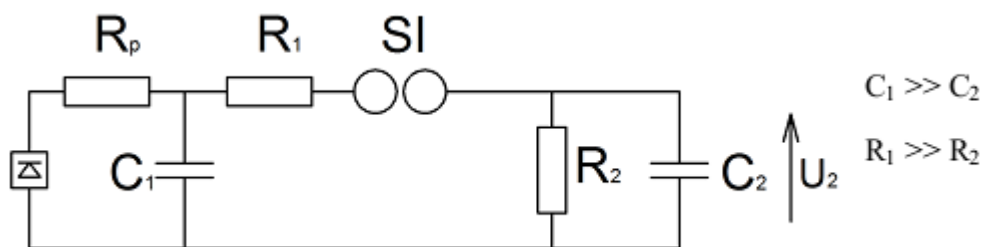
$$R_1 = T_s / (3,243 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}) = \frac{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (5 + 0,365) nF}{3,243 \cdot 5 \cdot 0,365 \cdot 10^{-12} nF} = 1,088 k\Omega$$

$$R_2 = T_r / (0,693 \cdot (C_1 + C_2)) = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot (5 + 0,365) \cdot 10^{-12}} = 13,448 k\Omega$$

Koeficijent iskorišćenja generatora je:

$$\eta = \frac{R_2 \cdot C_1}{(R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)} = \frac{13,448 k\Omega \cdot 5 nF}{14,536 k\Omega \cdot 5,365 nF} = 0,8622$$

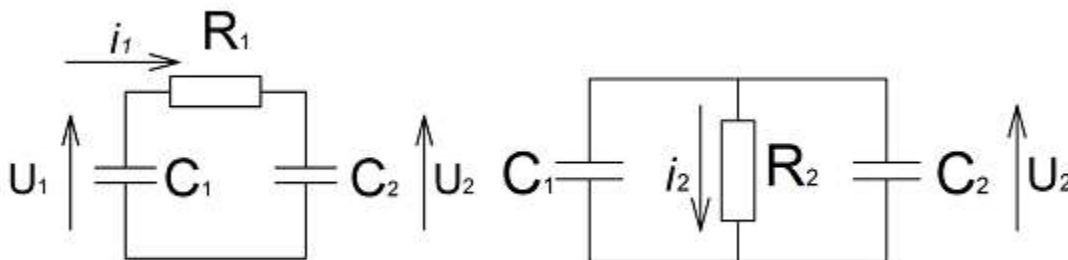
6. Za izgradnju jednosmernog udarnog naponskog generatora na raspolaganju su dva kondenzatora $C_1 = 7,2$ nF, i $C_2 = 0,5$ nF (C_2 obuhvata i kapacitivnost ispitnog objekta). Aktivna otpornost ispitnog objekta je beskonačna. Odrediti otpor koji je potrebno ubaciti u kolo da bi oblik talasa bio 1,2/50 μs/ μs.



Slika 3. Zamenska šema udarnog naponskog generatora

Rešenje:

Za ovaj prelazni proces, koji kratko traje, R_2 je beskonačno velik. C_1 se neznatno prazni u procesu punjenja C_2 . Posle toga obe kapacitivnosti se prazne preko R_2 . Ovo je drugi vremenski proces, ima dužu vremensku konstantu.



Slika 4. Pražnjenje opteretnog kondenzatora C_1 i rasteretnog kondenzatora C_2

$$T_1 \approx R_1 \cdot C_2$$

$$T_2 \approx R_2 \cdot C_1$$

Posmatrajući rasterećenje opteretnog kondenzatora mogu se napisati sledeći izrazi:

$$u_1 - R_1 \cdot i_1 - u_2 = 0$$

$$i_1 = -C_1 \cdot \frac{du_1}{dt}$$

$$i_1 = C_2 \cdot \frac{du_2}{dt}$$

$$u_1(t=0) = U_{10}$$

$$u_2(t=0) = 0$$

$$i_1 = -C_1 \cdot (pU_1 - U_{10})$$

$$i_1 = C_2 \cdot (pU_2 - 0)$$

$$C_1 \cdot pU_2 = -C_1 \cdot pU_1 + C_2 \cdot U_{10}$$

$$U_1 = \frac{1}{C_1 p} \cdot (C_1 \cdot U_{10} - C_2 \cdot pU_2) = \frac{U_{10}}{p} - \frac{C_2}{C_1} U_2$$

$$u_1 - R_1 \cdot i_1 - u_2 = 0 \rightarrow \frac{U_{10}}{p} - \frac{C_2}{C_1} U_2 - R_1 \cdot C_1 \cdot pU_2 - U_2 = 0$$

$$U_2 \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1} + R_1 \cdot C_1 \cdot p\right) = \frac{U_{10}}{p}$$

Izraz za napon na rasteretnom kondenzatoru, odnosno objektu ispitivanja je:

$$U_2 = \frac{U_{10}}{p} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{C_2}{C_1} + R_1 \cdot C_1 \cdot p)} = \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1}{(1 + pR_1 \cdot \frac{C_2 \cdot C_1}{C_1 + C_2})} \rightarrow$$

$$\rightarrow U_2(t) = \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_1 + C_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) h(t), T_1 = R_1 \cdot \frac{C_2 \cdot C_1}{C_1 + C_2} \approx R_1 \cdot C_2$$

Posmatrajući rasterećenje kondenzatora čela mogu se napisati sledeći izrazi:

$$R_2 \cdot i_2 - u_2 = 0$$

$$i_{21} = -(C_1 + C_2) \cdot \frac{du_2}{dt}$$

$$u_2(t=0) = U_m = \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_1 + C_2}$$

$$i_2 = -(C_2 + C_1) \cdot (pU_2 - \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_1 + C_2})$$

$$R_2 \cdot i_2 - u_2 = 0 \rightarrow -R_2 \cdot (C_2 + C_1) \cdot (pU_2 - \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_1 + C_2}) = U_2$$

$$U_2 = \frac{U_{10} \cdot C_1}{C_2 + C_1} \cdot \frac{1}{p + \frac{1}{R_2 \cdot (C_2 + C_1)}} \rightarrow$$

$$\rightarrow U_2 = U_m \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}, T_2 = R_2 \cdot (C_2 + C_1) \approx R_2 \cdot C_1$$

Vreme čela je vreme između vremenskih trenutaka u kojima je naposnki talas 30% i 90% vrednosti U_m . Rast napona se odvija u periodu rasterećenja kondenzatora C_1 pa važi:

$$0,3U_m = U_m(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}})$$

$$0,9U_m = U_m(1 - e^{-\frac{t_2}{T_1}})$$

$$\rightarrow 7 = e^{\frac{t_2 - t_1}{T_1}}$$

$$T_s = \frac{t_2 - t_1}{0,6} = \frac{T_1 \ln 7}{0,6} = \frac{R_1 C_2 \ln 7}{0,6} = 1,2 \cdot 10^{-6} \rightarrow R_1 = 740 \Omega$$

Vreme začelja je vreme između vremenskih trenutaka u kojima je naposnki talas 90% i 50% vrednosti U_m . Opadanje napona se odvija u periodu rasterećenja kondenzatora C_2 pa važi:

$$0,5U_m = U_m e^{\frac{t_3}{T_2}}$$

$$t_3 \approx T_r = T_2 \ln 2 = 0,693 \cdot R_2 C_1 \rightarrow R_2 = 10\Omega$$

7. Udarne naponski talas je definisan sledećim izrazom:

$$u(t) = 8 \cdot (e^{0,001 \cdot t} - e^{-0,325 \cdot t}) h(t) \quad [\text{kV}]$$

gde je vreme t izraženo u mikrosekundama. a) Odrediti tačne i približne vrednosti otpora koji su potrebni za izgradnju jednosmernog udarnog naponskog generatora kojim bi se dobio udarni napon ako su na raspolaganju kondenzatori kapacitivnosti $0,1 \mu\text{F}$ i 4 nF . b) Odrediti vreme čela i vreme začelja udarnog naponskog talasa.

Rešenje:

a)

$$T_1 = \frac{1}{0,324} = 3,077 \mu\text{s}$$

$$T_2 = \frac{1}{0,001} = 1000 \mu\text{s}$$

$$T_1 = R_1 \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow R_1 = \frac{T_1}{\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}} = 800\Omega$$

$$T_2 = R_2 \cdot (C_1 + C_2) \Rightarrow R_2 = \frac{T_2}{(C_1 + C_2)} = 9615,4\Omega$$

Približno:

$$T_1 \approx R_1 \cdot C_2 \Rightarrow R_1 = \frac{T_1}{C_2} = 769,23\Omega$$

$$T_2 \approx R_2 \cdot C_1 \Rightarrow R_2 = \frac{T_2}{C_1} = 10000\Omega$$

b)

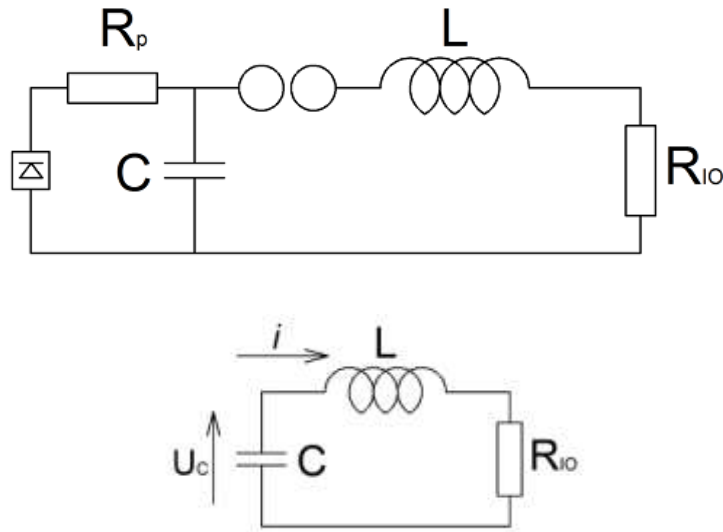
$$T_s = \frac{T_1 \cdot \ln 7}{0,6} = 9,979 \mu\text{s}$$

$$T_r = T_2 \ln 2 = 693,15 \mu\text{s}$$

Udarni strujni generator

8. Dati su parametri udarnog strujnog generatora: $U = 25 \text{ kV}$, $C = 58,2 \text{ } \mu\text{F}$, $L = 0,104 \text{ } \mu\text{H}$ (induktivnost celog objekta), $R_{\text{io}} = 8,6 \text{ m}\Omega$. Odrediti oblik i amplitudu udarnog strujnog talasa.

Rešenje:



Slika xx Principijalna šema u kojoj sferno iskiršte ima funkciju prekidača

Pri preskoku važi:

$$i = -C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

$$u_C = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i$$

$$u_C(0) = U_0$$

$$i(0) = 0$$

$$I(p) = -C \cdot (pU_C - u_C(0)) = -C \cdot (pU_C - U_0)$$

$$U_C(p) = L \cdot (pI(p) - i(0)) + R \cdot I(p) = L \cdot pI(p) + R \cdot I(p)$$

$$I(p) = -C \cdot (p(L \cdot pI(p) + R \cdot I(p)) - U_0) \Rightarrow$$

$$I(p) = \frac{C \cdot U_0}{p^2 LC + pRC + 1} = \frac{U_0}{L} \cdot \frac{1}{p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC}} = \frac{U_0}{L} \cdot \frac{1}{p^2 + 2\delta p + \omega^2} = \frac{U_0}{L} \cdot \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)}$$

$$p_{1,2} = \frac{-2\delta \pm \sqrt{4\delta^2 - 4\omega^2}}{2} = -\delta \pm j\sqrt{\omega^2 - \delta^2}$$

$$\delta = \frac{R}{2L} = \frac{8,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,104 \cdot 10^{-6}} = 41,346 \cdot 10^3 \text{ 1/s}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,104 \cdot 10^{-6} \cdot 58,2 \cdot 10^{-6}}} = 41,464 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

$$p_1 = -\delta + j\sqrt{\omega^2 - \delta^2} = -\delta + j\alpha\omega$$

$$p_2 = -\delta - j\sqrt{\omega^2 - \delta^2} = -\delta - j\alpha\omega$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{41,346^2}{41,464^2}} = 0,995$$

$$T_C = \frac{1}{\delta} = 21,19 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$I(p) = \frac{U_0}{Lp_1p_2} \frac{1}{\left(\frac{p}{p_1} - 1\right)\left(\frac{p}{p_2} - 1\right)} = \frac{U_0}{Lp_1p_2} \frac{1}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)} \rightarrow$$

$$\rightarrow i(t) = \frac{U_0}{Lp_1p_2} \frac{e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2} = \frac{U_0}{L} \frac{e^{p_1t} - e^{p_2t}}{p_1 - p_2} =$$

$$i(t) = \frac{U_0}{L} \frac{e^{-\delta t} (\cos(\alpha\omega t) + j\sin(\alpha\omega t)) - e^{-\delta t} (\cos(\alpha\omega t) - j\sin(\alpha\omega t))}{-\delta + j\alpha\omega - (-\delta - j\alpha\omega)}$$

$$i(t) = \frac{U_0}{L} \frac{e^{-\delta t} 2j\sin(\alpha\omega t)}{2j\alpha\omega} = \frac{U_0}{\alpha\omega L} e^{-\delta t} \sin(\alpha\omega t)$$

Ne mora da se zna da se izvede do kraja izraz ali da se zna princip i formula za udarni talas.

Talas ima izgled prigušene sinusoide! Prva amplituda je maksimum udarnog talasa u momentu:

$$t_m = \frac{T}{4} = \frac{\frac{2\pi}{\alpha\omega}}{4} = \frac{\pi}{2\alpha\omega} = 3,88 \mu\text{s}$$

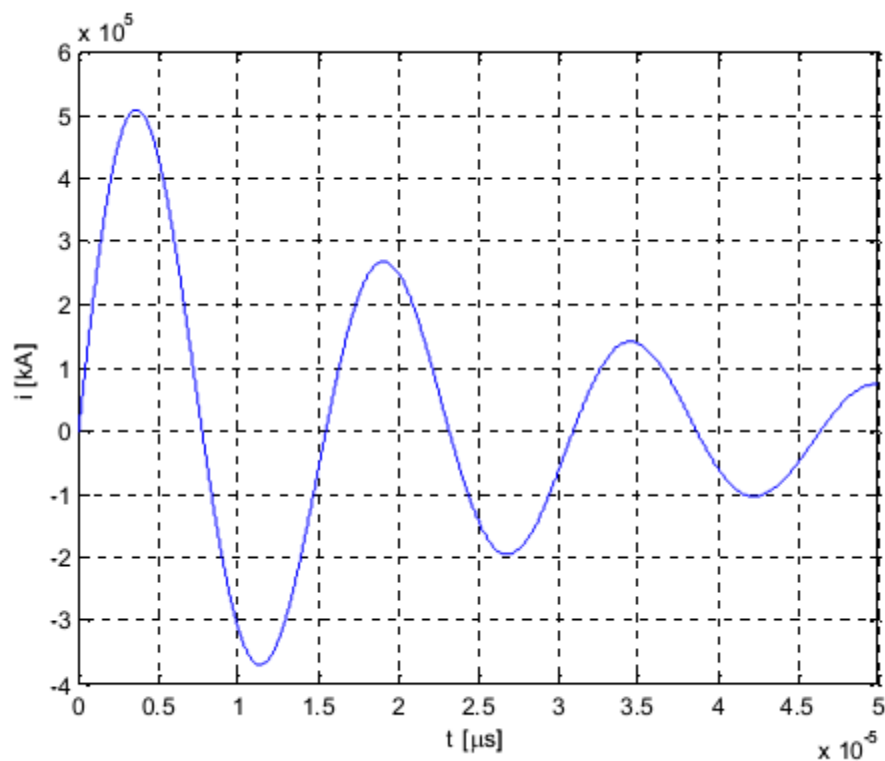
$$I_m = \frac{U_0}{\alpha\omega L} e^{-\delta t_m} = \frac{25 \cdot 10^3}{0,995 \cdot 406,464 \cdot 10^3 \cdot 0,104 \cdot 10^{-6}} e^{-41,346 \cdot 10^3 \cdot 3,88 \cdot 10^{-6}} = 506,28 \cdot 10^3 \text{ A}$$

$$i(t) = 594,37 \cdot 10^3 \cdot e^{-41,346 \cdot 10^3 \cdot t} \cdot \sin(406,464 \cdot 10^3 \cdot t)$$

$t(\mu s)$	0,1	0,2	0,3	0,41	2,52	6,3	6,4	6,32
$i(kA)$	24,05	47,87	71,41	50,94	457,56	251,36	234,63	248,04

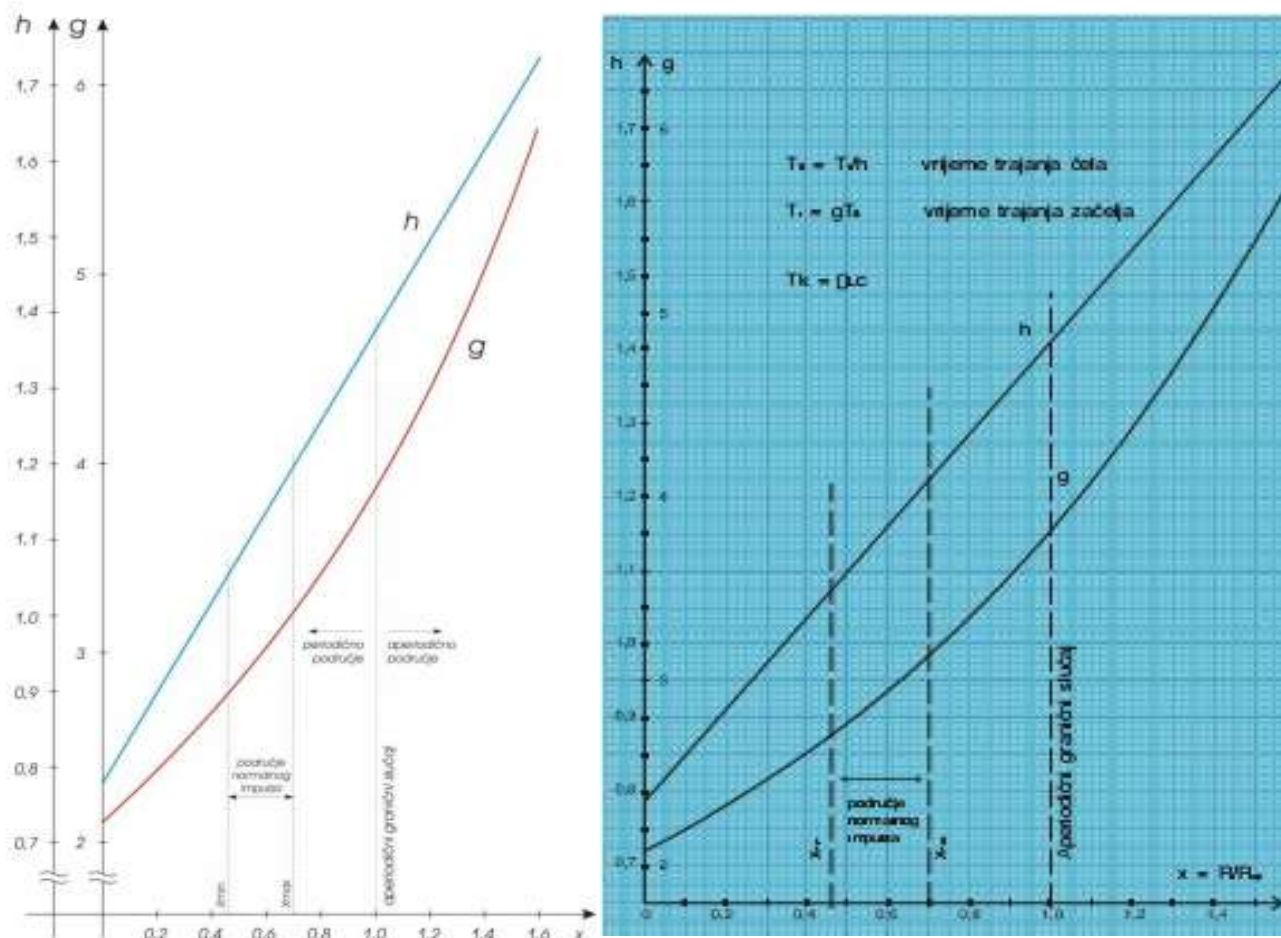
$t_1=0,3\mu s$ pri $0,1I_m$ i $t_1=2,52\mu s$ pri $0,9I_m$

$$T_s = \frac{t_2 - t_1}{0,8} = \frac{2,52 - 0,3}{0,8} = 2,775\mu s$$



9. Za poznate parametre udarnog strujnog generatora odrediti vreme čela, T_s , i začelja, T_r , njegovog strujnog talasa. Potrebni podaci i slika sa podacima o prigušenju su:

$L=12,24\mu H$, $C=3,98\mu F$ i $R=0,995\Omega$.



Slika 1. Pomoćne vrednosti g i h u funkciji prigušenja x

Rešenje:

Stepen prigušenja (x) jednog udarnog strujnog kruga definiše se kao odnos ukupnog otpora R , prema otporu u aperiodičnom graničnom slučaju R_{ap} :

$$x = \frac{R}{R_{ap}}$$

$$R_{ap} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{12,24}{3,98}} = 2 \cdot 1,7537 = 3.5073\Omega$$

$$x = \frac{R}{R_{ap}} = \frac{0,995}{3,5073} = 0,2837$$

Područje normalnog strujnog impulsa je $0,5 \leq x \leq 0,7$. Za dobijenu vrednost stepena prigušenja sa priložene slike mogu se očitati vrednosti pomoćnih veličina: $g=2,4$ i $h=0,95$. Potrebno je odrediti kružnu vremensku konstantu RLC-kola:

$$T_k = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{L \cdot C} = \sqrt{12,24 \cdot 10^{-6} \cdot 3,98 \cdot 10^{-6}} = 6,98 \mu s$$

$$T_s = \frac{T_k}{h} = \frac{6,98 \mu s}{0,95} = 7,2539 \mu s$$

$$T_r = g \cdot T_s = 2,4 \cdot 7,2539 \mu s = 17,574 \mu s$$

Generator zadatih parametara očigledno stvara udarnu struju za standardne oblike talasa 8/20 μ s. Dozvoljeno odstupanje od standardnih vrednosti koje se proverava je 10%:

$$p_{s\%} = \left| \frac{7,2359 - 8}{8} \right| \cdot 100\% = 9,5517\% < 10\%$$

$$p_{r\%} = \left| \frac{17,5741 - 20}{20} \right| \cdot 100\% = 12,1299\% > 10\%$$

10. Odrediti elemente strujnog udarnog generatora za standardni strujni impuls 4/10 μ s i za maksimalnu vrednost struje od 120 kA. Baterija kondenzatora treba da je sastavljena od jedinica kapaciteta 2 μ F koje su građene za napon punjenja 100 kV. Na osnovu Slike 1 i 2 proceniti broj potrebnih jedinica kapaciteta i induktivnost udarnog strujnog generatora.

Rešenje:

Iz dijagrama sa Slike 2. imamo, za $x = 0,6$ (približno sredina standardnog strujnog područja) imamo: $\eta = 0,425$ i $i_1/i_m = 0,05$.

Sa Slike 1 se mogu očitati vrednosti pomoćnih veličina: $h = 1,15$ i $g = 2,95$.

Za standardni strujni impuls vrednost za g iznosi:

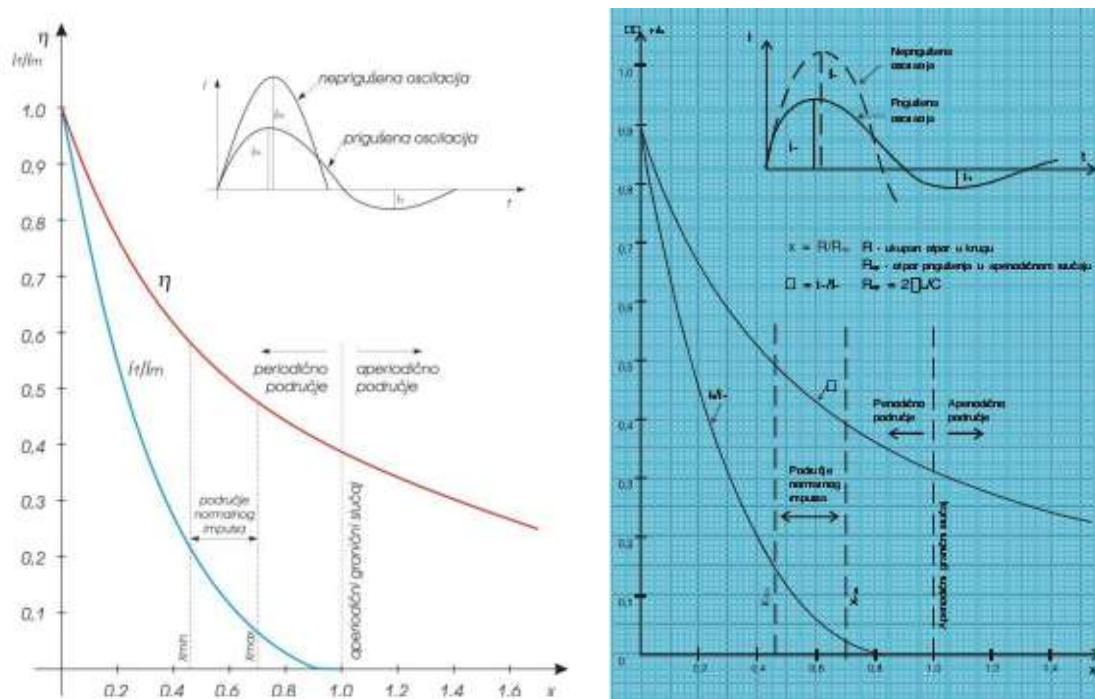
$$g_n = \frac{T_{rn}}{T_{sn}} = \frac{10}{4} = 2,5$$

Povećanje odnosa vremena čela i začelja, odnosno veličine g , sa 2,50 na 2,95 vrši se istovremenim produženjem vremena začelja, T_r , i skraćanjem vremena čela, T_s , sa prvobitnih standardnih vrednosti. Procentualno odstupanje postaje:

$$p_{\%} = \frac{g - g_n}{g + g_n} \cdot 100\% = \frac{2,95 - 2,5}{2,95 + 2,5} \cdot 100\% = 8,25\%$$

$$T_s = 4 \cdot \left(1 - \frac{8,25}{100}\right) = 3,67 \mu s$$

$$T_r = 10 \cdot \left(1 + \frac{8,25}{100}\right) = 10,825 \mu s$$



Slika 2. Stepen iskorišćenja η i relativna donja oscilacija i_1/i_m kao funkcija prigušenja x

Naredni korak je određivanje kružne vremenske konstante, kapacitivnosti i induktivnosti kola:

$$T_k = h \cdot T_s = 1,15 \cdot 3,67 = 4,23 \mu s$$

$$C = \frac{i_m \cdot T_k}{U \cdot \eta} = \frac{120 \cdot 4,23}{100 \cdot 0,5} = 10,23 \mu F \rightarrow 5 \times 2 \mu F = 10 \mu F$$

$$L = \frac{T_k^2}{C} = \frac{4,23^2 \cdot 10^{-12}}{10 \cdot 10^{-6}} = 1,75 \mu H$$

Provera:

$$i_m = \frac{U}{\sqrt{L/C}} \cdot \eta = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{1,4981/11,943}} \cdot 0,425 = 120,3284 kA$$

11. Na slici je prikazan udarni strujni generator. Kondenzatori se pune do maksimalnog napona od 40 kV. Parametri udarnog strujnog generatora su sledeći: $C=0.64 \mu F$, $L=10 \mu H$, $R=1 \Omega$, $R_s=20 m\Omega$.

- Odrediti oblik i amplitudu strujnog talasa koji se postiže generatorom.
- Odrediti kolika treba da bude osetljivost osciloskopa da bi se korišćenjem šanta mogla meriti ova struja. Visina ekrana osciloskopa je 8 cm.

Rešenje:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 19,76 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$$

$$\delta = \frac{R}{2L} = 5,1 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$$

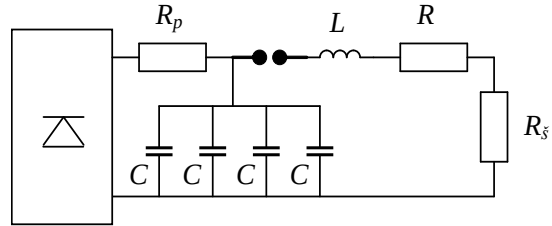
$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2}} = 0,9661$$

$$t_m \approx \frac{\pi}{2\alpha\omega} = 8,226 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$i_m(t) = 20,95 e^{-5,11 \cdot 10^4 t} \sin(19,095 \cdot 10^4 t) \text{ kA}$$

$$I_m = i_m(t) = \frac{U_0}{\alpha\omega L} e^{-\delta t_m} \Rightarrow I_m = 13,77 \text{ kA}$$

$$\text{b) } U_s = R_s \cdot I_m = 275,4 \text{ V} \Rightarrow b = \frac{275,4}{8} = 34,4 \frac{\text{V}}{\text{cm}} = 35 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$



12. Parametri udarnog strujnog generator su:

$$C = 0,64 \text{ }\mu\text{F}, L = 10 \text{ }\mu\text{H}, R = 1 \text{ }\Omega.$$

a) Odrediti potreban napon punjenja kondenzatora da bi se dobio strujni talas amplitude 10 kA.

b) Odrediti oblik strujnog talasa koji se postiže generatorom.

Rešenje:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 19,76 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$$

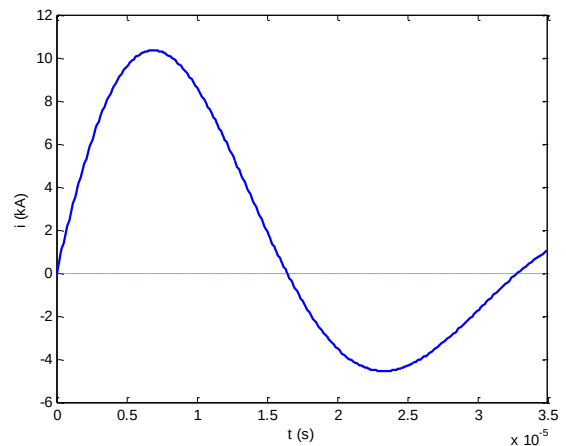
$$\delta = \frac{R}{2L} = 5 \cdot 10^4 \text{ 1/s}$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2}} = 0,9675$$

$$t_m \approx \frac{\pi}{2\alpha\omega} = 8,215 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\text{a) } I_m = i_m(t) = \frac{U_0}{\alpha\omega L} e^{-\delta t_m} \Rightarrow U_0 = 28,83 \text{ kV}$$

$$\text{b) } i_m(t) = 15,08 e^{-5 \cdot 10^4 t} \sin(19,12 \cdot 10^4 t) \text{ kA}$$



13. Od ponuđenih elemenata treba formirati udarni naponski generator i udarni strujni generator. Oba generator se priključuju na napon $U_0=25$ kV. Parametri elemenata koji su na raspolaganju su:

$$L=12,24\mu\text{H}, C_1=3,98\mu\text{F}, C_2=500\text{nF}.$$

- a) Za sredinu standardnog strujnog područja odrediti potreban otpor koji treba dodati da se formira udarni strujni generator talasa.
 b) Odrediti vreme čela, T_s , i začelja, T_r , talasa formiranog udarnog strujnog generator kao i njihova odstupanja od standardnih vrednosti.
 c) Odrediti potrebne otpore čela i začelja koje treba dodati da se formira udarni naponski generator čiji naponski talasa ima standardno vreme trajanja čela i začelja.
 d) Odrediti amplitudu naponskog talasa i koeficijent iskorišćenja udarnog naponskog generatora.

Rešenje:

a)

$$\text{sredina} \rightarrow x = \frac{R}{R_{op}} = 0,6$$

$$R_{op} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{12,24}{3,98}} = 2 \cdot 1,7537 = 3,5073\Omega$$

$$R = R_{op} \cdot x = 3,5073 \cdot 0,6 = 2,1\Omega$$

b) Za vrednost $x=0,6$ stepena prigušenja sa priložene Slike 1 mogu se očitati vrednosti pomoćnih veličina: $g=3,8$ i $h=0,95$.

$$T_k = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{L \cdot C} = \sqrt{12,24 \cdot 10^{-6} \cdot 3,98 \cdot 10^{-6}} = 6,98\mu\text{s}$$

$$T_s = \frac{T_k}{h} = \frac{6,98\mu\text{s}}{0,95} = 7,35\mu\text{s}$$

$$T_r = g \cdot T_s = 3,8 \cdot 7,35\mu\text{s} = 27,93\mu\text{s}$$

$$p_{s\%} = \frac{7,35 - 8}{8} \cdot 100\% = 8,125\% < 10\%$$

$$p_{r\%} = \frac{27,93 - 20}{20} \cdot 100\% = 39,65\% > 10\%$$

$$R_1 = T_s / (3,243 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}) = \frac{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (3,98 + 0,5)\mu\text{F}}{3,243 \cdot 9,98 \cdot 0,5\text{nF}} = 0,3322\Omega$$

c)

$$R_2 = T_r / (0,693 \cdot (C_1 + C_2)) = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot (3,98 + 0,5) \cdot 10^{-6}} = 16,1\Omega$$

$$U_m = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 25 \cdot 10^3 \frac{3,98}{3,98 + 0,5} = 22,21 \text{ kV}$$

d)

$$\eta = \frac{R_2 \cdot C_1}{(R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)} = \frac{16,1 \Omega \cdot 3,98 \mu F}{16,4322 \Omega \cdot 4,48 \mu F} = 0,87$$

Impulsni generatori, Teslin transformator

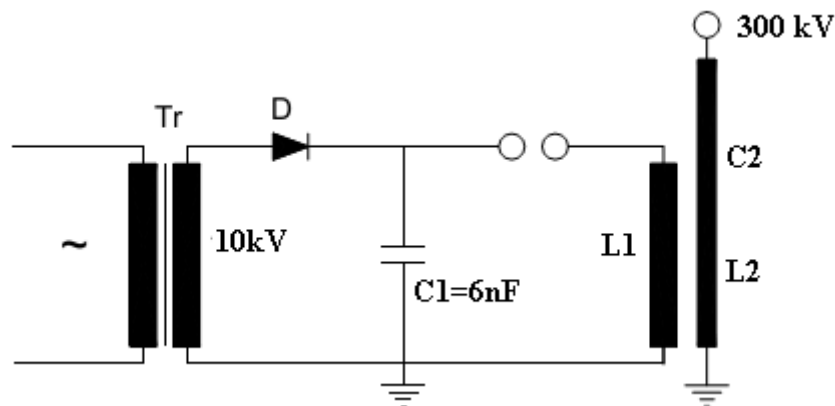
14. Za izradu Teslinog transformatora na raspolaganju su transformator sa jednosmernim naponom sekundara od 10kV i kapacitivnost $C_1=6\text{nF}$. Za konstrukciju primarnog i sekundarnog kalema, induktivnosti L_1 i L_2 , parametri su $r_2=3.5 \text{ cm}$, $N_2=1200$, $l_2=36 \text{ cm}$

- poluprečnik kalema u cm, $r_1=11\text{cm}$, $r_2=3,5\text{cm}$,

- broj navojaka kalema $N_1=9$, $N_2=1200$ i

- dužina kalema u cm $l_1=10\text{cm}$, $l_2=36\text{cm}$.

Odrediti poluprečnik kugle i napon na sekundarnom iskrištu.



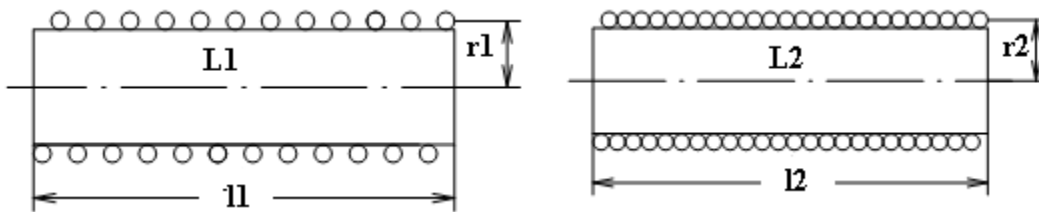
Slika 1. Šema Teslinog transformatora sa izlaznim naponom od 300kV

Rešenje:

U praksi za izračunavanje induktivnosti kalema koristi se Wheelerova iskustvena formula:

$$L_1 = \frac{(r_1 \cdot N_1)^2}{2,54 \cdot (8 \cdot r_1 + 11 \cdot l_1)} = \frac{(11 \cdot 9)^2}{2,54 \cdot (8 \cdot 11 + 11 \cdot 10)} = 19,49 \mu H$$

$$L_2 = \frac{(r_2 \cdot N_2)^2}{2,54 \cdot (9 \cdot r_2 + 10 \cdot l_2)} = \frac{3,51 \cdot 1200^2}{2,54 \cdot (9 \cdot 3,5 + 10 \cdot 36)} = 17,74 mH$$

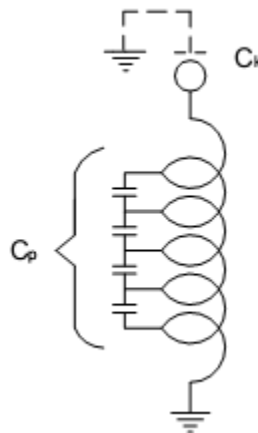


Slika 2. Primarni i sekundarni kalem

Frekvencija oscilovanja primarnog kola je:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{19,49 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-9}}} = 465413 Hz$$

Da bi se izračunala frekvencija sekundarnog kola, f_2 , potrebno je znati koliki je kapacitet C_2 . Sekundarni kapacitet se sastoji od parazitnih kapaciteta između navojaka i kapaciteta kugle (može biti kuglasta elektroda ili prstenasta elektroda) koja se nalazi na vrhu prigušnice prikazano na Slici 3. i služi za emisiju energije visoke frekvencije i visokog napona.



Slika 3. Parazitne kapacitivnosti između navojaka sekundarnog kalema i kapacitet kugle

Parazitne kapacitivnosti se mogu približno izračunati pomoću Medhurstove formule:

$$C_p = k \cdot d_2, \text{ gde su:}$$

C_p – parazitna kapacitivnost između navojaka u pF,

k – konstanta koja zavisi od odnosa dužine i prečnika sekundarnog kalema i

d_2 – prečnik sekundarnog kalema u cm.

Tabela I Konstanta k kod parazitnih kapacitivnosti

l/d	k	l/d	k	l/d	k
5	0,81	3,5	0,67	2	0,5
4,5	0,77	3	0,61	1,5	0,47
4	0,72	2,5	0,56	1	0,46

$$\frac{l_2}{d_2} = \frac{36}{7} = 5,14 \rightarrow C_p = k \cdot d_2 = 0,82 \cdot 7 = 5,74 pF$$

Kapacitet kugle se izračuna pomoću formule :

$$C_k = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R = \frac{D^2}{7250}, \text{ gde su:}$$

R – poluprečnik kugle,

D – prečnik kugle u mm i

$\epsilon_0 = 8.85416 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s/V} \cdot \text{m}$ – dielektrična konstanta vakuma

Da bi odredili prečnik kugle, elektrode, potrebno je da odredimo njen kapacitet pa samim tim i kapacitet celog sekundarnog kola Teslinog transformatora:

$$C_2 = C_k + C_p$$

Frekvencije primarnog i sekundarnog kola Teslinog transformatora trebaju biti približne:

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} = f_1 = 465413 \text{ Hz} \rightarrow C_2 = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 465413} \right)^2 \cdot \frac{1}{17,74 \cdot 10^{-3}} = 6,6 pF$$

$$C_k = C_2 - C_p = 6,6 - 5,74 = 0,86 pF \rightarrow D = \sqrt{7250 \cdot 0,86 \cdot 10^{-12}} = 0,0078 \text{ cm} \rightarrow R = 0,0039 \text{ cm}$$

Napon na izlazu Teslinog transformatora je:

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = 10kV \cdot \sqrt{\frac{17,74 \cdot 10^{-6}}{19,49 \cdot 10^{-3}}} = 301,7kV$$

15. Jednosmerni napon napajanja Teslinog transformatora je 4kV. Kapacitivnost primarnog kola je $C_1=1\mu F$, a induktivnost $L_1=1\mu H$. Elektroda u sekundarnom kolu je prstenastog oblika geometrije:

- prečnik prstena u mm, $D_1=500mm$ i

- prečnik cevi u mm, $D_2=400$.

Parazitne kapacitivnosti zanemariti. Odrediti napon na izlazu Teslinog transformatora.

Rešenje:

Izraz za kapacitivnost prstenaste elektrode je:

$$C_2 = C_{kp} = \frac{(D_1 - D_2) \cdot D_2}{3000} [pF] = \frac{(500 - 400) \cdot 400}{3000} = 13,33pF$$

Iz jednakosti frekvencije primarnog i sekundarnog kola može se odrediti induktivnost L_2 :

$$f_2 = f_1 \rightarrow \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} \rightarrow L_2 \cdot C_2 = L_1 \cdot C_1$$

$$L_2 = \frac{L_1 \cdot C_1}{C_2} = \frac{10^{-6} \cdot 10^{-6}}{13,33 \cdot 10^{-12}} = 75mH$$

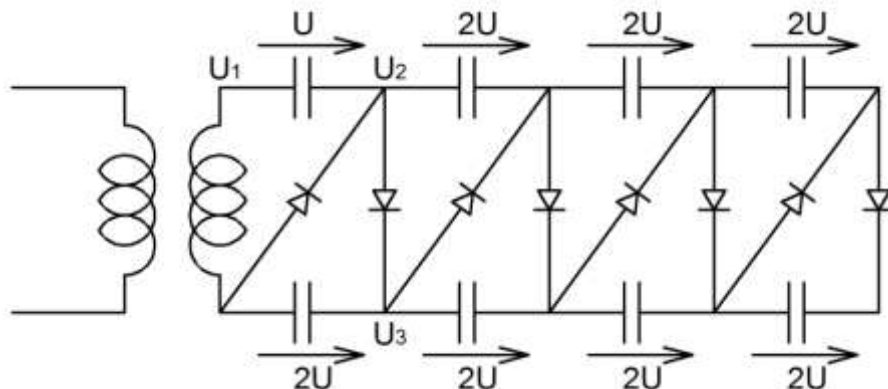
Napon na izlazu Teslinog transformatora se može izračunati iz izraza:

$$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \rightarrow U_2 = U_1 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = 4kV \cdot \sqrt{\frac{75 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}}} = 1095,445kV$$

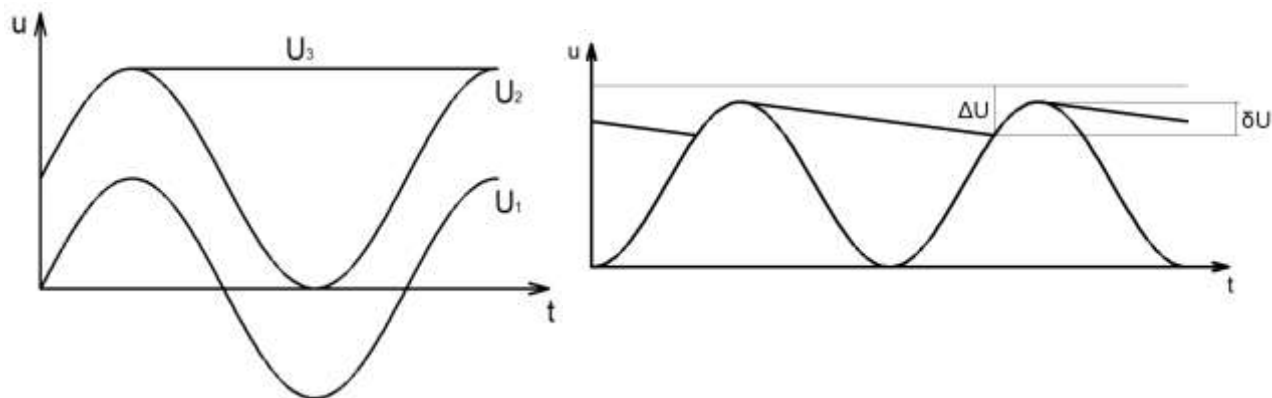
16. Kaskadni generator jednosmernog napona napaja se naponom mrežne učestanosti $f = 50 \text{ Hz}$ i daje jednosmerni napon od 100 kV (to je nominalni napon kaskadnog generatora). Generator se sastoji od 4 kaskade, svi kondenzatori imaju po $S=0,2 \mu F$, Nominalno strujno opterećenje je 4 mA. Odrediti:

- pad napona pri nominalnom opterećenju,
- pulsaciju napona pri nominalnom opterećenju i
- napon praznog hoda.

Rešenje:



Ako se pretpostavi da nailazi negativna poluperioda, postoji mogućnost da se kondenzator napuni na maksimalnu vrednost U (napon na visokonaponskoj strani transformatora). U toku pozitivne poluperiode preko vertikalne diode koja je usmerena na dole puni se donji kondenzator na $2U$ (napon na kondenzatoru se nadovezuje na napon sekundara visokonaponskog transformatora). Napon od $8U$ je napon praznog hoda. Kada se kaskada optereti protećiće neka struja i dolazi do pražnjenja ovih kondenzatora. Napon pri opterećenju je manji od napona praznog hoda.



$$a) \Delta U = \frac{I_{sr}}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{n}{6} \right) = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{2}{3} 4^3 + \frac{1}{2} 4^2 - \frac{4}{6} \right) = 20 kV$$

$$b) \delta U = \frac{I_{sr}}{fC} \frac{n(n+1)}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} \frac{4(4+1)}{2} = 4 kV$$

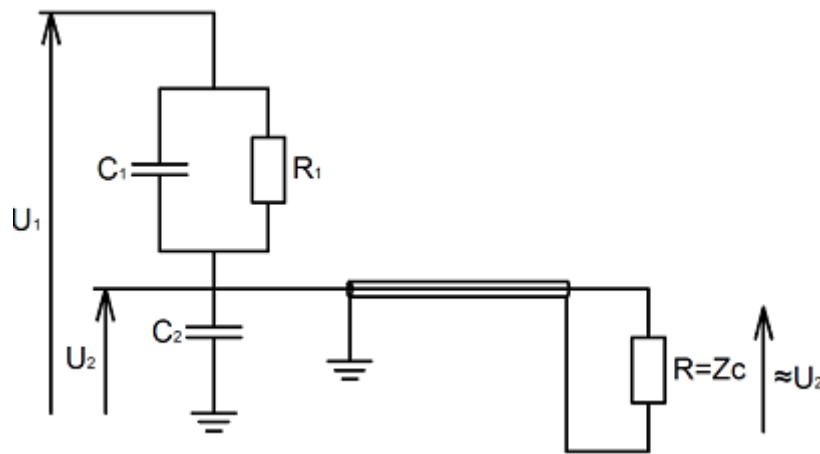
$$U_{ph} = U_n + \Delta U = 100 + 20 = 120 kV$$

$$c) U = U_m = \frac{U_{ph}}{2n} = \frac{120}{8} = 15 kV$$

Naponsko delilo

Delila napona se koriste pri merenju visokog napona jer su jeftinija od transformatora za visoki napon.

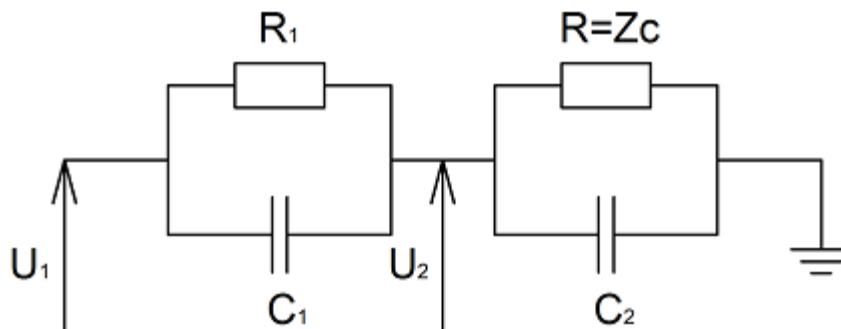
17. Za mešovito delilo napona koji je prikazan na slici odrediti takav odnos parametara da delilo teorijski ne unosi izobličenja. Odnos deljenja treba da bude $n+1:1$. Delilo je predviđeno da radi tako da bude povezano sa osciloskopom preko koaksijalnog kabla karakteristične impedanse Z_c , dužine d koji je na kraju zatvoren otpornikom otpornosti R .



Slika Mešovito delilo napona

Rešenje:

$R = Z_c$ da ne bi bilo refleksija od koaksijalnog kabla. Potrebno je da se plašt uzemlji samo u jednoj tački, da ne bi bilo lutajućih struja (što je slučaj ako je kabl uzemljen na dva mesta). Ekvivalentna šema:



Slika Zamenska šema delila napona

$$U_1 = U_2 + \frac{R_1 \frac{1}{pC_1}}{R_1 + \frac{1}{pC_1}} I_1 = U_2 + \frac{R_1 \frac{1}{pC_1}}{R_1 + \frac{1}{pC_1}} U_2 (pC_2 + \frac{1}{Z_c})$$

$$U_1 = U_2 \cdot (1 + \frac{R_1}{pC_1 R_1 + 1} \frac{Z_c pC_2 + 1}{Z_c})$$

$$\frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{R_1}{pC_1 R_1 + 1} \frac{Z_c pC_2 + 1}{Z_c} = n + 1$$

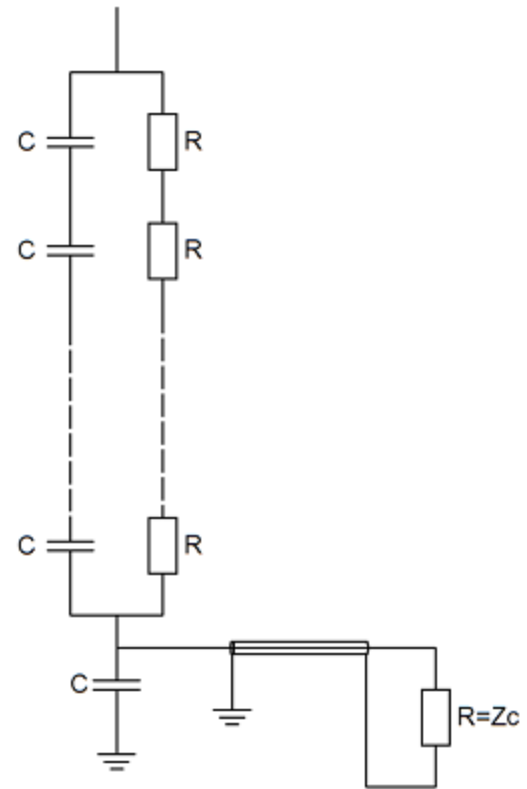
$$\rightarrow \frac{R_1}{pC_1 R_1 + 1} \frac{Z_c pC_2 + 1}{Z_c} = n$$

$$R_1 Z_c pC_2 + R_1 = n(pC_1 R_1 Z_c + Z_c)$$

Da bi n bio ceo broj:

$$R_1 = nZ_c$$

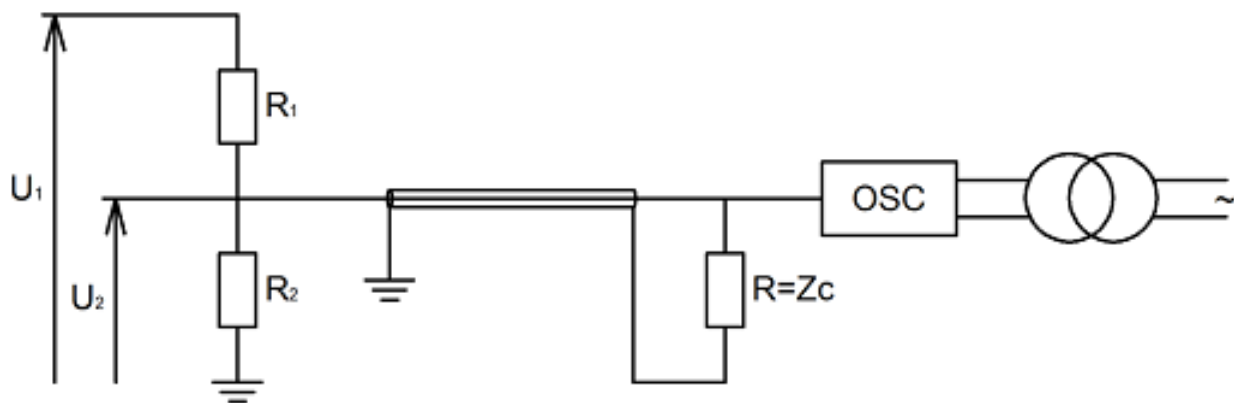
$$C_2 R_1 Z_c = n C_1 R_1 Z_c \rightarrow C_2 = n C_1 = n \frac{C}{n} = C$$



18. Za merenje impulsnog napona primenjeno je omsko delilo napona na koje je priključen osciloskop za snimanje brzih pojava kao na slici. Karakteristična impedansa koaksijalnog kabla je $Z_c = 70 \Omega$. Osetljivost osciloskopa je 50 V/cm a visina ekrana je 8 cm. Odrediti otpor R_1 da bi ovim delilom mogli da merimo napon do 1 MV. Otpor R_2 smatrati:

a) da teži beskonačnosti,

b) $R_2 = Z_c = 70 \Omega$.



Slika Omsko delilo napona

Rešenje:

$$U_{2\max} = 50 \frac{V}{cm} 8cm = 400V$$

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{ekv}}{R_1 + R_{ekv}}$$

$$R_{ekv} = \frac{R_2 R}{R_2 + R} = \frac{R_2 Z_C}{R_2 + Z_C}$$

$$R_1 \gg R_{ekv} \rightarrow m = \frac{R_{ekv}}{R_1} = \frac{R_2 Z_C}{R_1 (R_2 + Z_C)} \rightarrow R_1 = \frac{R_2 Z_C}{m(R_2 + Z_C)}$$

$$m = \frac{U_{2\max}}{U_1} = \frac{400}{10^6}$$

$$R_1 = \frac{Z_C}{m(1 + \frac{Z_C}{R_2})}$$

$$a) R_2 \rightarrow \infty \Rightarrow R_1 = \frac{Z_C}{m} = \frac{70}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 175k\Omega$$

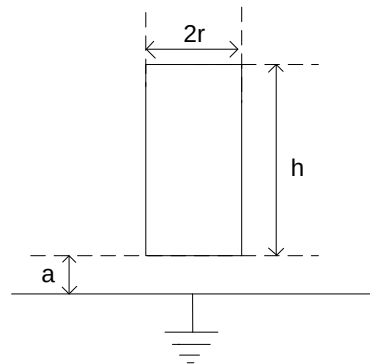
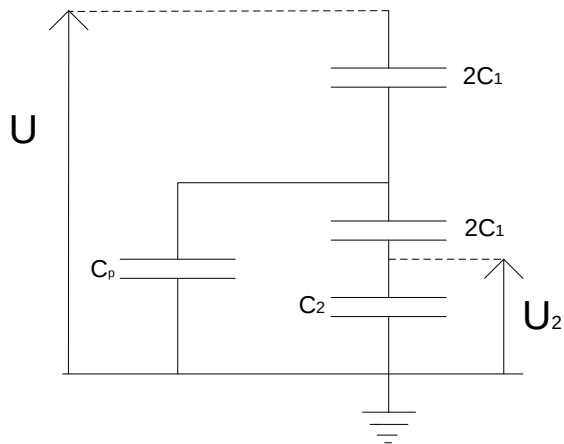
$$b) R_2 = Z_C \Rightarrow R_1 = \frac{Z_C}{2m} = 87,5k\Omega$$

19. Kapacitivno delilo napona za merenje visokog naizmeničnog napona predstavljen je električnom zamenskom šemom na slici. Kapaciteti $2C_1$ predstavljaju visokonaponski deo delitelja napona cilindričnog oblika, a C_p parazitni kapacitet visokonaponskog dela delitelja napona u odnosu na zemlju. Taj kapacitet se izračunava pomoću formule:

$$C_p = \frac{1,11 \cdot h}{2 \ln \frac{h}{r} - \ln \frac{3h + 4a}{h + 4a}}$$

gde je C_p izražen u pF, a poluprečnik r cilindra visokonaponskog dela delitelja, njegova visina h i rastojanje od zemlje a , izraženi u cm. Izračunati odnos transformacije delitelja napona, koji se

definiše kao: $g = \left| \frac{U}{U_2} \right|$.



Rešenje:

Ako se pretpostavi da je struja u grani 1-3 iznosi $(1+j0)A$ tada se odgovarajući naponi i struje mogu izračunati:

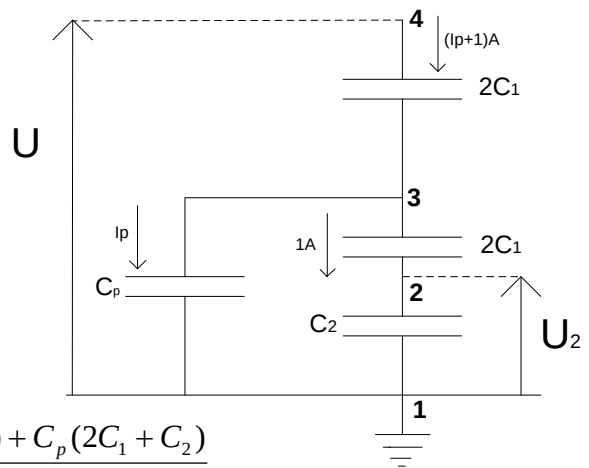
$$U_2 = -j \frac{1}{\omega C_2}$$

$$U_3 = -j \frac{C_2 + 2C_1}{\omega C_2 \cdot 2C_1}$$

$$I_p = j\omega C_p U_3 = \frac{(C_2 + 2C_1) \cdot C_p}{C_2 \cdot 2C_1}$$

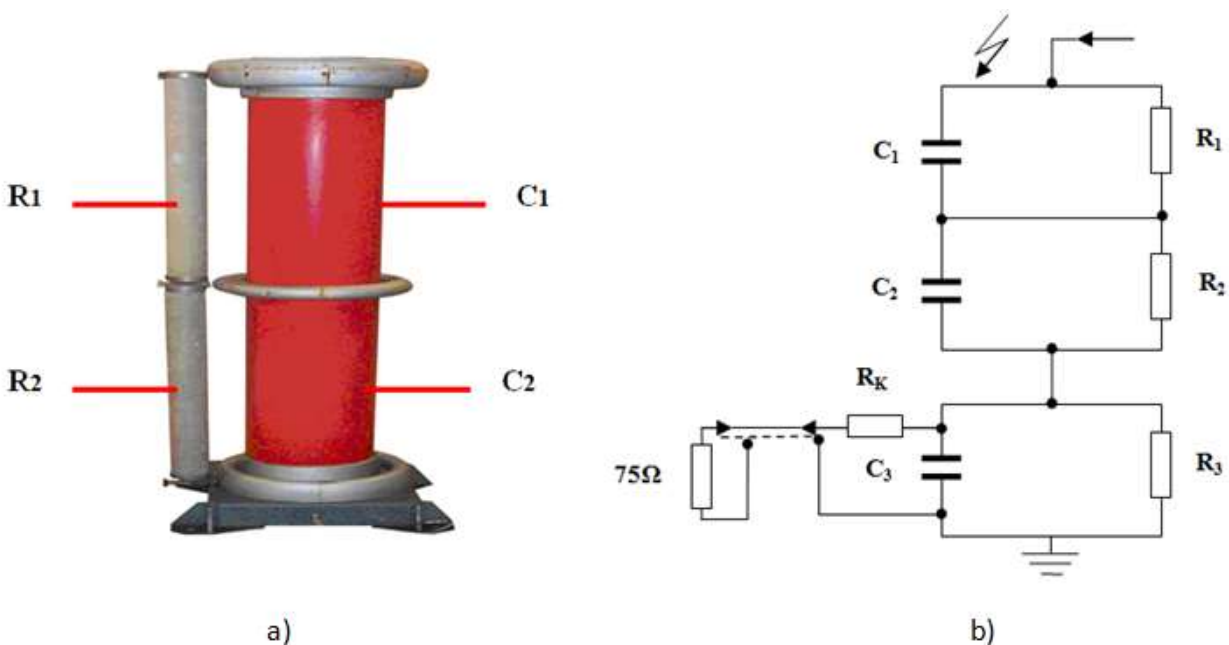
$$U = U_4 = U_3 + (I_p + 1) \frac{1}{j\omega 2C_1} = -j \frac{1}{\omega} \cdot \frac{4C_1(C_1 + C_2) + C_p(2C_1 + C_2)}{4C_2 C_1^2}$$

$$g = \left| \frac{U}{U_2} \right| = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \left[1 + \frac{C_p}{4C_1} \left(\frac{2C_1 + C_2}{C_1 + C_2} \right) \right]$$



20. Na slici je prikazana fotografija i električna zamenska šema omsko-kapacitivno delila napona (SMCR 1500/500). Ovo mešovito delilo napona je sa mernom opremom spojen preko koaksijalnog kabla dužine 20 m i karakteristične impedanse 75Ω . Izračunati prenosni odnos delila napona za sledeće zadate parametre:

- primarni, visokonaponski kondenzatori: $C_1=2991 \text{ pF}$ i $C_2=3000 \text{ pF}$,
- primarni, visokonaponski otpornici: $R_1=4070 \Omega$ i $R_2=4067 \Omega$,
- sekundarni, niskonaponski kondenzator: $C_3=399.366 \text{ nF}$ i
- sekundarni, niskonaponski otpornik: $R_3=37.25 \Omega$ i $R_k=94 \Omega$.



Slika Mešovito delilo napona a) fotografija i b) - ekvivalentna zamenska šema

Rešenje:

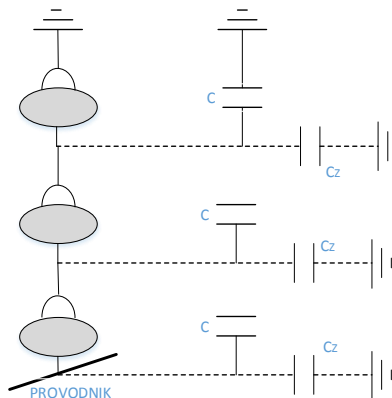
$$\underline{U}_3 = \underline{U} \frac{Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \underline{U} \frac{\frac{R_3 \cdot (R_k + Z_C)}{R_3 + R_k + Z_C} + \frac{1}{j\omega C_3}}{\frac{R_3 \cdot (R_k + Z_C)}{R_3 + R_k + Z_C} + \frac{1}{j\omega C_3} + R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_{1+2}}}$$

$$g = \left| \frac{U}{U_3} \right| = 267$$

$$\rightarrow C_3 = g \cdot C_{1+2} = 1498 \cdot 10^{-12} \cdot 267,64 = 399,966 \text{ nF}$$

Određivanje raspodele napona duž izolatorskog lanca

21. Kakva je raspodela napona na tri izolatora, ako je napon između provodnika i zemlje 20 kV? Poznati su sopstveni kapaciteti izolatora $C=60 \text{ pF}$ i kapaciteti pojedinih izolatora prema zemlji $C_z=40 \text{ pF}$.



Rešenje:

$$\underline{V}_1 = \frac{1}{jC\omega}$$

$$V_2 = V_1 + \frac{C+C_z}{C} \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{C\omega} + \frac{C+C_z}{C^2\omega}$$

$$\underline{V}_2 = \frac{2C+C_z}{jC^2\omega}$$

$$V_3 = V_2 + \frac{C^2+3CC_z+C_z^2}{C^2} \frac{1}{C\omega} = \frac{2C+C_z}{jC^2\omega} + \frac{C^2+3CC_z+C_z^2}{C^3\omega}$$

$$\underline{V}_3 = \frac{3C^2+4CC_z+C_z^2}{jC^3\omega}$$

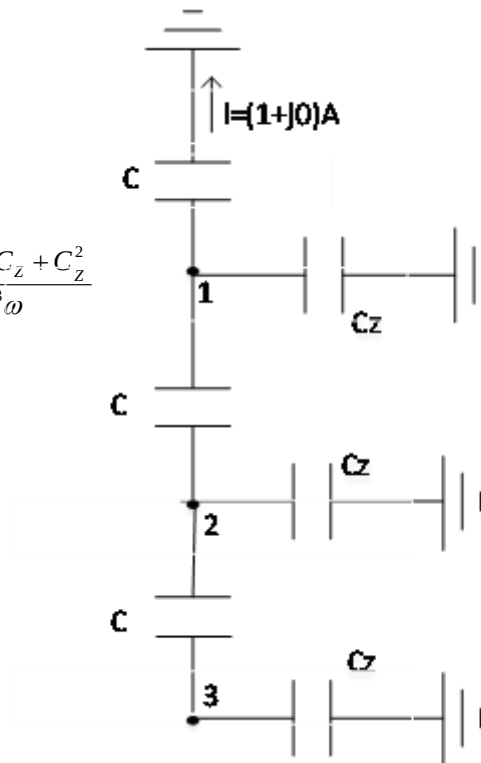
$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{C^2}{3C^2+4CC_z+C_z^2} = \frac{36}{220}$$

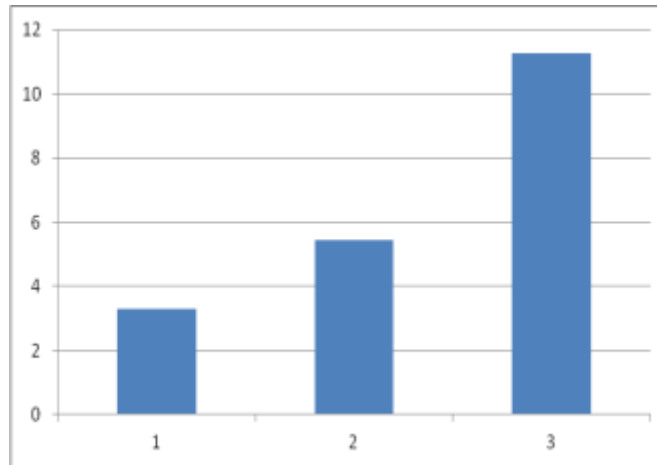
$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{2C^2+CC_z}{3C^2+4CC_z+C_z^2} = \frac{96}{220}$$

$$V_1 = \frac{36}{220} 20 = 3,28 \text{ kV}$$

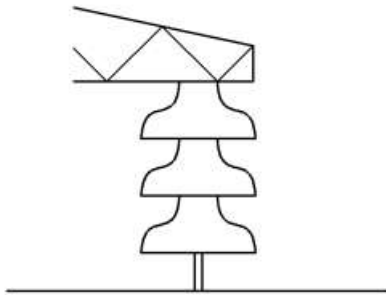
$$V_2 - V_1 = \left(\frac{96}{220} - \frac{36}{220} \right) 20 = 5,45 \text{ kV}$$

$$V_3 - V_{21} = 20 - \frac{96}{220} 20 = 11,27 \text{ kV}$$





22. Odrediti raspodelu napona duž jednog izolatorskog lanca koji se sastoji iz n izolatorskih članaka. Pretpostaviti da su kapacitivnosti metalnih delova članaka prema zemlji, prema



provodniku i prema susednom članku nezavisne od članka. Brojni podaci: $n=3$, kapacitivnost između metalnih delova susednih članaka $C = 50$ pF, kapacitivnost prema zemlji $C_z = 5$ pF, kapacitivnost prema provodniku $C_p = 1$ pF. Konzola stuba je uzemljena, tako da je $U_k = 0$. Raspodela napona duž izolatora je nelinearna, a to je posledica postojanja parazitnih kapacitivnosti prema provodniku pod naponom i prema zemlji. Odrediti raspodelu i ako je 5 izolatorskih članaka.

Rešenje:

$$i_{p1} + i_2 = i_1 + i_{z1} \rightarrow (U - U_1)pC_p + (U_2 - U_1)pC = U_1pC + U_1pC_z$$

$$(U - U_2)pC_p + (U_3 - U_2)pC = (U_2 - U_1)pC + U_2pC_z$$

...

$$(U - U_{n-1})pC_p + (U_n - U_{n-1})pC = (U_{n-1} - U_{n-2})pC + U_{n-1}pC_z \rightarrow U_n = U$$

$$\begin{bmatrix} C_p \\ C_p \\ \dots \\ C_p \\ \dots \\ C_p \\ C_p + C \end{bmatrix} pU = \begin{bmatrix} 2C + C_p + C_z & -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C & 2C + C_p + C_z & -C & & & & \\ \dots & \dots & \dots & & & & \\ 0 & 0 & -C & 2C + C_p + C_z & -C & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 2C + C_p + C_z & -C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 2C + C_p + C_z \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_k \\ \dots \\ U_{n-2} \\ U_{n-1} \end{bmatrix}$$

Na glavnoj dijagonali je zbir svih kapacitivnosti koje su vezane za tu tačku.

$$[C_{pk}]U = [C_k][U_k]$$

$$[U_k] = [C_k]^{-1}[C_{pk}]U$$

$$[U_R] = [C_k]^{-1}[C_{pk}] \cdot 100\%$$

$$n = 3$$

$$\begin{bmatrix} U_{1R} \\ U_{2R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2C + C_p + C_z & -C \\ -C & 2C + C_p + C_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_p \\ C_p + C \end{bmatrix} \cdot 100\%$$

$$\begin{bmatrix} U_{1R} \\ U_{2R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 106 & -50 \\ -50 & 106 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 51 \end{bmatrix} \cdot 100\%$$

$$\det \begin{vmatrix} 106 & 50 \\ 50 & 106 \end{vmatrix} = 8736$$

$$adj = \begin{bmatrix} 106 & -50 \\ -50 & 106 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 106 & 50 \\ 50 & 106 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{1R} \\ U_{2R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01213 & 0.00572 \\ 0.00572 & 0.01213 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 51 \end{bmatrix} \cdot 100\% = \begin{bmatrix} 30,4 \\ 62,5 \end{bmatrix} \%$$

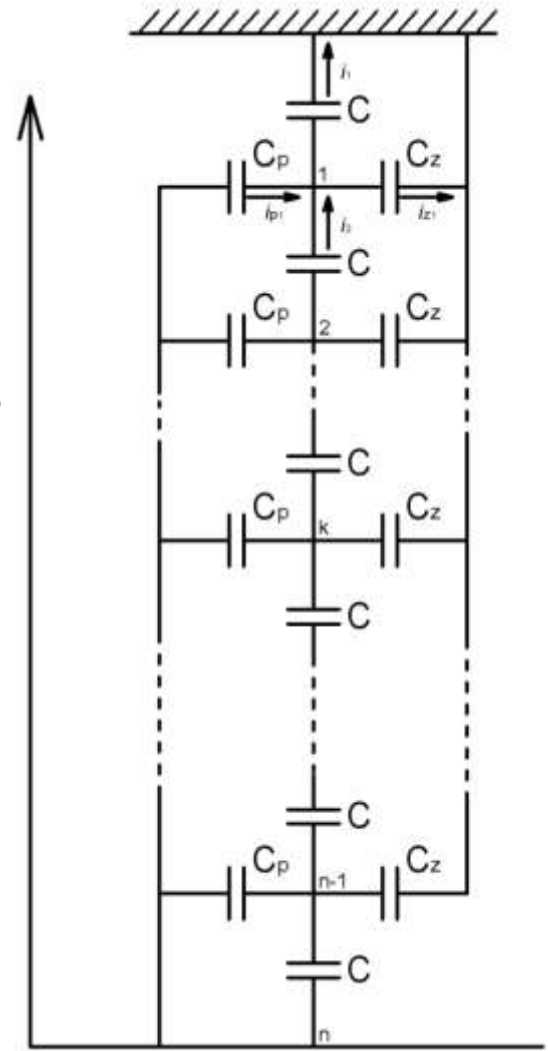
$$n = 5$$

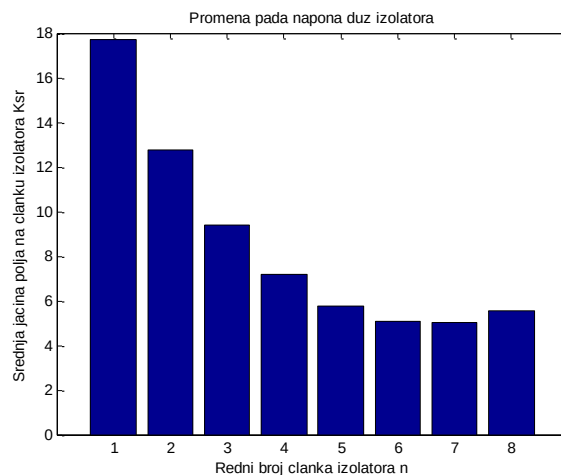
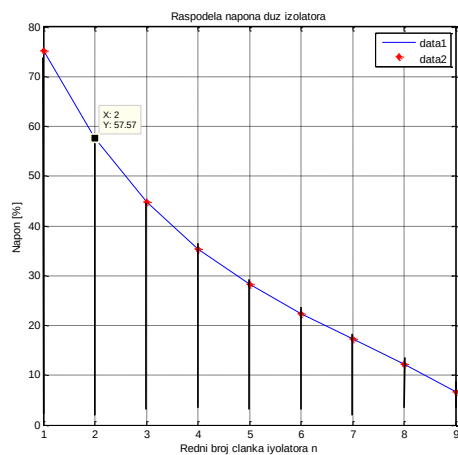
$$\begin{bmatrix} U_{1R} \\ U_{2R} \\ U_{3R} \\ U_{4R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 106 & -50 & 0 & 0 \\ -50 & 106 & -50 & 0 \\ 0 & -50 & 106 & -50 \\ 0 & 0 & -50 & 106 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 51 \end{bmatrix} \cdot 100\%$$

$$\det C_k = 106 \begin{vmatrix} 106 & -50 & 0 \\ -50 & 106 & -50 \\ 0 & -50 & 106 \end{vmatrix} - (-50) \begin{vmatrix} -50 & 0 \\ -50 & 106 \end{vmatrix} - 50 \begin{vmatrix} -50 & 106 \\ 0 & -50 \end{vmatrix} = 106 \cdot 661016 + 50 \cdot (-436800) = 48227696$$

$$adj C_k = \begin{bmatrix} 661016 & 436800 & 265000 & 125000 \\ 436800 & 1191016 & 561800 & 265000 \\ 265000 & 561800 & 926016 & 436800 \\ 125000 & 265000 & 436800 & 661016 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{1R} \\ U_{2R} \\ U_{3R} \\ U_{4R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16,04 \\ 32,5 \\ 49,82 \\ 71,64 \end{bmatrix} \%$$





Slika 1x Raspodela napona duž izolatora i promena pada napona duž izolatora za slučaj kada postoji 8 izolatorskih članaka

+

Koordinacija izolacije

Dielektrična čvrstoća je onaj napon koji izolator može da podnese. Konvencioni napon oprema mora uvek da izdrži. Preskočni napon u vazduhu zavisi od oblika elektroda, od oblika električnog polja, amplitude i trajanja prenapona. Takođe zavisi od niza mikroprocesa u prirodi i ima slučajan karakter, ne dolazi uvek do preskoka pri istom naponu.

$$N(\mu, \sigma^2)$$

N - normalna Gausova raspodela,

μ - matematičko očekivanje i

σ^2 – kvadrat standardne devijacije.

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt f(x, \mu, \sigma^2),$$

gde dt ne mora biti vreme.

$P_i = P(x=x_i)$ verovatnoća da promenljiva x ima vrednost x_i .

$$\mu = E(x) = \sum_i x_i P_i$$

$$\sigma^2 = D^2(x) = \sum_i (x_i - \mu)^2 P_i$$

$$\text{Standardizacija raspodele: } z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Za normalizovanu raspodelu važi: $\mu=0, \sigma^2=1, N(0,1)$.

23. Merenjem preskočnog napona između koaksijalnih cilindričnih elektroda u SF_6 gasu dobijene su sledeće vrednosti u [kV]: 210, 208, 208, 175, 182, 206, 190, 194, 198, 205, 212, 200, 205, 202, 207, 210, 202, 201, 188, 205, 209, 201, 216, 196. Odrediti:

a) očekivanu vrednost preskočnog napona,

b) varijansu i standardnu devijaciju preskočnog napona,

v) funkciju gustine raspodele i funkciju raspodele preskočnog napona.

x_i	P_{mi}	P_i	$\Sigma P_i(x < x_i)$
175	1	1/24	1/24
182	1	1/24	2/24
188	1	1/24	3/24
190	1	1/24	4/24
194	1	1/24	5/24
196	1	1/24	6/24
198	1	1/24	7/24
200	1	1/24	8/24
201	2	1/12	10/24
202	2	1/8	12/24
205	3	1/24	15/24
206	1	1/24	16/24
207	1	1/12	17/24
208	2	1/24	19/24
209	1	1/12	20/24
210	2	1/24	22/24
212	1	1/24	23/24
216	1	1/24	1

P_{mi} – amplituda učestanosti pojavljivanja.

Relativna učestanost je verovatnoća da preskočni napon uzme neku od preskočnih vrednosti.

$P_i = P_{mi}/m$, $m=24$, kumulativna verovatnoća.

Rešenje:

a)

$$\mu = E(x) = \sum_{i=1}^{18} x_i P_i = \frac{1}{24} (175 + 182 + 188 + 190 + 194 + 196 + 198 + 200 + 206 + 207 + 209 + 212 + 216) + \frac{1}{12} (201 + 202 + 208 + 210) + \frac{1}{8} 205 = 201,25 \text{ kV}$$

$$\text{b) } \sigma^2 = D^2(x) = \sum_{i=1}^{18} (x_i - \mu)^2 P_i = 91,27 (\text{kV})^2$$

$\sigma = 9,55 \text{ kV}$ i na osnovu ove vrednosti se određuje interval vrednosti gde se očekuje preskočni napon.

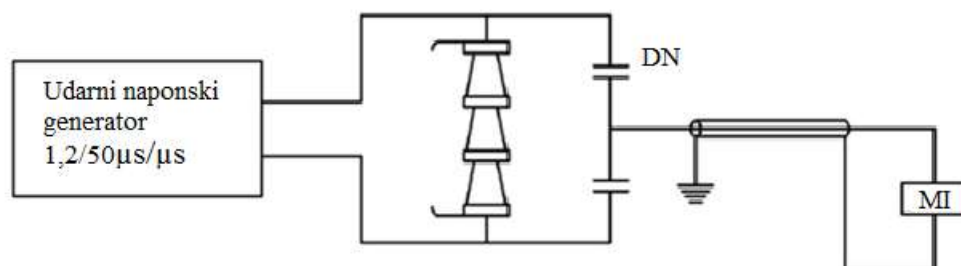
c)

$$f(x) = P(x = x_i) = P_i$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = 0,0418 \cdot e^{-\frac{(x-201,25)^2}{18254}} \text{ kV}$$

Metoda gore dole

50% preskočni napon je napon pri kome u 50% slučajeva dolazi do preskoka. Ova metoda se može primeniti jer podleže normalnoj raspodeli. Ispituje se kad dolazi do preskoka a ne do proboja.



DN - kapacitivno delilo napona,

MI - merni instrument.

Koaksijalni kabl eliminiše elektro-magnetske smetnje do mernog instrumenta.

Udarni generator može davati talase različitih amplituda.

Polazi se od napona U_0 prilikom koga ne dolazi do preskoka. Napon se povećava za ΔU sve dok ne dođe do preskoka napona na izolatoru i taj napon se usvaja da je U_{i1} onda se napon spušta i

dobija se $U_{i2} = U_{i1} - \Delta U$ i takav napon se dovodi na izolator i utvrđuje da li dolazi do preskoka. Ako se ne pojavi preskok napon se poveća za ΔU , a ako se pojavi napon se smanji za ΔU . Postupak se ponavlja sve dok se ne dobije n vrednosti napona. Aritmetička sredina ovih napona predstavlja 50% preskočni napon.

24. Pri određivanju 50% preskočnog napona metodom gore dole napon se menja na način iz tabele. Odrediti 50% preskočni napon i standardno odstupanje.

Redni broj	$U[kV]$	preskok
1	120	NE
2	145	DA
3	140	NE
4	145	NE
5	150	DA
6	145	NE
7	150	DA
8	145	DA
9	140	DA
10	135	NE
11	140	NE
12	145	DA
13	140	NE
14	145	NE
15	150	NE
16	155	DA
17	150	DA
18	145	DA

Rešenje:

x_i	135	140	145	150	155
P_{mi}	1	4	7	4	1
P_i	1/17	4/17	7/17	4/17	1/17
ΣP_i	1/17	5/17	12/17	16/17	1

$$U_{50\%} = \mu = E(x) = \sum_{i=1}^5 x_i P_i = 145 \text{ kV}$$

$$\sigma^2 = D^2(x) = \sum_{i=1}^5 (x_i - \mu)^2 P_i = 23,53 (\text{kV})^2$$

$$\sigma = 4,851 \text{ kV}$$

25. Odrediti rastojanje provodnika prema stubu ili dužinu izolatorskog lanca za nadzemni vod nazivnog napona 400 kV. Koordinaciju izolacije izvesti za sklopne prenapone, pri čemu je poznato da najveći moguć napon pri uključenju iznosi 2,4 relativne jedinice. Srednje kvadratno odstupanje za sklopne prenapone iznosi $\sigma=5\%$ u odnosu na podnosivi sklopni napon. Izraz za podnosivi sklopni napon [kV] u funkciji rastojanja S [m] za srednju fazu i suve uslove je:

$$U_{50\%} = k_g \cdot \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}}$$

Koeficijent k_g je koeficijent oblika elektroda, koji zavisi od oblika elektroda i blizine metalnih masa. Smatrati da u zadatku k_g uzima vrednost 1,2. U uslovima na kiši podnosivi sklopni napon je za 4% niži nego u suvim uslovima, a za spoljašnju fazu podnosivi napon je za 8% viši od vrednosti za srednju fazu.

Koliki je preskočni atmosferski napon pozitivnog i negativnog polariteta za određena rastojanja ako je gradijent za pozitivan polaritet $E_{poz}=560 \text{ kV/m}$, a za negativan $E_{neg}= 605 \text{ kV/m}$?

Rešenje:

Izolacija vodova nazivnog napona 400 kV se dimenzioniše u odnosu na sklopne prenapone, jer su oni u velikom broju slučajeva veći od atmosferskih. Koordinacija izolacije se izvodi za uslove kiše jer su tada preskočni naponi u mreži niži.

Maksimalna vrednost faznog napona je:

$$U_{mf} = \frac{400}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 326 \text{ kV}$$

Maksimalni prenapon iznosi:

$$U_{prenapon\ max} = 2,4 \cdot U_{mf} = 2,4 \cdot 326 = 784\text{kV}$$

Najniža vrednost podnosivog napona treba da bude jednaka najvišem mogućem prenaponu 784 kV. Najniža vrednost podnosivog napona $U_{\min}=U_3$ je ona vrednost za koju je verovatnoća preskoka zanemarljiva. Preporučuje se da ta vrednost bude tri standardne devijacije ispod pedeset procentne vrednosti:

$$U_{\min} = U_3 = U_{50\%} \cdot (1 - 3 \cdot \frac{\sigma}{U_{50\%}}) = U_{prenapon\ max}$$

Za srednju fazu i vlažne, kišne, uslove je:

$$0,96 \cdot k_g \cdot \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}} \cdot (1 - 3 \cdot \frac{\sigma}{U_{50\%}}) = U_{prenapon\ max} = 0,96 \cdot 1,2 \cdot \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}} \cdot (1 - 3 \cdot 0,05) = 784 \rightarrow S = 2,46\text{m}$$

Za spoljašnju fazu je:

$$1,08 \cdot 0,96 \cdot 1,2 \cdot \frac{3400}{1 + \frac{8}{S}} \cdot (1 - 3 \cdot 0,05) = 784 \rightarrow S = 2,2\text{m}$$

Preskočni naponi za navedena rastojanja su:

$$U_{poz1} = 560 \cdot 2,46 = 1377\text{kV}$$

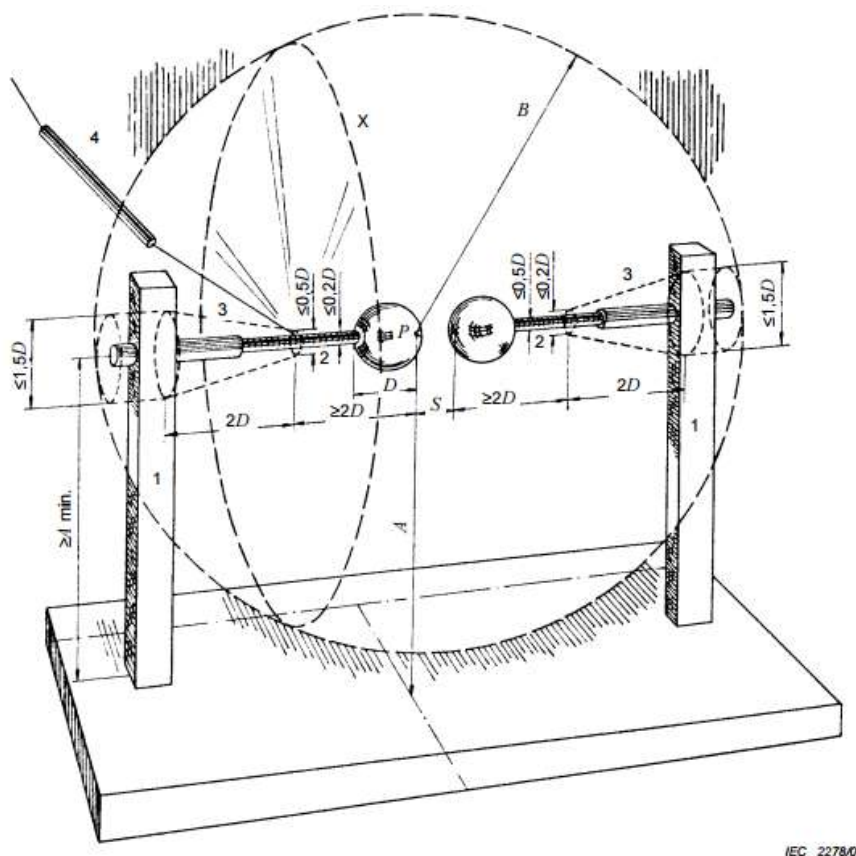
$$U_{neg1} = 605 \cdot 2,46 = 1488\text{kV}$$

$$U_{poz2} = 560 \cdot 2,2 = 1232\text{kV}$$

$$U_{neg2} = 605 \cdot 2,2 = 1331\text{kV}$$

Korekcionni faktori kod visokonaponskih ispitivanja

26. Merno kuglasto iskrište prečnika kugli 500 mm ima dvostruku namenu: za merenje udarnih, jednosmernih i naizmeničnih napona i za dobijanje odsečenih napona. Grafički prikaz kuglastog mjernog iskrišta je dat na slici.



Slika Merno kuglasto iskrište (standard IEC 60052)

Ovo kuglasto iskrište se može podešavati po razmaku od 20 mm do 240 mm. Garantovana tačnost merenog napona je prema standardu IEC 60052 u rasponu od 59 kV do 515 kV. Pošto tačnost merenja zavisi od blizine okolnih uzemljenih objekata, mora voditi računa da se najbliži predmet ne nađe na manjoj udaljenosti od $8 \times S$, gdje je S razmak između kugli. Ako je temperatura u laboratoriji za visokonaponsko ispitivanje $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vazdušni pritisak 130 kPa odrediti minimalni i maksimalni preskočni napon koji se može izmeriti datim uslovima. Za date uslove u laboratoriji aproksimirati zavisnost preskočnog napona od udaljenosti elektroda $U[\text{kV}] = a + b d[\text{mm}]$.

Rešenje:

Standardni atmosferski uslovi su:

- temperatura vazduha 20°C,
- vazdušni pritisak 101.3 kPa i
- apsolutna vlažnost vazduha 8.5 gm³.

Za nestandardne atmosferske uslove uvodi se korekcionni faktor k koji ima vrednost:

$$k=1+0.002 \times (h/\sigma - 8.5),$$

gde su: h - apsolutna važnost vazduha [gm⁻³] i

σ - relativna gustina vazduha definisana kao:

$$\sigma = \frac{b}{b_0} \times \frac{273+t_0}{273+t},$$

gde su: b - atmosferski pritisak [kPa],

b_0 - standardni atmosferski pritisak,

t - tempeatura [°C] i

t_0 - standardna tempeatura.

Preskočni napon u uslovima kada se h/σ nalazi u granicama 1-13 gm⁻³ se računa po formuli:

$$U_0 = 2 + 0,534 \cdot d[kV],$$

gde je d preskočno rastojanje između elektroda koje se kreće od 25mm do 250 mm.

U nestandardnim uslovima preskočni napon se računa preko izraza:

$$U = U_0 \times \sigma \times k$$

gde su: U - preskočni napon u nestandardnim uslovima [kV],

U_0 - preskočni napon u standardnim uslovima [kV],

σ - relativna gustina vazduha u laboratoriji i

k - korekcionni faktor definisan za nestandardne atmosferske uslove.

$$\sigma = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} = \frac{130}{101,3} \cdot \frac{273+20}{273+33} = 1,227$$

$$k = 1 + 0,002 \cdot \left(\frac{8,5}{1,23} - 8,5 \right) = 0,997$$

$$U_{\min} = 59 \cdot 1,227 \cdot 0,997 = 72,176 \text{ kV}$$

$$U_{\max} = 515 \cdot 1,227 \cdot 0,997 = 630,010 \text{ kV}$$

$$a + b \cdot 20 = 72,1736$$

$$a + b \cdot 240 = 630,01$$

$$a = 21,37$$

$$b = 2,536$$

27. Na testu razvoja rastavljača, izmeren je 50% preskočni napon (sa stazom preskoka od $L=1$ m) $U=580$ kV na temperaturi od $t=30^\circ\text{C}$, vazдушnom pritisku od $p=995$ hPa i vlažnosti $h=12$ g/m³. Potrebno je odrediti vrednost 50% preskočnog napona za standardne atmosferske uslove.

Rešenje:

Ukupni atmosferski korekcionni faktor je:

$$K_t = k_1 \cdot k_2,$$

gde je:

$$k_1 - \text{korekcionni faktor gustine vazduha } k_1 = \delta^m,$$

$$k_2 - \text{Korekcionni faktor vlažnosti vazduha } k_2 = k^w.$$

U nestandardnim uslovima preskočni napon se računa preko izraza:

$$U = U_0 \cdot K_t = U_0 \cdot \delta^m \cdot k^w,$$

gde su: U - preskočni napon u nestandardnim uslovima [kV],

U_0 - preskočni napon u standardnim uslovima [kV],

Relativna gustina vazduha δ određuje se na osnovu relacije:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t_d} = \frac{995}{1013} \cdot \frac{273+20}{273+30} = 0,95$$

Vlaga utiče na proces preskoka, posebno kada se određuju parcijalna pražnjenja. To se odražava i kroz vrstu testirajućeg napona. Dakle, za različite napone testiranja i različite faktore vlažnosti korekcija k se može izračunati prema formulama:

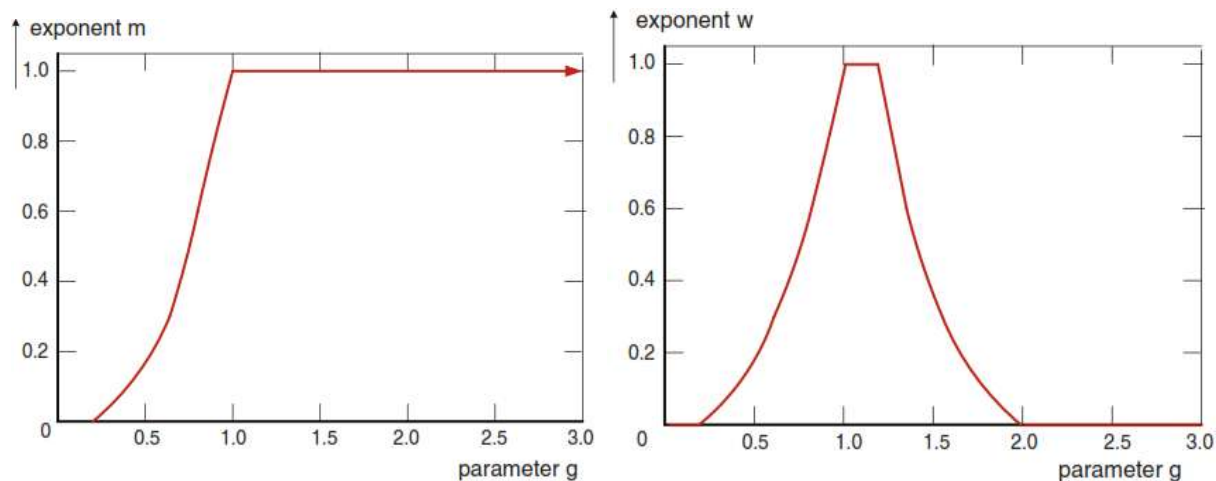
- DC: $k=1+0,014(h/\delta-11)-0,00022(h/\delta-11)^2$ za $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$,
- AC: $k=1+0,012(h/\delta-11)$ za $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3$ i
- Impulsni: $k=1+0,010(h/\delta-11)$ za $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 20 \text{ g/m}^3$.

Na osnovu formula proračunava se da je korekcioni faktor $k=1+0,01((12/0,95)-11)=1,02$. Korekcioni faktori m i w koji opisuju moguća parcijalna pražnjenja se izračunavaju na osnovu parametra g za koga važi formula:

$$g = \frac{V_{50}}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} = \frac{580}{500 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 1,02} = 1,20$$

Na osnovu izračunatog parametra g mogu se odrediti korekcioni faktori m i w iz Tabele ili sa narednih Slika:

g	m	w
$<0,2$	0	0
0,2-1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0-1,2	1,0	1,0
1,2-2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2	1,0	0



Slika Zavisnost korekcionih faktora m i w od parametra g

$$m = 1,0$$

$$w = (2,2 - 1,2) \cdot (2,0 - 1,2) / 0,8 = 1,0$$

$$k_1 = 0,95$$

$$k_2 = 1,02$$

$$K_t = k_1 \cdot k_2 = 0,95 \cdot 1,02 = 0,97$$

$$U_0 = U / K_t = 580 / 0,97 = 598 \text{ kV}$$

28. U skladu sa standardom IEC 62271-100/2003 vršena su ispitivanja ispitivanje sredjenaponskog vakuumskog prekidača tip VPE-24 podnosivim atmosferskim impulsnim naponom oblika 1,2/50 μ s, (6.2 - IEC 62271-100; 6.2.6.2 - IEC 60694). U skladu sa standardom prekidač mora da udovolji uslovima predstojećeg rada u normalnom pogonu i to u pogledu zagrevanja pri normalnom radu, njegovoj sposobnosti da podnese naprezanja prilikom kvarova u mreži kao i njegovu sposobnost eliminisanja istih. U Tabeli I su dati podaci prekidača dobijeni od strane proizvođača. Za vreme dielektričnih ispitivanja u laboratoriji visokog napona vladali su atmosferski uslovi dati u Tabeli II. Potrebno je odrediti vrednosti stvarnog napona u odnosu na izmerene napone u laboratoriji.

Tabela I Karakteristike vakumskog prekidača

Nazivni napon	kV	24
Nazivni podnosivi napon 1min 50 Hz	kV	50
Nazivni podnosivi udarni mnapon 1,2/50 μ s	kV	125
Nazivna trajna struja	A	1250
Nazivna kratkospojna simetrična moć	kA	25
Nazivna podnosiva udarna struja	kA	63
Nazivna vrijednost jednosmjerne komponente	%	40
Trajanje luka	ms	<15
Vrijeme otvaranja	ms	<60
Vrijeme zatvaranja	ms	<50
Nazivni slijed operacija	-O-0.3s-CO-3min-CO	
Maksimalna dnevna temperatura	°C	40
Maksimalna prosječna temperatura okoline tokom 24 sata	°C	35
Minimalna temperatura okoline	°C	-5

Tabela II Atmosferski uslovi u laboratoriji za visoki napon

Pritisak:	943 mm Hg
Temperatura suvog termometra:	6 °C
Apsolutna vlažnost vazduha	6%

Na svaki pol vakuumskog prekidača primenjuju se po 4 impulsa pozitivnog i negativnog polariteta izmerene amplitude: 125,126, 127 i 128 kV.

Rešenje:

$$U_0 = U / K_t = U / (\delta^m \cdot k^w)$$

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t_d} = \frac{943}{1013} \cdot \frac{273+20}{273+6} = 0,977$$

Količnik $h/\delta = 6,141$ služi za određivanje faktora uticaja vlažnosti vazduha k sa dijagrama po formuli za impulsna ispitivanja (za $1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 20 \text{ g/m}^3$):

$$k = 1 + 0,010(h/\delta - 11) = 0,952$$

Eksponenti m i w se mogu očitati sa Slike X ili izračunati iz Tabele kao funkcije parametra g :

$$g = \frac{U_0}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} = \frac{125 \cdot 10^3}{500 \cdot 0,21 \cdot 0,977 \cdot 0,952} = 1,28,$$

gde su:

$U_0 = 125 \text{ kV}$, naznačeni ispitni napon,

$L = 0,21 \text{ m}$, najkraće lučno rastojanje, pročitano sa crteža proizvođača.

$$g = 1,28$$

$$\rightarrow m = 1$$

$$\rightarrow w = \frac{(2,2 - g)(2,0 - g)}{0,8} = 0,4$$

$$K_t = \delta^m \cdot k^w = 0,977 \cdot 0,981 = 0,958$$

$$U_0 = U / K_t = U / 0,958$$

Tabela br. 2 - Izmerene vrednosti podnosivog napona tokom ispitivanja atmosferskim impulsnim naponom

POLARITET	Izmereni napon U [kV]	Stvarni napon $U_0 = U / K_t$ [kV]
+	125	130,5
+	126	131,5
+	127	132,5
+	129	134,6
-	125	130,5
-	126	131,5
-	127	132,5
-	128	133,6

