Prehodni pojavi

Vsebina: Stacionarno stanje – prehodni pojav, zveze med tokom in napetostjo na uporu, tuljavi in kondenzatorju, začetni pogoji, zapis in oblika rešitve diferencialne enačbe, polnenje in praznenje kondenzatorja in tuljave, časovna konstanta, »obrtniška metoda«, uporaba programov za analizo vezij.

Equation Chapter 1 Section 25Z analizo vezij pri priključenih enosmernih ali izmeničnih virih smo se že spoznali. Ugotovili smo, da ima pri linearnih vezjih – s katerimi se večinoma ukvarjamo – tok in napetost na elementih enako obliko kot napajalni viri. Če je vir izmeničen z določeno frekvenco, bo na vseh elementih vezja napetost in tok enake oblike, različna bo le amplituda in faza. Vendar smo pri tem vedno predpostavili, da so so viri priključeni že dolgo časa. Povsem drugačne razmere pa imamo v vezju ob priključitvi ali izklopu virov. V tem primeru pride do t.i. **prehodnega pojava**.

Prehodni pojavi. Prehodne pojave srečujemo na vsakem koraku. Dobesedno. Z drsenjem čevljev ob tla se le ti naelektrijo, ob vsakem stiku s tlemi pa razelektrijo. Če ostanemo naelektreni in se približevamo določenemu prevodnemu objektu (recimo kljuki) pride do razelektritve[1].

[1] Ta razelektritev nastopi pri napetostih 5 do 15 kV z maksimalnim tokom do 1 A. To je precejšen tok, ki pa traja izredno malo časa (reda μs), poleg tega je koncentriran le pri mestu nastopa razelektritve, potem pa se razširi na večje območje[1]. To neprijetnost lahko zmanjšamo z zmanjšanjem upornosti med telesom in zemljo. Ta upornost naj ne bi bila večja od 100 MΩ, kjer pa je verjetnost razelektritve posebno velika, pa naj ne bo manjša od 50 kΩ. V posebnih primerih (nevarnost explozij) je potrebno uporabiti oblačila, katerih upornost ne sme preseči veliksoti GΩ. V primeru naravnih materialov to običajno ni problem, je pa potrebno to upoštevati pri umetnih materialih[1]. Znan nam je tudi pojav razelektritve ob stiku s karoserijo avta, ki nas neprijetno strese. Še bolj neprijetno je lahko ob razelektritvi naboja nevihtnega oblaka. Zamislimo si razelektritev kondenzatorja, ki se naelektri na napetost med 10 MV in 100 MV. Tokovi razelektritve so velikosti nekaj deset do 150 kA, dogodek pa lahko traja nekaj sto mikrosekund[1]. Med zemljo in ionosfero je konstantna visoka napetost, zemlja pa je bolj pozitivno naelektrena. Sistem si lahko predstavljamo kot velikanski kondenzator s kapacitivnostjo 5000 F, ki se počasi polni preko »izgubne« upornosti ozračja.

Tako, kot se prehodni pojavi dogajajo v naravi, jih najdemo tudi pri čisto »elektrotehniških« problemih. Ti nas navsezadnje še najbolj zanimajo. Na primer polnenje praznega avtomobilskega akumulatorja. Pa tudi njegovo praznenje. Še več pojavov prehodnih pojavov lahko najdemo v avtomobilu. Morda najbolj zanimiv je vžigalni sistem s tuljavo z zelo velikim številom ovojev. Če skozi tuljavo teče enosmeren tok, je padec napetosti na tuljavi odvisen le od upornosti ovojev tuljave. Če pa ta tok v hipu prekinemo, pride do induciranja napetosti na tuljavi, ki je lahko ob hipni spremembi toka zelo velika, saj velja $u(t) = L\dfrac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$. Ob veliki induktivnosti in hipni spremembi toka je lahko napetost med kontaktoma tuljave tako velika, da pride do razelektritve s preskokom iskre. Ta pa povzroči malo eksplozijo stisnjenega bencina, ta premik bata in že smo na poti. S prehodnim pojavom imamo opravka pri vsakem električnem vezju, ki ga občasno priključimo na napajanje ali pa izklopimo. Elemente vezja je torej potrebno dimenzionirati tudi za delovanje pri teh razmerah in ne le v stacionarnem stanju.

Analiza prehodnega pojava. Za analizo prehodnega pojava se moramo vrniti k zvezam med napetostjo in tokom na elementih vezja. Še vedno veljata Kirchoffova zakona in osnovne zveze, kot so

UPOR: $$u(t) = R \cdot i(t) \quad \Leftrightarrow \quad i(t) = G \cdot u(t)$$

KONDENZATOR: $$u(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)\mathrm{d}t + u_{C0} \quad \Leftrightarrow \quad i(t) = C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}$$

TULJAVA: $$u(t) = L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} \quad \Leftrightarrow \quad i(t) = \frac{1}{L}\int_0^t u(t)\mathrm{d}t + i_{L0}$$

Postopek analize vezij pri prehodnem pojavu je sledeč:

Zapišemo enačbe vezja po preklopu z uporabo Kirchoffovih zakonov. Tako tvorimo sistem (ene ali več) diferencialnih enačb, ki jih je potrebno rešiti. V ta namen potrebujemo še t.i. začetne pogoje, to je stanje na elementih vezja tik po preklopu (ob začetku prehodnega pojava).[2]

[2] Že pri analizi vezij z izmeničnimi signali bi lahko zapisali sistem diferencialnih enačb in ga tudi reševali. Temu smo se elegantno izognili z vpeljavo kompleksorjev in kompleksnega računa, pri čemer

Začetni pogoji. Napetost na kondenzatorju je integral toka skozi kondenzator. Tudi če se tok skozi kondenzator hipoma spremeni (hipna sprememba pritekanja ali odtekanja naboja), se lahko napetost spremeni le postopoma, zvezno. To pa tudi pomeni, da bo morala biti **napetost na kondenzatorju tik pred spremembo enaka napetosti tik po spremembi**, kar lahko zapišemo kot

$$\boxed{u_C(0^+) = u_C(0^-)}. \tag{25.1}$$

Enako trditev ne moremo postaviti tudi za tok skozi kondenzator, le ta se lahko spremeni tudi hipoma.

Začetni pogoj za tok ali napetost na tuljavi ugotovimo s podobnim razmisekom, le da se **pri tuljavi ne more hipoma spremeniti tok skozi tuljavo** (lahko pa se napetost). Zato velja

$$\boxed{i_L(0^+) = i_L(0^-)} \tag{25.2}$$

Ta dva pogoja nam zadostujeta, da z razmislekom ugotovimo vrednost napetosti ali toka na poljubnih elementih v vezju tok ob prekopu.

Primer 1: Polnenje kondenzatorja. Ob času t = 0 priklopimo kondenzator in zaporedno vezan upor na enosmerni vir napetosti 12 V. Določimo časovni potek napetosti in toka na kondenzatorju. $R = 10\,\Omega$, $C = 100\,\mu\text{F}$.

SLIKA: Shema vezja

Izračun:

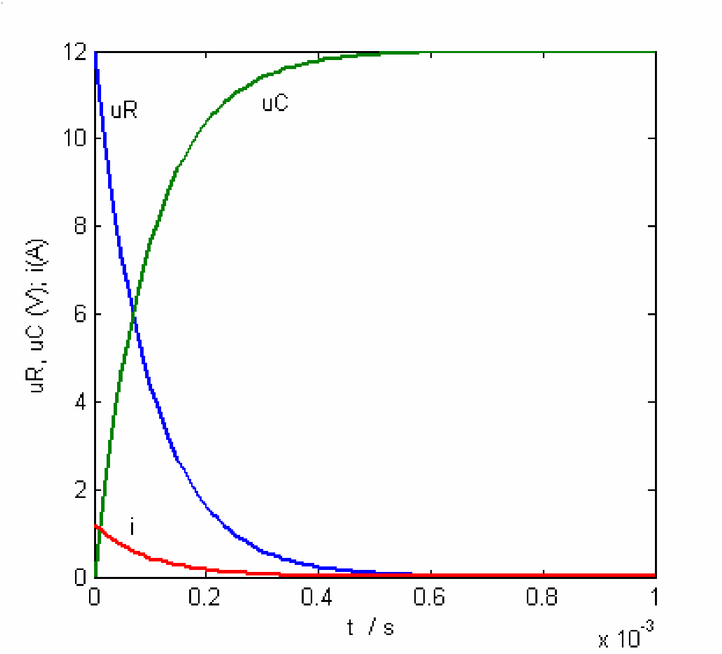
smo reševanje sistemov diferencialnih enačb prevedli v sistem navadnih algebrajskih enačb. Odvajanje je bilo ekvivalentno množenju z $j\omega$, integracija pa deljenju z $j\omega$: $\left(\frac{1}{j\omega}\right)$.

Uporabimo 2 Kirchoffov zakon $U_g = u_R(t) + u_C(t)$ in zvezi med tokom in napetostjo na uporu in kondenzatorju $U_g = iR + \frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t$. Z odvajanjem dobimo diferencialno enačbo za tok skozi kondenzator[3] $0 = R\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{i}{C}$. Dobimo diferencialno enačbo prvega reda s konstantnima koeficientoma, pa še homogeno povrhu (levi del je enak nič). Načinov reševanje takih enačb je več, predvsem pa pri enostavnih sistemih diferencialnih enačb poznamo nastavek za rešitev. Pri tovrstnih diferencialnih enačbah so rešitve eksponentne funkcije, zato si lahko obetamo rešitev toka v obliki $i = Ae^{\lambda t}$. Ta nastavek uvrstimo v diferencialno enačbo in dobimo $\left(\lambda + \frac{1}{RC}\right)Ae^{\lambda t} = 0$.

Očitno bo enačbi zadoščeno, če bo $\lambda = -\frac{1}{RC}$, rešitev pa bo oblike $i(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$, kjer je $\boxed{\tau = RC}$. Tau ima enoto časa, zato mu tudi pravimo **časovna konstanta**.

Določiti moramo še konstanto A. V ta namen moramo upoštevati začetni pogoj, ki ga dobimo ob upoštevanju enačb (25.1). Ker bo napetost na kondenzatorju pred začetkom prehodnega pojava enaka kot tik po preklopu, bo $u_C(0^+) = 0\,\mathrm{V}$, torej bo vsa napetost na uporu $u_R(0^+) = U_g$, tok pa bo enak $i(0^+) = \frac{u_R}{R} = \frac{U_g}{R}$. To pa je začetni pogoj, ki ga potrebujemo za dokončno rešitev. Vstavimo ga v nastavek in dobimo $i(0^+) = \frac{U_g}{R} = A$. Rešitev bo torej $i(t) = \frac{U_g}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$. Napetost na uporu je sorazmerna temu toku, napetost na kondenzatorju pa lahko dobimo z integracijo toka v skladu z enačbo ali pa kar kot razliko priključene napetosti in napetosti na uporu. Enaka bo $u_C(t) = U_g\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$.

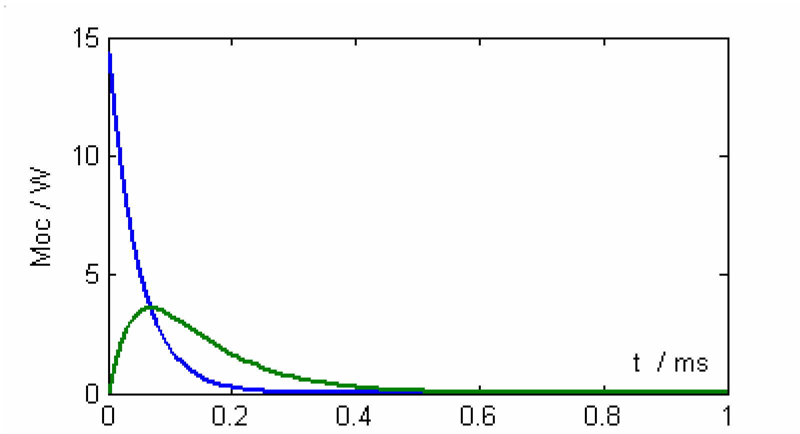
[3] Ta tok običajno imenujemo kar polnilni tok, saj pri tem prehodnem pojavu elektrimo kondenzator z nabojem. Naboj je sorazmeren napetosti na kondenzatorju, saj velja $Q(t) = C \cdot u(t)$).



SLIKA: Prikaz napetosti na uporu in kondenzatorju (uR) in (uC) ter toku pri prehodnem pojavu polnenja kondenzatorja preko upora.

Časovna konstanta. Za zgornji primer je časovna konstanta 100 µs. V tem času pade napetost na uporu za $e^{-\frac{\tau}{\tau}} = e^{-1}$ ali na 37 % začetne vrednosti[4]. V času 2τ pade na 13,5 % in v času 5τ že pod 1 % začetne vrednosti. Časovno konstantno dobimo lahko tudi iz naklona signala v času t = 0 (ob preklopu).

Močnostne razmere. Moč na uporu je $p_R(t) = i^2 R$, na kondenzatorju pa $p_C(t) = i_C \cdot u_C = Cu\dfrac{du}{dt}$.

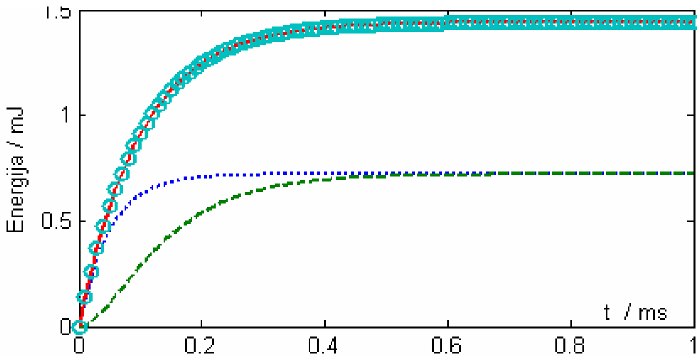


[4] V primeru, da signal narašča, predstavlja tau čas, v katerem signal doseže cca. 63% končne vrednosti signala

SLIKA: Moč na uporu (modra) upada s tokom, na kondenzatorju (zelena) pa narašča, doseže maksimum in upada proti nič.

Energijske razmere. Energija na uporu, ki predstavlja Joulske izgube, je enaka $W_R(t)=\int_0^t Ri^2\mathrm{d}t=\frac{U_g^2C}{2}\left(1-e^{-\frac{2t}{\tau}}\right)$, na kondenzatorju pa

$$W_C(t)=C\frac{u_C^2}{2}=\frac{CU_g^2}{2}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)^2.$$



SLIKA: Energijske razmere pri polnjenju kondenzatorja: Energija na kondenzatorju (črtkana črta) narašča, naraščajo pa tudi joulske izgube (pikčasta črta) na uporu. Vsota (polna rdeča črta) je energija, ki je enaka energiji, ki jo elementom zagotavlja vir (krogci).

Primer 2: Praznenje kondenzatorja. Vzemimo, da se je kondenzator polnil do časa $t=2\tau$, nato pa vir odklopimo in ga hkrati preklopimo na upor R_2= 100 Ω. Določimo tok praznenja in napetost na kondenzatorju.

SLIKA vezja.

<u>Izračun:</u> Poteka podobno kot v prejšnjem primeru. Dobimo enačbo $0=\left(R_1+R_2\right)\frac{di}{dt}+\frac{i}{C}$. Rešitev bo enake oblike, torej $i(t)=Ae^{-\frac{t}{(R_1+R_2)C}}=Ae^{-\frac{t}{\tau}}$, kjer pa bo sedaj časovna konstanta daljša, enaka 1,1 ms (prej 0,1 ms). Drugačen je začetni pogoj, saj bo sedaj ob preklopu ostala napetost na kondenzatorju nespremenjena in enaka $u_C(t=2\tau)=U_g\left(1-e^{-2}\right)\approx 0{,}86\cdot U_g$. Ta napetost bo ¨v trenutku preklopa tudi enaka napetosti na obeh uporih, torej bo tok v času $t(2\tau)$ enak

$i(2\tau^{+}) = \dfrac{0{,}86 \cdot U_g}{R_1 + R_2} = \dfrac{0{,}86 \cdot 12\,\mathrm{V}}{110\,\Omega} \approx 0{,}094\,\mathrm{A}$. Konstanta A bo torej $i(2\tau) = Ae^{-\frac{2\tau}{(R_1+R_2)C}} = Ae^{-2} = 0{,}094\,\mathrm{A} \Rightarrow A = 0{,}697\,\mathrm{A}$. Tok bo torej $i(t) = 0{,}697 e^{-\frac{t}{(R_1+R_2)C}}\,\mathrm{A}$. Napetost na uporoma bo enaka napetosti na kondenzatorju $u_R(t) = u_C(t) = 76{,}67 e^{-\frac{t}{\tau}}\,\mathrm{V}$.

<u>Dodatno</u>: Ob času $t = 4\tau$ zopet vklopimo generator preko upora 10 Ω. Kakšen je sedaj potek polnenja?

<u>Izračun:</u> Začetni pogoj je napetost na kondenzatorju $u_C(t = 4\tau) = 78{,}67 e^{-\frac{4\tau}{\tau}}\,\mathrm{V} = 1{,}44\,\mathrm{V}$. ....

Oglejte situdi primer simulacije s programom Spice na koncu poglavja. Prvi primer je ravno simulacija polnenja in praznenja kondenzatorja, ki je priključen na vir napetosti s periodičnimi pulzi.

Primer 3: **Vklop tuljave.** Poglejmo še primer vklopa tuljave in zaporedno vezanega upora na enosmerno napetost U_g ob času t = 0 s.

SLIKA vezja.

Ob vklopu bo napetost generatorja enaka vsoti napetosti na uporu in tuljavi:

$U_g = u_R(t) + u_L(t) = iR + L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$. Dobili smo diferencialno enačbo prvega reda s konstantnima koeficientoma – nehomogeno. Rešitev homogene enačbe zopet iščemo v obliki $i = Ae^{\lambda t}$ in dobimo $\left(\lambda + \frac{R}{L}\right)Ae^{\lambda t} = 0$, od koder je $\lambda = -\frac{R}{L}$ in $i = Ae^{-\frac{t}{L/R}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$. Tau je **časovna konstanta** in je enaka $\boxed{\tau = \frac{L}{R}}$.

Zopet potrebujemo začetni pogoj, ki bo sedaj tok skozi tuljavo, ki mora ostati nespremenjen tudi ob preklopu. Ker je bil ob preklopu enak nič, mora biti torej $i(0^+) = 0\,\mathrm{A}$. Če to vstavimo v enačbo $0 = Ae^0$ dobimo A=0, kar očitno ne bo v redu. Pozabili smo namreč na rešitev nehomogenega dela enačbe. En od načinov je reševanje z variacijo konstante, kjer postane konstanta *A* funkcija časa *A*(t). Z odvajanjem take enačbe in uvrstitvijo v diferencialno enačbo dobimo $U_g = R\left(Ae^{\lambda t}\right) + L\left(A'(t)e^{\lambda t} + \lambda Ae^{\lambda t}\right) = LA'(t)e^{\lambda t}$ oziroma $A' = \frac{U_g}{L}e^{-\lambda t}$. Z integracijo konstante dobimo $A = \frac{1}{-\lambda}\frac{U_g}{L}e^{-\lambda t} + B = \frac{U_g}{R}e^{-\lambda t} + B$. Rešitev torej iščemo v obliki $i = Ae^{\lambda t} = \frac{U_g}{R} + Be^{\lambda t}$. Konstanto B sedaj določimo iz začetnega pogoja (tok enak nič) in bo torej enaka $B = -\frac{U_g}{R}$. Končni rezultat je torej $i = Ae^{\lambda t} = \frac{U_g}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$. Napetost na uporu je sorazmerna temu toku, napetost na tuljavi pa odvodu toka: $u_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = U_g e^{-\frac{t}{\tau}}$.

<u>Drugi način reševanja:</u>

Diferencicalno enačbo zapišemo v obliki $i - \frac{U_g}{R} = -\frac{L}{R}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ in jo delimo z $iR - U_g$ in množimo z d*t*: $\frac{\mathrm{d}i}{i - \frac{U_g}{R}} = -\frac{R}{L}\mathrm{d}t$. Sedaj jo integriramo in dobimo $\int_{i(0^+)}^{i(t)} \frac{\mathrm{d}i}{i - \frac{U_g}{R}} = -\frac{R}{L}\int_0^t \mathrm{d}t$

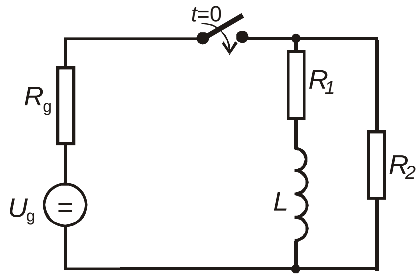
Rezultat je $\dfrac{i(t)-\dfrac{U_g}{R}}{i(0^+)-\dfrac{U_g}{R}}=e^{-\frac{t}{\tau}}$, po preureditvi in upoštevanju začetnega pogoja $i(0^+)=0\text{A}$ pa dobimo $i(t)=\dfrac{U_g}{R}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$. Rezultat je seveda identičen kot v prejšnjem primeru.

»Obrtniška metoda«

Ugotovili bi lahko, da prehodni pojav v primeru uporabe le enega kondezatorja ali tuljave v vezju vedno lahko zapišemo v obliki diferencialne enačbe prvega reda (s konstantnimi koeficienti), katere **rešitev je vedno oblike** $Ae^{-\frac{t}{\tau}}+B$. Določiti moramo le konstanti *A*, *B* in časovno konstanto τ.

Eno od konstant dobimo iz začetnega pogoja, drugo pa lahko določimo s premislekom o razmerah po prehodnem pojavu – v stacionarnem stanju. Tedaj bodo v primeru vklopa ali izklopa enosmernega napajanja nastopile enosmerne razmere, v katerih ostane le še vpliv ohmskih upornosti. Upornost kondenzatorja je v idealnih enosmernih razmerah neskončna – skozenj ni toka. Upornost tuljave v enosmernih razmerah pa je le v smislu upornosti navitja. To upornost pri idealni tuljavi zanemarimo. Napetost na tuljavi pri enosmernih razmerah je torej enaka nič. Z upoštevanjem teh lastnosti na enostaven način ugotovimo poljubno napetost ali tok ob koncu prehodnega pojava. Ugotoviti moramo le še časovno konstanto τ, ki pa bo vedno oblike *RC* ali *L/R*, pri čemer bo R notranja (Theveninova) upornost gledana s sponk kondenzatorja ali tuljave. Prikažimo uporabo tega načina reševanja na naslednjem primeru.

Primer 4: Določimo tok skozi tuljavo med prehodnim pojavom za vezje na sliki. $R_g=10\Omega$, $R_1=20\Omega$, $R_2=40\Omega$, $L=20\text{mH}$, $U_g=10\text{V}$



Začetni pogoj določimo iz toka skozi tuljavo tik ob preklopu, ki bo enak kot tik pred preklopom, torej 0 A. Ko bo prehodni pojav izzvenel, bo tok skozi upor R_g

$i_g(t \to \infty) = \frac{U_g}{R_g + R_1 \| R_2} = \frac{10\,\mathrm{V}}{10\Omega + \frac{20 \cdot 40}{60}\Omega} = 0,4286\,\mathrm{A}$. Tok skozi tuljavo pa bo

$i_L(t \to \infty) = 0,4286 A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx 0,29\,\mathrm{A}$. Tok skozi tuljavo ob začetku prehodnega pojava bo torej enak nič, na koncu pa 0,29 A.¨Ta pogoja vstavimo v nastavek in dobimo

$$\begin{aligned} 0 &= A + B \\ 0,29 &= B \end{aligned}.$$

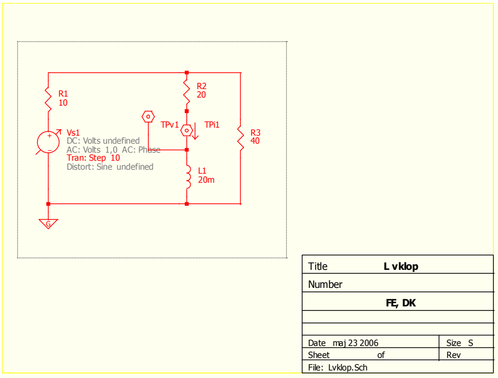
Tok skozi tuljavo bo torej enak $i_L(t) = \underline{\underline{0,29(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}}\,\mathrm{A}$.

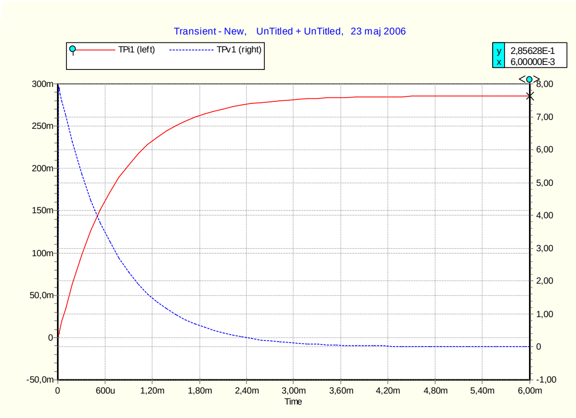
Časovna konstanta določena z »obrtniško metodo«. Ugotovili smo, da je pri vklopu ali izklopu kondenzatorja časovna konstanta vedno oblike $\tau = RC$, pri vklopu ali izklopu tuljave pa bo oblike $\tau = L / R$. Sedaj moramo to ugotoviltev le še posplošiti. Če imamo opravka le z enim od reaktivnih elementov, bo R enak upornosti Thevenina, gledano s sponk reaktivnega elementa (kondenzatorja ali tuljave), torej bo splošna oblika $\tau = R_{Th} C$ ali $\tau = \frac{L}{R_{Th}}$.

V konkretnem primeru je $\tau = \frac{L}{R_{Th}}$, kjer je $R_{Th} = R_g \| R_2 + R_1 = \frac{10 \cdot 40}{50}\Omega + 20\Omega = 28\Omega$.

Časovna konstanta je torej $\tau \approx 0,71\,\mathrm{ms}$.

Analiza s programi za simualcijo vezij - SPICE. V srednjih šolah je za simulacijo vezij precej popularen program Electronic WorkBench (EWB), bolj izpopolnjena in profesionalna varianta pa je program SPICE. Obstaja mnogo verzij programa, nekatere od njih so brezplačne, druge plačljive. Eno od verzij programa (SPICE OPUS) razvijajo tudi na naši fakulteti (fides.fe.uni-lj.si/spice). SPICE omogoča različne načine simulacije, enosmerno, izmenično, tranzientno (prehodni pojavi), pogosto pa omogoča tudi simulacijo šumnih lastnosti, Fourierove analize, analizo občutljivosti itd. Omogoča simulacijo množice različnih elementov, od linearnih do nelinearnih, sklopljenih, pogosto pa omogoča uporabo že prednastavljenih modelov. Nekatere za lažje delo podajo že proizvajalci elementov. Tu predstavljam primer uporabe programa 5Spice, ki je posebno primeren za začetniško uporabo, saj omogoča grafično postavitev elementov vezja in je v osnovni verziji brezplačen za uporabo (www.5spice.com).



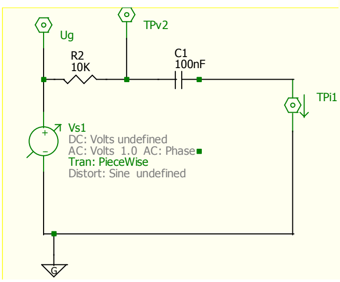


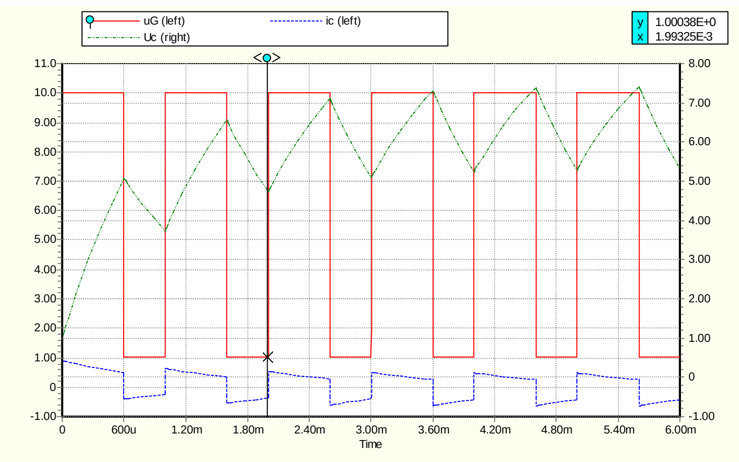
SLIKA: Grafično oblikovanje analiziranega vezja s programom 5Spice.

SLIKA: Primer vklopa induktivnega bremena. Na sliki tok skozi tuljavo (rdeča polna črta) in napetost na tuljavi (modra črtkana črta). Slika dobljena s simulacijo s programom 5Spice.

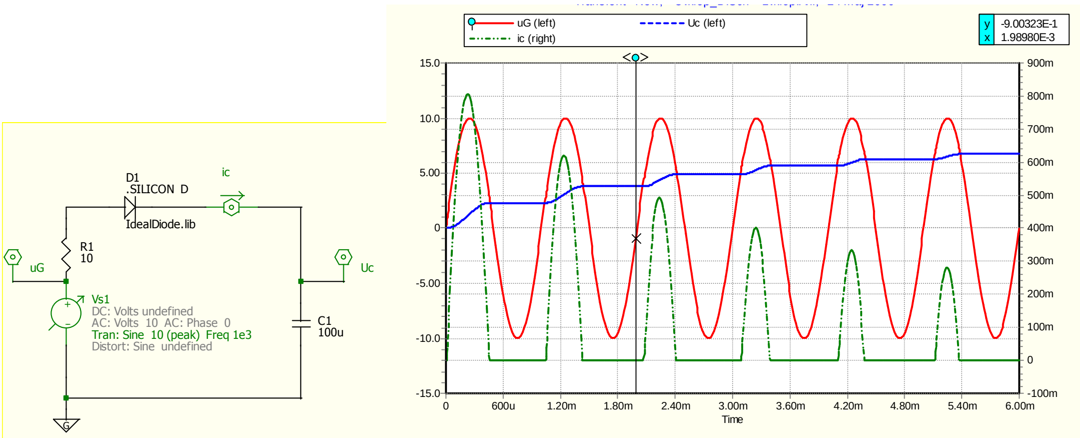
Prikažimo še nekaj primerov analize prehodnih pojavov s programom 5Spice:

1) Priklop zaporedno vezanega kondenzatorja na napetostni generator pravokotnih pulzov amplitude 10V. Na sliki napetost na generatorju (polna redeča črta), tok v vezju (modra črtkana) in napetost na kondenzatorju (zelena črtkana). Napetost na kondenzatorju v času trajanja pulza eksponentno narašča v skladu s spoznanimi enačbami, v času izklopa pa upada. V začetku narašča napetost na kondenzatorju hitreje (ker je kondenzator prazen), v nekaj periodah pa se začne ponavljati. V času praznenja kondenzatorja se smer toka spremeni. Tok skozi kondenzator se spreminja skokovito, napetost pa zvezno.

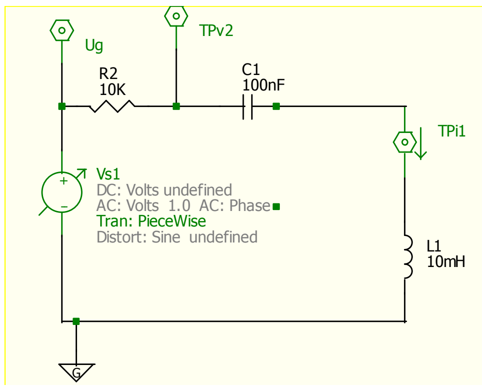




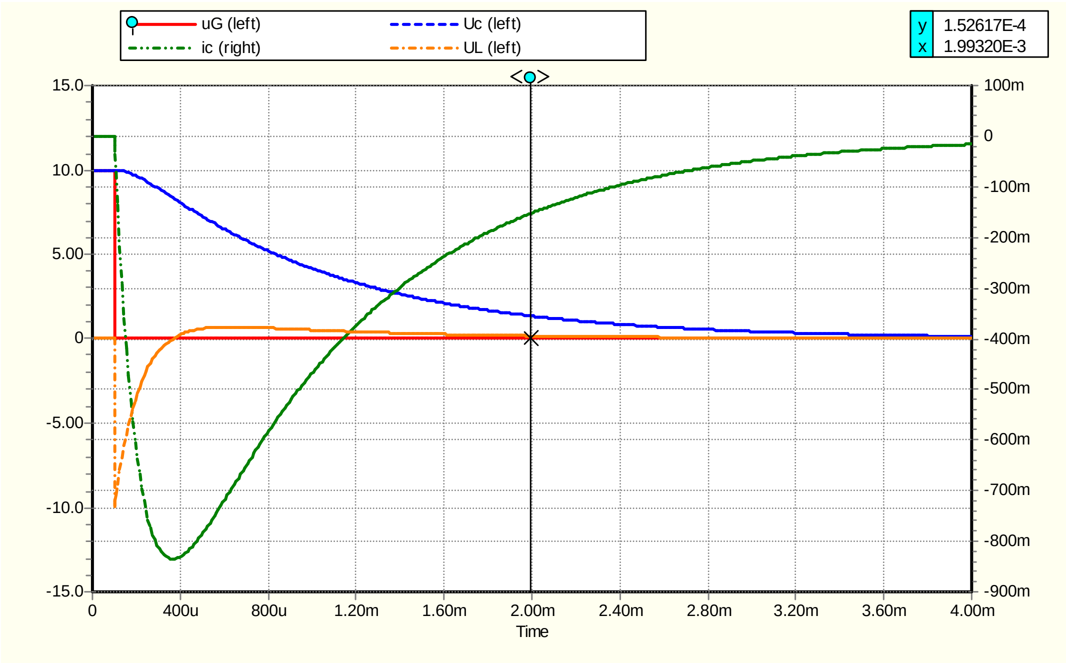
2.) Polnenje kondenzatorja pri zaporedni vezavi upora in kondenzatorja ter diode priključene na izmenični vir napetosti amplitude 10 V (polna rdeča črta). V pozitivni polperiodi dioda prevaja, napetost na kondenzatorju raste (polna modra črta). V negativni polperiodi dioda ne prevaja – tok je enak nič (črtkana zelena črta), ves padec napetosti je na diodi, napetost na diodi ostaja enaka. V realnih razmerah napetost na kondenzatorju v negativni polperiodi nekoliko pada zaradi neidealnega kondenzatorja in zapornega toka diode, ki je majhen vendar različen od nič.

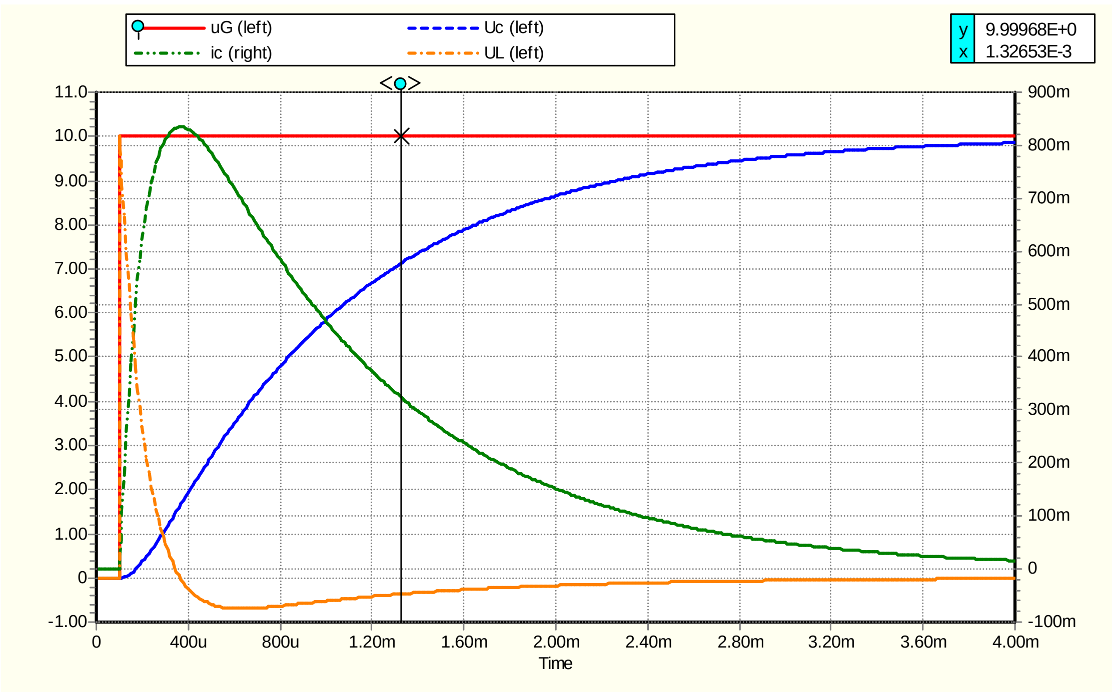


3) **Odklop in vklop enosmernega vira od zaporedne vezave upora, kondenzatorja in tuljave.**

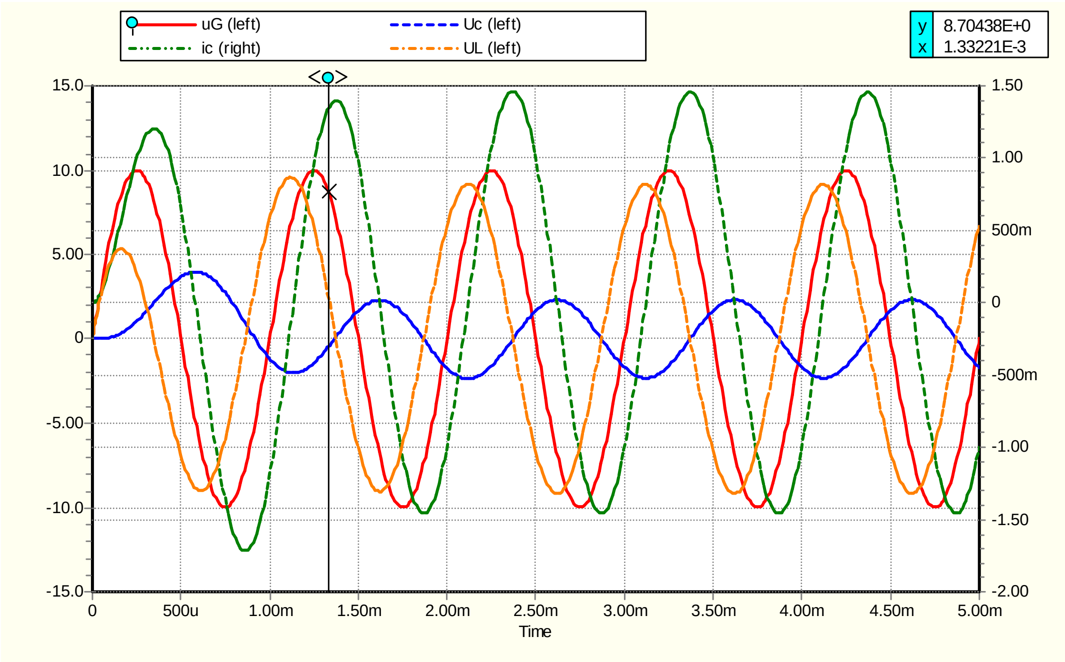


Ob vklopu začne strmo naraščati tok v vezju (zelena črtkana črta), obenem pa močno naraste napetost na tuljavi (oranžna črtkana črta). Tok doseže svoj maksimum in nato pade zlagoma na nič amperov. Napetost na kondenzatorju (polna modra črta) je nič ob vklopu in ob koncu prehodnega pojava doseže napetost vira.


uG (left)
Uc (left)
ic (right)
UL (left)
y 1.52617E-4
x 1.99320E-3
15.0
10.0
5.00
0
-5.00
-10.0
-15.0
100m
0
-100m
-200m
-300m
-400m
-500m
-600m
-700m
-800m
-900m
0
400u
800u
1.20m
1.60m
2.00m
2.40m
2.80m
3.20m
3.60m
4.00m
Time

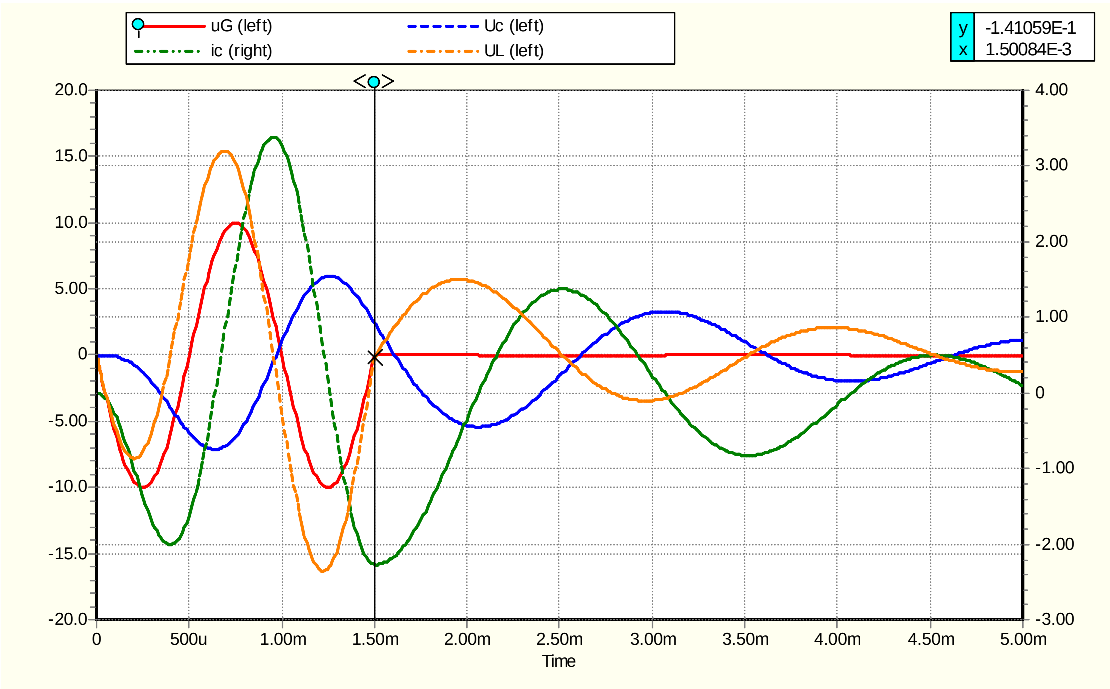

uG (left)
Uc (left)
ic (right)
UL (left)
y 9.99968E+0
x 1.32653E-3
11.0
10.0
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0
-1.00
900m
800m
700m
600m
500m
400m
300m
200m
100m
0
-100m
0
400u
800u
1.20m
1.60m
2.00m
2.40m
2.80m
3.20m
3.60m
4.00m
Time

4) Vklop izmeničnega vira na zaporedno vezavo upora, tuljave in kondenzatorja.



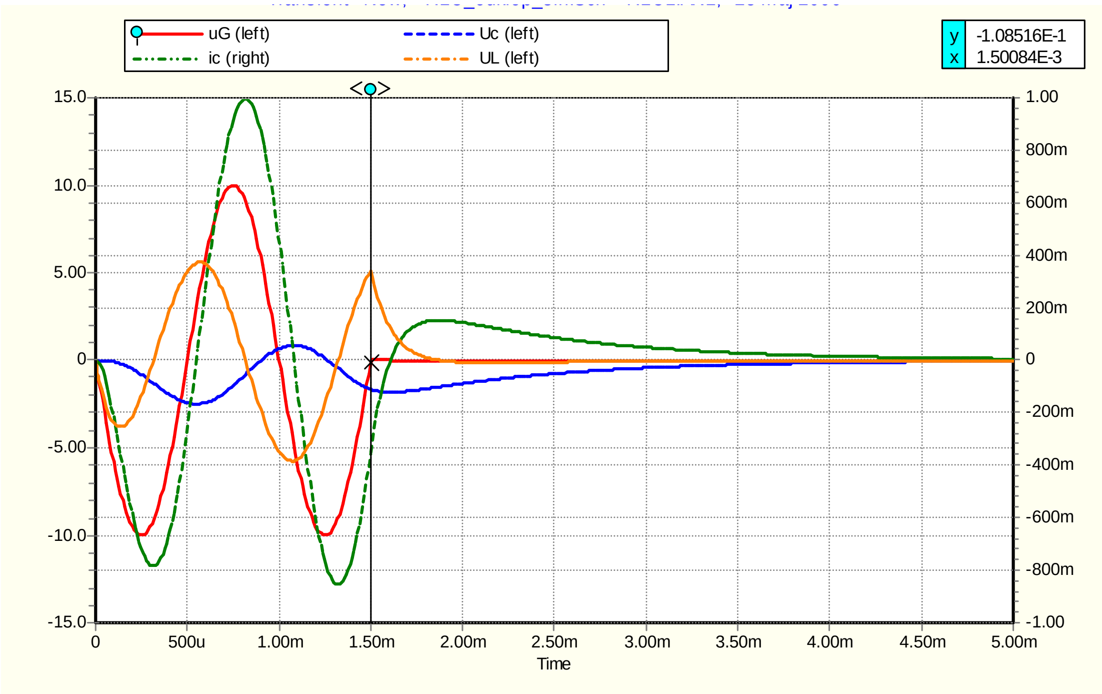
5) Izklop izmeničnega vira na zaporedno vezavo upora, tuljave in kondenzatorja

. (R=1 Ω, L=1 mH, C = 100 µF).



6) Izklop izmeničnega vira na zaporedno vezavo upora, tuljave in kondenzatorja.

(R=10 Ω, L=1 mH, C = 100 μF). 10x večja upornost povzroči nadkritično nihanje.



Vprašanja za obnovo:

1) Kaj je to prehodni pojav? Kdaj nastopi?
2) Prehodni pojav v vezjih: kako ga zapišemo z enačbami?
3) Osnovne zveze med tokom in

okvijskih in izpitnih nalog:

6.2000, 2 kolokvij 12.04.2001, Izpit 03. 12. 2002, Izpit 20. aprila 2005, izpit 17.
pit 13. september 2005, IZPIT 14. 09. 2004.