

## Техника на висок напон 2

# СИМУЛАЦИЈА НА ПРОСТИРАЊЕ НА БРАНОВИ ПО ВОДОВИ СО ПОМОШ НА MATLAB/SIMULINK

М. Тодоровски

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

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

Скопје, 2015

# Вовед

- Решавањето на преодните процеси при комутационите и атмосферските пренапони во ЕЕС се сведува на решавање на системи диференцијални равенки од прв ред,
- Решенијата на диференцијалните равенки се функции со кои што е дадена временската промена на одредена големина (напон, струја),
- Егзактното решавање на диференцијалните равенки ги дава овие функции во аналитички облик кој често содржи сложени изрази,
- Инженерскиот пристап кон добивањето на решението е биде поинаков затоа е сосема доволно да го познаваме решението дадено во нумерички облик (вектори со броеви) од кој што можеме да ги извлечеме сите потребни заклучоци,

# Нумеричко решавање на системи диференцијани равенки

Во Matlab постојат повеќе методи за нумеричко решавање на системи диференцијани равенки од прв ред како што се **ode23, ode45, ode113, ode15s, ode23s, ode23t и ode23tb**.

Сите се повикуваат идентично и се наменети за решавање на системи диференцијални равенки од прв ред од следниот облик

$$\frac{dy_1}{dt} = f_1(t, y_1, y_2, \dots, y_n),$$

$$\frac{dy_2}{dt} = f_2(t, y_1, y_2, \dots, y_n),$$

$\vdots$

$$\frac{dy_n}{dt} = f_n(t, y_1, y_2, \dots, y_n).$$

## Пример 7.1

Да се реши следната диференцијална равенка

$$\frac{dy}{dt} = t^2 - y \cdot t,$$

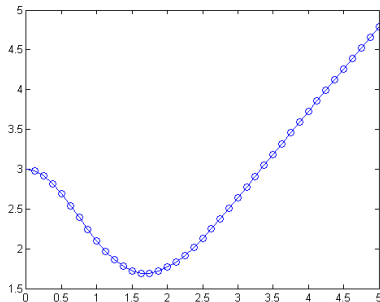
за  $0 \leq t \leq 5$  ако е познато дека почетната вредност на зависната променлива изнесува  $y(0) = 3$ .

Броевите на примерите се според материјалот даден на следната локација:

[pees.feit.ukim.edu.mk/predmeti/upatstvo\\_zatmatlab.zip](http://pees.feit.ukim.edu.mk/predmeti/upatstvo_zatmatlab.zip)

# Пример 7.1 - решение

```
f = inline('t^2 - y*t')  
ode45(f, [0 5], 3)
```



```
[t, y] = ode45(f, [0 5], 3)  
plot(t, y)
```

## Пример 7.2

Да се реши следниот систем диференцијални равенки

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} &= \sin t - y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= y_1 - \sin t,\end{aligned}$$

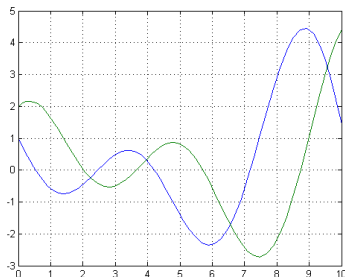
за  $0 \leq t \leq 10$  ако е познато дека почетните вредности на зависните променливи изнесуваат  $y_1(0) = 1$  и  $y_2(0) = 2$ .

# Пример 7.2 - решение

```
1 function y = izvodi_primer_7_2(t, y)
2 y = [
3     sin(t) - y(2)
4     y(1) - sin(t)
5 ];
```

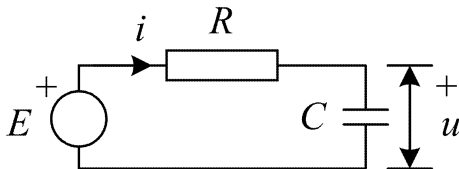
primer\_7\_2.m

```
1 [t, y] = ode45(@izvodi_primer_7_2, [0 10], [1 2]);
2 plot(t, y); grid
```



## Пример 7.3

Разгледуваме RC коло кое што е приклучено на генератор со константен напон  $E$ . Потребно е да го определиме и нацртаме временскиот тек на напонот  $u(t)$  за следните бројни вредности  $R = 1000 \Omega$ ;  $C = 100 \mu\text{F}$  и  $E = 12 \text{ V}$ . Кондензаторот на почетокот бил празен.



$$E = u + Ri, \quad i = C \frac{du}{dt}, \quad E = u + RC \frac{du}{dt}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{E - u}{RC}$$

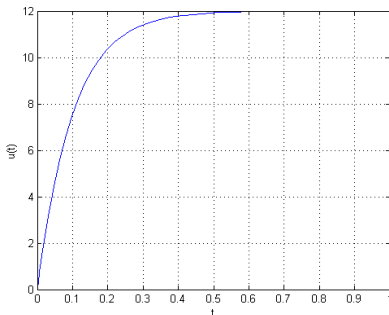


# Пример 7.3 - решение

```
1 function dudt = RC(t, u, R, C, E)
2 dudt = (E-u)/(R*C);
```

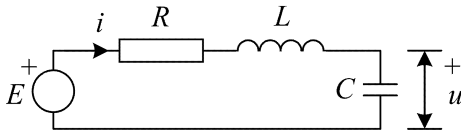
primer\_7\_3.m

```
1 R = 1000; C = 100e-6; E = 12;
2 [t,u] = ode45(@RC, [0 1], 0, [], R, C, E);
3 plot(t,u); xlabel('t'); ylabel('u(t)'); grid
```



## Пример 7.4

Разгледуваме RLC коло кое што е приклучено на генератор со константен напон  $E$ . Потребно е да ги определиме и нацртаме временскиот тек на напонот  $u(t)$  и струјата  $i(t)$  за следните бројни вредности  $R = 3,6 \Omega$ ;  $L = 0,57 \text{ H}$ ;  $C = 100 \mu\text{F}$  и  $E = 12 \text{ V}$ . Кондензаторот на почетокот бил празен, а струјата во калемот била еднаква на нула.



$$E = u + Ri + L \frac{di}{dt}, \quad i = C \cdot \frac{du}{dt}$$

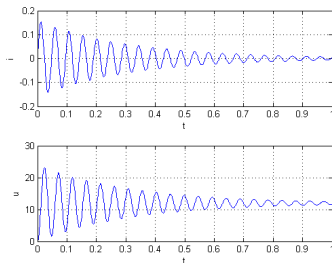
$$\frac{di}{dt} = \frac{E - Ri - u}{L}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$$

# Пример 7.4 - решение

```
1 function dydt = RLC(t, y, R, L, C, E)
2 dydt = [
3     (E - R*y(1) - y(2)) / L
4     y(1) / C
5 ];
```

primer\_7\_4.m

```
1 R = 3.6; L = 0.57; C = 100e-6; E = 12;
2 [t,y] = ode45(@RLC, [0 1], [0 0], [], R, L, C, E);
3 subplot(2, 1, 1), plot(t, y(:,1)); xlabel('t'); ylabel('i'); grid
4 subplot(2, 1, 2), plot(t, y(:,2)); xlabel('t'); ylabel('u'); grid
```



```
>> [y_max, i] = max(abs(y))
y_max =
    0.1531    23.1352
i =
    25    32
>> t_max = t(i)'
t_max =
    0.0119    0.0237
```

## Пример 7.4а

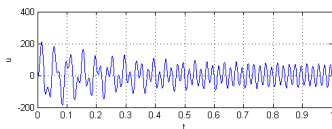
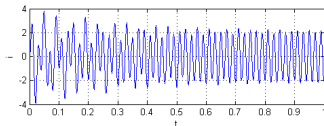
Да се реши примерот 7.4 ако напонскиот генератор го има следниот облик:  $e = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(2\pi ft)$ , каде што  $E = 220\text{V}$  и  $f = 50\text{ Hz}$ .

# Пример 7.4а - решение

```
1 function dydt = RLC1(t, y, R, L, C, E)
2 dydt = [
3     (sqrt(2) * E * sin(100*pi*t) - R*y(1) - y(2)) / L
4     y(1) / C
5 ];
```

primer\_7\_4a.m

```
1 R = 3.6; L = 0.57; C = 100e-6; E = 220;
2 [t,y] = ode45(@RLC1, [0 1], [0 0], [], R, L, C, E);
3 subplot(2, 1, 1), plot(t, y(:,1)); xlabel('t'); ylabel('i'); grid
4 subplot(2, 1, 2), plot(t, y(:,2)); xlabel('t'); ylabel('u'); grid
```



```
>> [y_max, i] = max(abs(y))
y_max =
    3.8946    209.8922
i =
    28    22
>> t_max = t(i)'
t_max =
    0.0207    0.0144
```

## Пример 7.4b

Да се реши примерот 7.4 користејќи ја можноста за добивање аналитичко решение во Matlab.

primer\_7\_4b.m

```
1 syms u i
2 [i, u] = dsolve('0.57*Di + 3.6*i + u = 12, i = 100e-6*Du', 'u(0) =
    0, i(0) = 0')
3 fplot(char(u), [0 1]); grid
```

$$u(t) = 12 - 12 \cos\left(\frac{20\sqrt{142419}t}{57}\right) e^{-\frac{60t}{19}} - \frac{36\sqrt{142419}}{47473} \sin\left(\frac{20\sqrt{142419}t}{57}\right) e^{-\frac{60t}{19}}$$
$$i(t) = \frac{20\sqrt{142419}}{47473} \sin\left(\frac{20\sqrt{142419}t}{57}\right) e^{-\frac{60t}{19}}$$

## Пример 7.4b - максимум

`simplify(diff(u))`

$$\frac{du}{dt} = \frac{200000 \sqrt{142419}}{47473} \sin\left(\frac{20 \sqrt{142419} t}{57}\right) e^{-\frac{60t}{19}}$$

$$\sin\left(\frac{20 \sqrt{142419} t}{57}\right) = 0 \Rightarrow t_{\max} = \frac{57\pi}{20\sqrt{142419}} = 0,0237 \text{ s}$$

$$u(t_{\max}) = 23,1338 \text{ V}$$

## Пример 7.4с

Да се пресметаат сопствените фреквенции за примерот 7.4.

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - Ri - u}{L}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$$

$$\begin{bmatrix} di/dt \\ du/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E/L \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} i \\ u \end{bmatrix} + \mathbf{b}$$

primer\_7\_4c.m

```
1 R = 3.6; L = 0.57; C = 100e-6;  
2 A = [-R/L -1/L; 1/C 0];  
3 s = eig(A)
```

s =

1.0e+002 \*

-0.0316 + 1.3242i

-0.0316 - 1.3242i

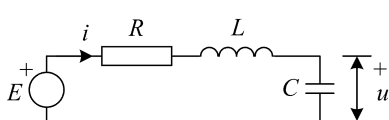
$$-\frac{60}{19} = -3,1579$$

$$\frac{20\sqrt{142419}}{57} = 132,4156$$



## Пример 7.4d

Да се реши примерот 7.4 користејќи Лапласова трансформација



$$U = \frac{E}{s} \frac{\frac{1}{Cs}}{R + Ls + \frac{1}{Cs}} = \frac{E}{s} \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} =$$
$$= \frac{12}{s} \frac{1}{57 \cdot 10^{-6} s^2 + 360 \cdot 10^{-6} s + 1}$$

primer\_7\_4d.m

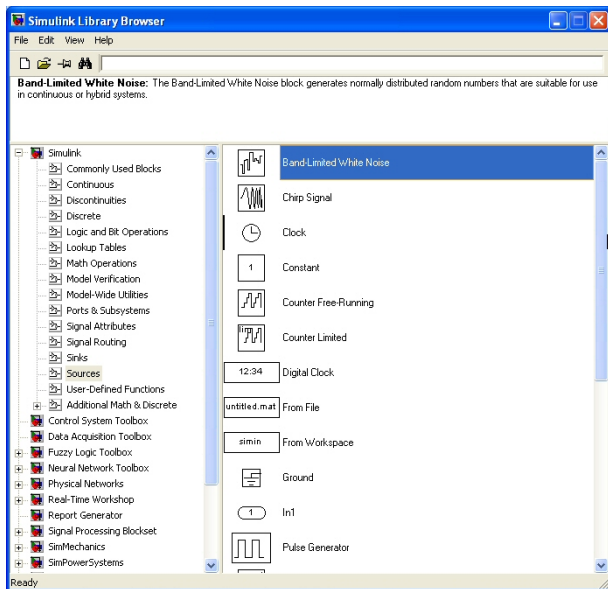
```
1 syms s
2 U = 12/s/(57e-6*s^2+360e-6*s+1);
3 u = ilaplace(U);
4 fplot(char(u),[0 1]); grid
5 u = vpa(u,6)
```

$$u(t) = 12 - 12 [\cos(132,416 t) + 0,0238484 \sin(132,416 t)] e^{-3,15789 t}$$

# Simulink

- Simulink е модул во Matlab наменет за симулација на динамички процеси во разни системи со примена на графички начин на работа,
- Решавање на електрични кола се прави со формирање на модел на колото со користење на готови блокови (графички симболи) со кои се моделираат одделните елементи на колото (напонски и струјни генератори, отпорници, калеми, кондензатори и нелинеарни елементи),
- Основната предност е едноставноста во претставувањето на проблемот кој што треба да се реши и можноста за прикажување на резултатите на повеќе начини.
- Се активира со помош на командата `simulink` која што треба да се напише во командниот простор во Matlab.

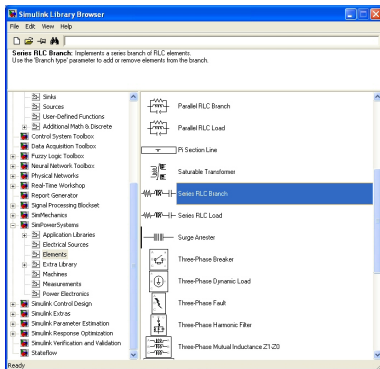
# Основни блокови во Simulink



# Пример 8.1

Да се реши RC колото од примерот 7.3 со користење на елементи од множеството SimPowerSystems.

- File → New → Model → прозорец за цртање на колото,
- SimPowerSystems → Elements → Series RLC Branch → влечеме врз прозорецот за цртање,

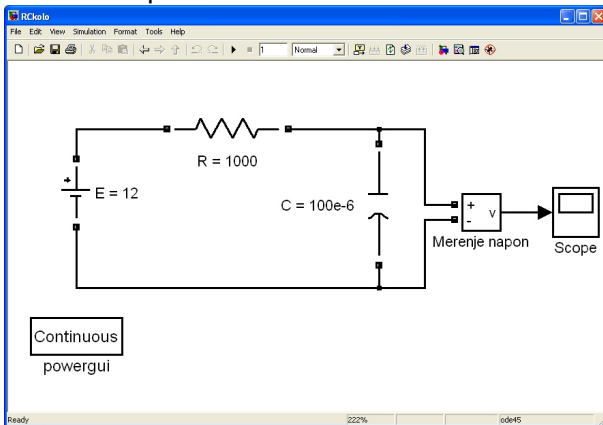


# Пример 8.1 - модел (RCkolo.mdl)

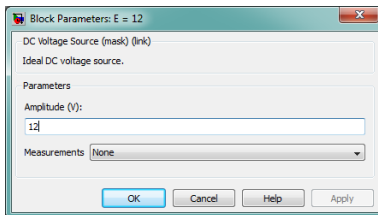
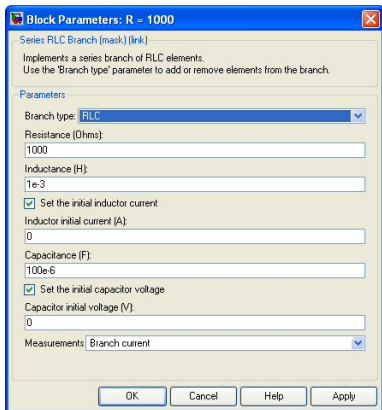
SimPowerSystems → Elements → Series RLC Branch, Electrical Sources

SimPowerSystems → Measurements → Voltage Measurement

Simulink → Sinks → Scope



# Внесување податоци за елементите

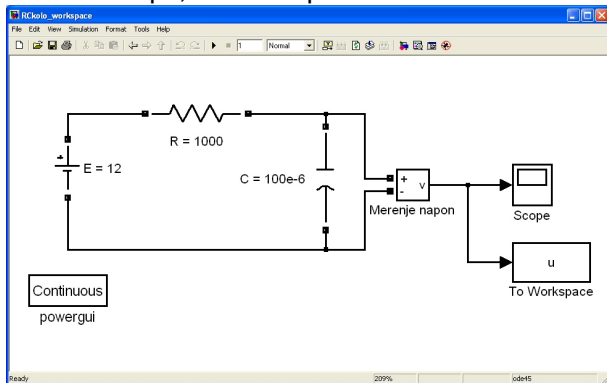


# Пример 8.1 - проширен модел (RCkolo\_workspace.mdl)

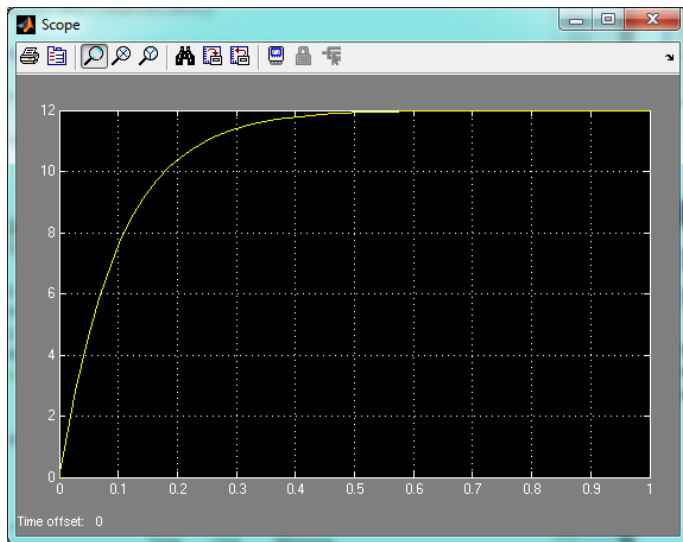
SimPowerSystems → Elements → Series RLC Branch, Electrical Sources

SimPowerSystems → Measurements → Voltage Measurement

Simulink → Sinks → Scope, To Workspace



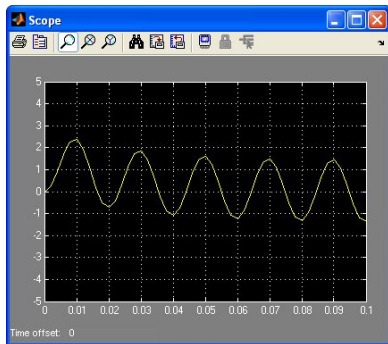
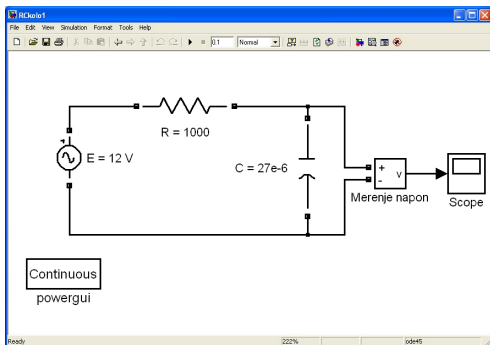
# Пример 8.1 - осцилоскоп





## Пример 8.2

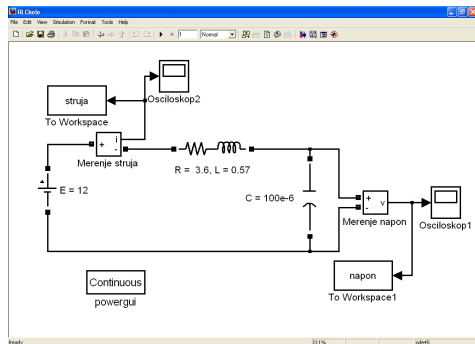
Да се реши RC колото за случајот кога е  $R = 1000 \, \Omega$ ,  $C = 27 \, \mu\text{F}$  и напонскиот генератор има максимална вредност на напонот  $E = 12 \, \text{V}$  при фреквенција  $f = 50 \, \text{Hz}$ . Нека е потребно решението за бараниот напон  $u$  да го добиеме во интервалот  $0 \leq t \leq 0,1$ .



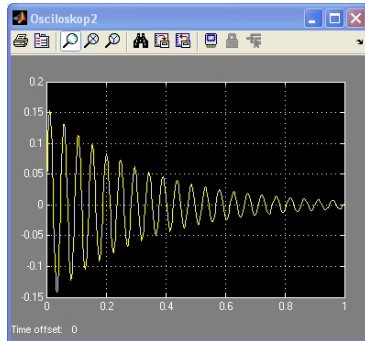
RCkolo1.mdl

## Пример 8.3

Едно RLC коло е поврзано на напонски генератор со константен напон од 12 V. Параметрите на колото се  $R = 3,6 \, \Omega$ ,  $L = 0,57 \, \text{H}$  и  $C = 100 \, \mu\text{F}$ . Потребно е да се одреди обликот на струјата во калемот и напонот на кондензаторот во интервалот  $0 \leq t \leq 1$ . Потоа да се одредат максималната вредност на струјата и напонот како и вкупната енергија која ќе се ослободи во вид на топлина во отпорникот.

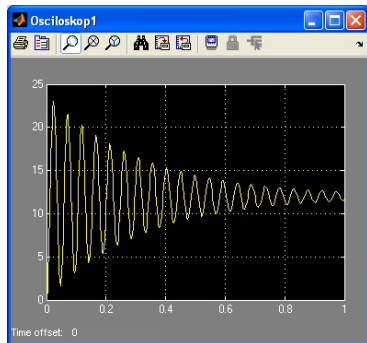


RLCkolo.mdl



$i(t)$

## Пример 8.3 - продолжение



```
>> max(abs(struja))
```

```
ans =
```

```
0.1532
```

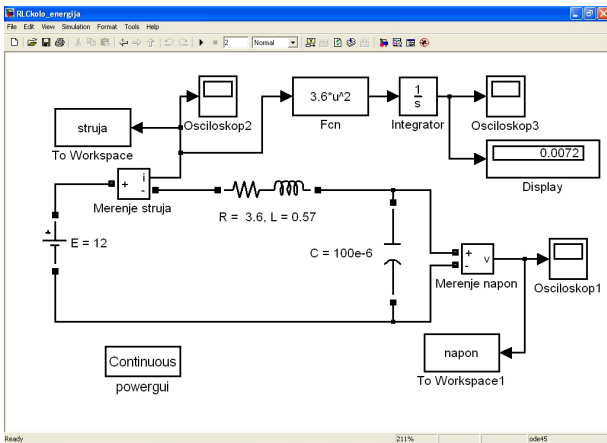
```
>> max(abs(napon))
```

```
ans =
```

```
23.0639
```

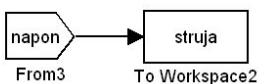
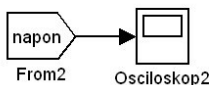
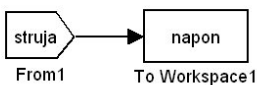
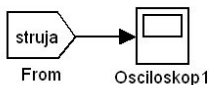
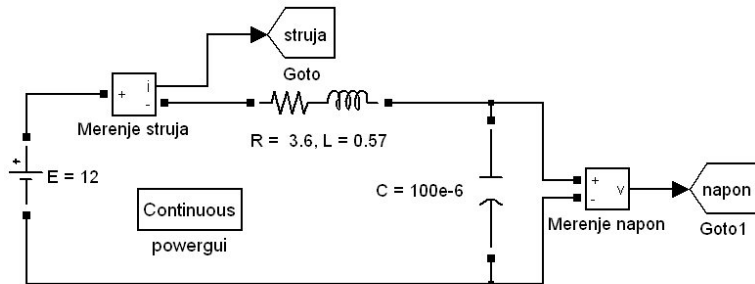
$u(t)$

# Пример 8.3 - продолжение



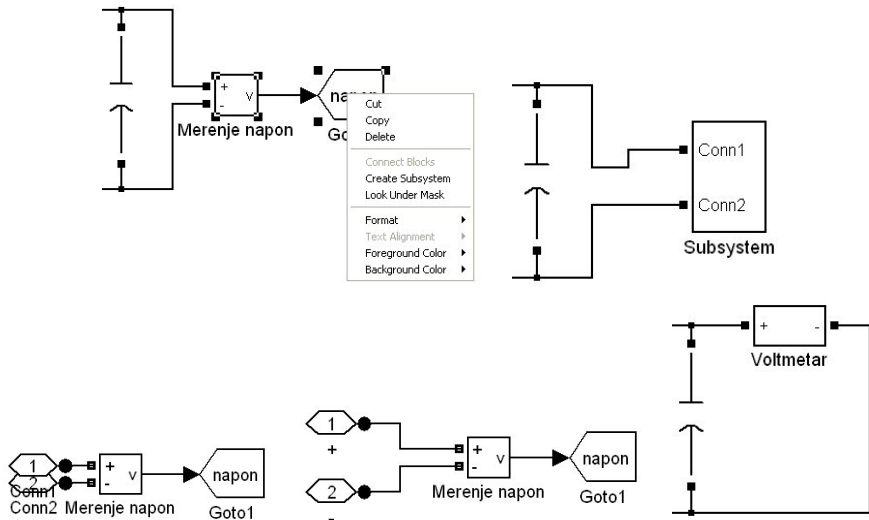
$$W = R \cdot \int_0^1 i^2(t) dt = 3,6 \cdot \int_0^1 i^2(t) dt$$

# Пример 8.4 - пренос на сигнали со Goto и From



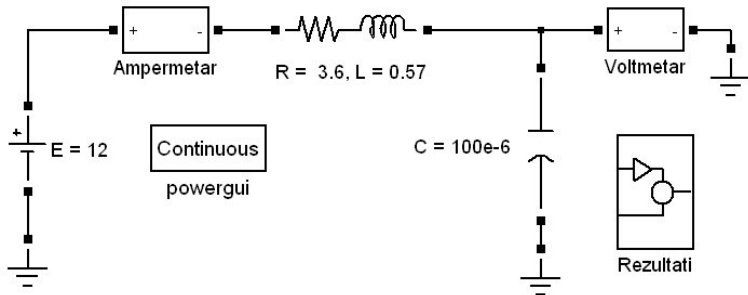
RLCkolo\_goto\_from.mdl

# Пример 8.4 - креирање потсистем



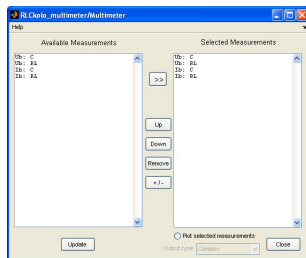
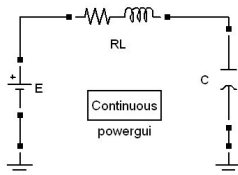
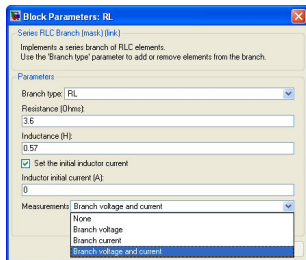
RLCkolo\_goto\_from\_podsistemi.mdl

## Пример 8.4 - спој со земја



RLCkolo\_goto\_from\_podsistemi\_zemja.mdl

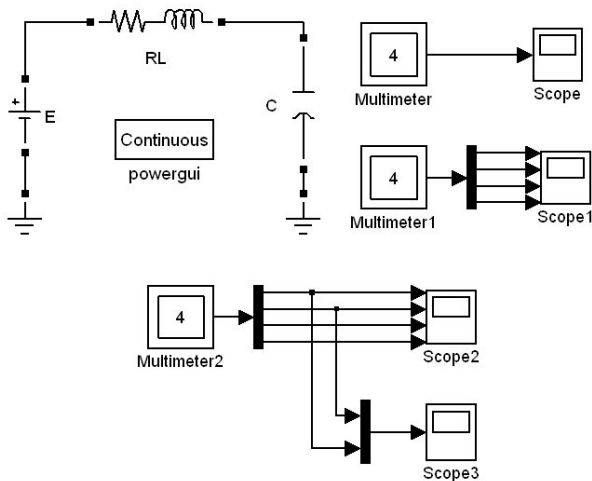
# Пример 8.5 - мултиметар



RLCkolo\_multimeter.mdl



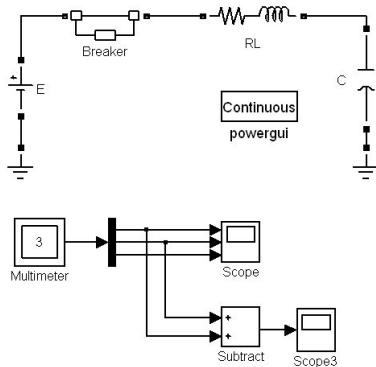
# Пример 8.5 - демултиплексирање и мултиплексирање на сигнали



RLCkolo\_multimeter.mdl

## Пример 8.6

Во колото од примерот 8.5 редно со гранката RL да се постави прекинувач кој што во почетокот е вклучен, а потоа се исклучува во временскиот момент 0,3 s и повторно се вклучува во 0,4 s. Да се прикажат облиците на струјата и напоните на гранките RL и C на еден 3-канален осцилоскоп. Исто така на друг едноканален осцилоскоп да се прикаже збирот од напоните на гранките RL и C.



RLCkolo\_prekinuvac.mdl

Warning: You have required continuous-time simulation of a system containing switches or nonlinear elements. The ode23t variable-step stiff solver is recommended in order to get best accuracy and simulation performance. ...

# Пример 8.6 - решение



$$i(t = 0, 3) \neq 0$$

$$i(t = 0, 308 \div 0, 4) = 0$$

$$i(t > 0, 4) \neq 0$$

## Пример 8.8

Да се направи модел на идеален напонски генератор со облик

$$u(t) = U_M \cdot (e^{-at} - e^{-bt}) .$$

Коефициентите  $a$  и  $b$  се поврзани со времето на траење на челото  $T_C$  и грбот  $T_Z$

$$T_C = \frac{3,24}{b}, \quad T_Z = \frac{0,69}{a} .$$

Максималната вредност на напонот изнесува

$$U_m = U_M \cdot \left[ \left( \frac{a}{b} \right)^{\frac{-a}{a-b}} - \left( \frac{a}{b} \right)^{\frac{-b}{a-b}} \right] .$$

Познати следните параметри  $U_M = 100 \text{ kV}$ ;  $T_C = 1,2 \text{ } \mu\text{s}$  и  $T_Z = 50 \text{ } \mu\text{s}$ . Нека вакуиот напонски генератор напојува едно RC коло со  $R = 100 \text{ } \Omega$  и  $C = 10 \text{ nF}$ .

## Пример 8.8 - решение

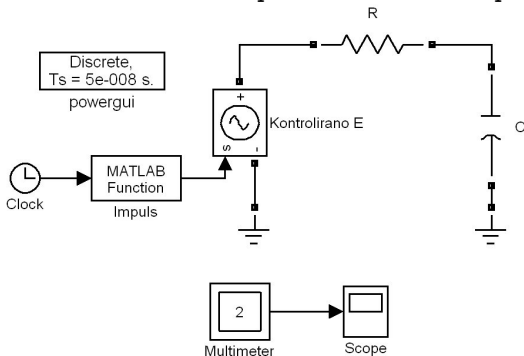
$$a = \frac{0,69}{T_Z} = \frac{0,69}{50 \cdot 10^{-6}} = 1,38 \cdot 10^4 \quad b = \frac{3,24}{T_C} = \frac{3,24}{1,2 \cdot 10^{-6}} = 2,7 \cdot 10^6$$

$$u(t) = 100 \cdot 10^3 \cdot \left( e^{-1,38 \cdot 10^4 \cdot t} - e^{-2,7 \cdot 10^6 \cdot t} \right)$$

SimPowerSystems → Electrical Sources → Controlled Voltage Source

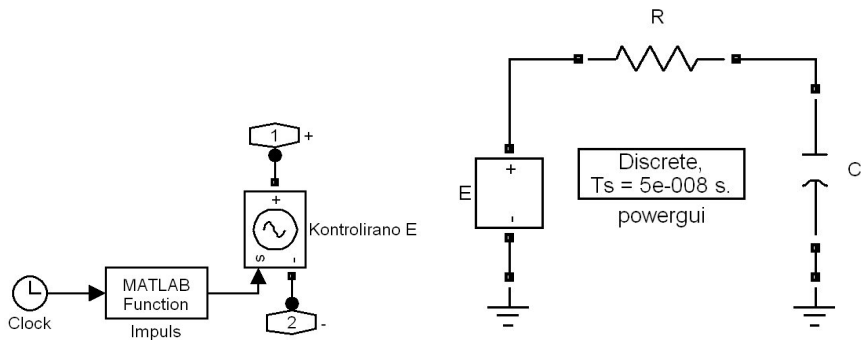
Simulink → User-Defined Functions → MATLAB Function

MATLAB Function: `100e3 * (exp(-1.38e4*u) - exp(-2.7e6*u))`

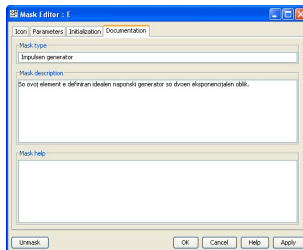
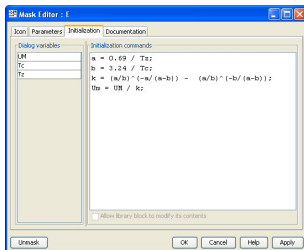
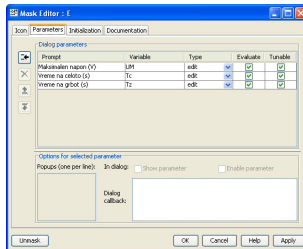
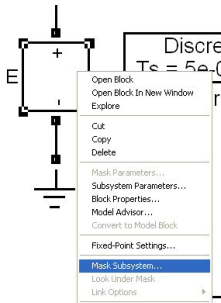


dvojno\_exp.mdl

# Пример 8.8 - потсистем

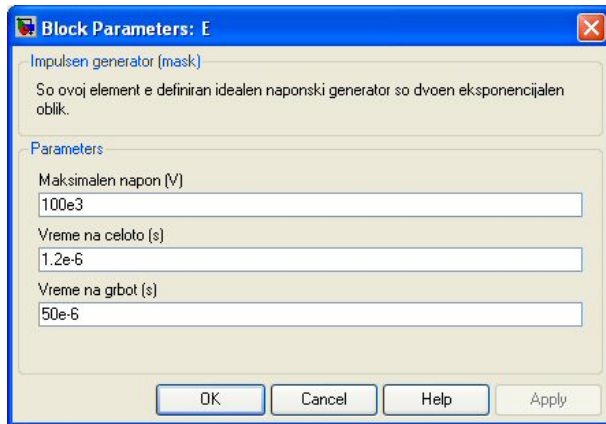


# Пример 8.8 - маска (1)



dvojno\_exp\_maska.mdl

## Пример 8.8 - маска (2)



**Block Parameters: E**

Impulsen generator (mask)

So ovoj element e definiran idealen naponski generator so dvoen eksponencijalen oblik.

Parameters

Maksimalen napon (V)  
100e3

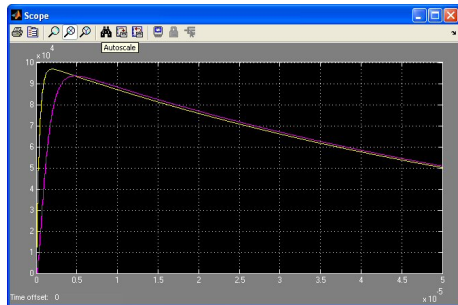
Vreme na celoto (s)  
1.2e-6

Vreme na grbot (s)  
50e-6

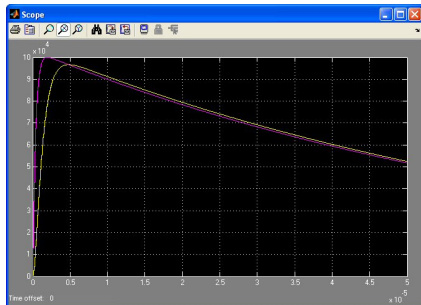
OK Cancel Help Apply



# Пример 8.8 - решение



$U_M = 100 \text{ kV}$   
 $U_m < 100 \text{ kV}$   
 dvojno\_exp.mdl



$$U_M = \frac{100 \text{ kV}}{\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{-a}{a-b}} - \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{-b}{a-b}}}$$

$$U_M = 103,28 \text{ kV}$$

$$U_m = 100 \text{ kV}$$
 dvojno\_exp\_maska.mdl

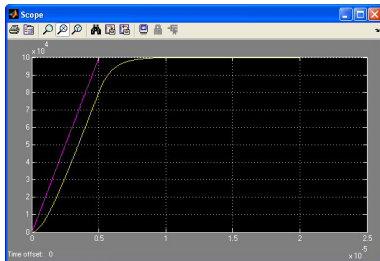
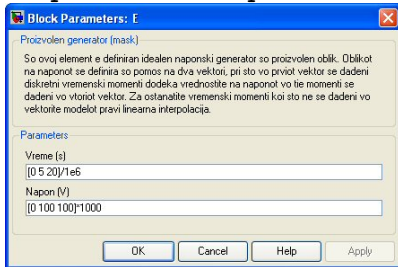
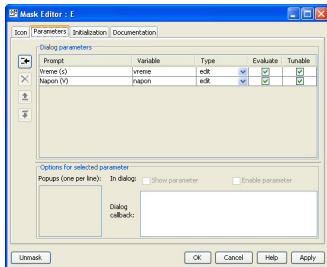
## Пример 8.9

Во моделот од примерот 8.8 напонскиот генератор да се замени со друг кој што има напон во форма на рампа. При тоа да се земе дека напонот линеарно расте од 0 до 100 kV за време од  $5 \mu\text{s}$ , а потоа има константна вредност од 100 kV до крајот на симулацијата која што трае  $20 \mu\text{s}$ .

Внесувањето на обликот на напонот да се направи преку маска во која што ќе се внесуваат дискретни вредности за напонот и за одредени временски моменти кои што ќе бидат дефинирани со вектори.

# Пример 8.9 - решение

MATLAB Function: `interp1(vreme, napon, u)`



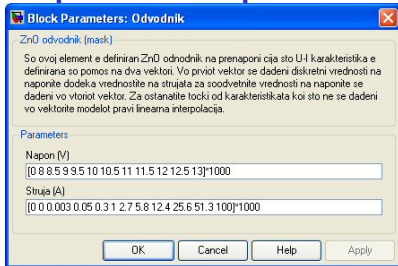
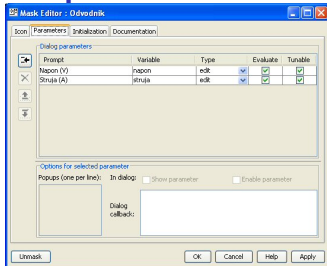
rampa.mdl

## Пример 8.11

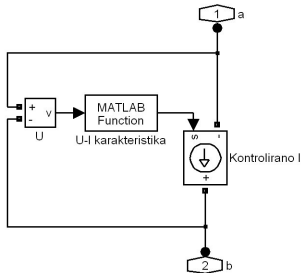
За еден одводник на пренапони со мерење е добиена неговата  $U - I$  карактеристика која што е дадена во табелата. Да се направи модел на одводникот при што неговата карактеристика ќе се внесува преку маска, а потоа тој да се вметне во колото од примерот 8.8. Максималната вредност на напонот на двојно-експоненцијалниот генератор изнесува 30 kV.

|         |       |       |       |       |       |        |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $U$ (V) | 0     | 8000  | 8500  | 9000  | 9500  | 10000  |
| $I$ (A) | 0     | 0     | 3     | 50    | 300   | 1000   |
| $U$ (V) | 10500 | 11000 | 11500 | 12000 | 12500 | 13000  |
| $I$ (A) | 2700  | 5800  | 12400 | 25600 | 51300 | 100000 |

# Пример 8.11 - нелинеарен отпорник

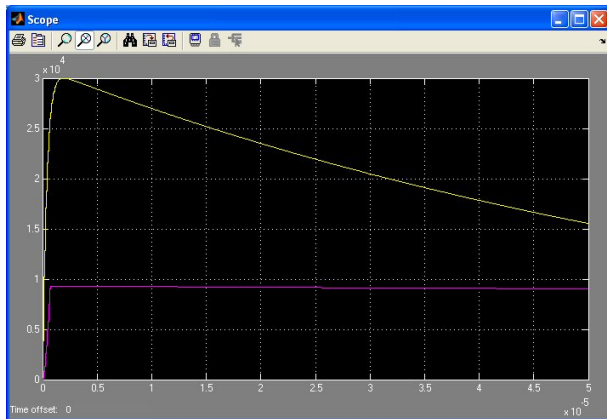


MATLAB Function: `interp1(vreme, napon, u)`



`dvojno_exp_odvodnik.mdl`

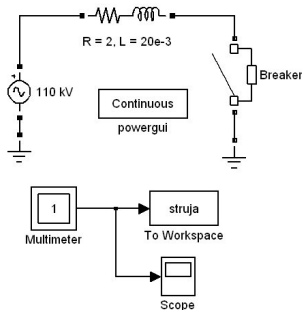
# Пример 8.11 - решение



## Пример 8.12

Разгледуваме едно RL коло кое што се вклучува со прекинувач на напонски генератор со синусен облик. Параметрите на елементите на колото се  $R = 2 \, \Omega$  и  $L = 20 \, \text{mH}$ , додека максималната вредност на напонот на напонскиот генератор изнесува  $U_m = \sqrt{2} \cdot \frac{110}{\sqrt{3}} \, \text{kV}$ , а неговата фреквенција е  $f = 50 \, \text{Hz}$ . Потребно е да се одреди максималната (ударна) вредност на струјата во колото за различни временски моменти на вклучување на прекинувачот почнувајќи од моментот  $t_1 = 0$  до моментот  $t_2 = 10 \, \text{ms}$  со чекор од  $\Delta t = 0,5 \, \text{ms}$ .

# Пример 8.12 - решение (1)

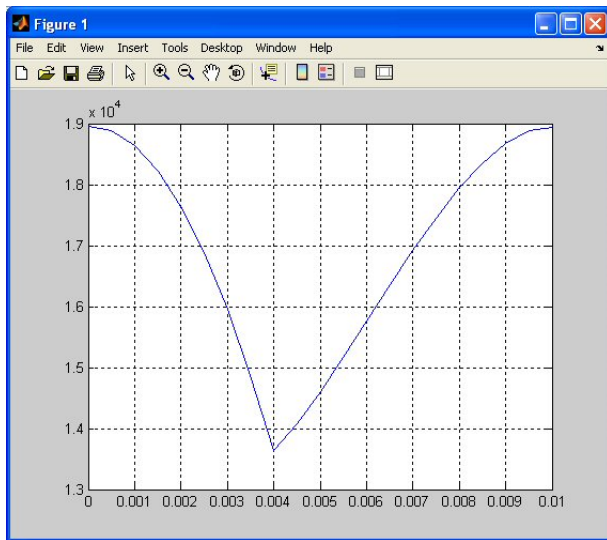


Primer\_8\_12.mdl  
Primer\_8\_12\_povekekratno.m

```
1 T = []; Imax = [];  
2 for Tvkl = 0:0.5e-3:10e-3  
3     T = [T; Tvkl];  
4     sim('Primer_8_12');  
5     Imax = [Imax; max(abs(struja))];  
6 end  
7 plot(T, Imax); grid;
```



## Пример 8.12 - решение (2)



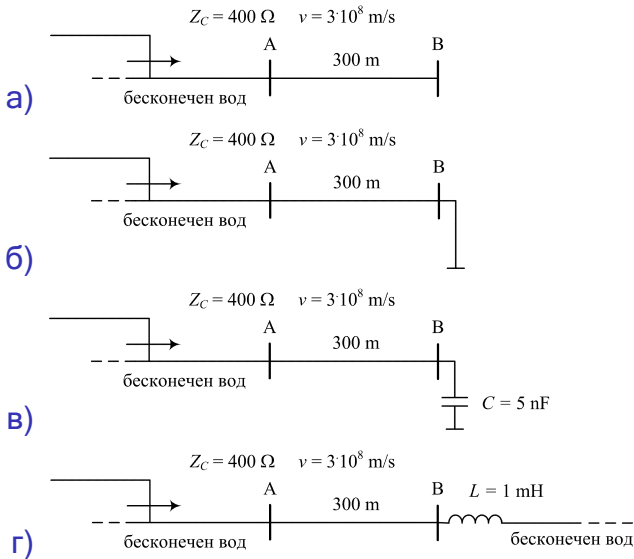
## Пример 5

Напонски бран со правоаголен облик со амплитуда од 500 kV и бесконечно времетраење патува по 110 kV надземен вод со карактеристична импеданција  $Z_C = 400 \Omega$ . Бранот патува со брзина  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Ги разгледуваме последните 300 m од водот, при следните четири случаи за крајот на водот:

- а) отворен вод,
- б) кусо споен вод,
- в) вод затворен со капацитет  $C = 5 \text{ nF}$ ,
- г) вод кој преку индуктивитет  $L = 1 \text{ mH}$  продолжува со друг бесконечен вод.

Да се одредат облиците на напоните на двата краја од водот со должина 300 m.

# Пример 5 - скици



# Пример 5 - параметри на водови

SimPowerSystems → Elements → Distributed Parameter Line

Number of phases N  
1

Frequency used for R L C specification (Hz)  
50

Resistance per unit length (Ohms/km) [N\*N matrix] or [R1 R0 R0m]  
0.001

Inductance per unit length (H/km) [N\*N matrix] or [L1 L0 L0m]  
1.334e-3

Capacitance per unit length (F/km) [N\*N matrix] or [C1 C0 C0m]  
8.334e-009

Line length (km)  
0.3

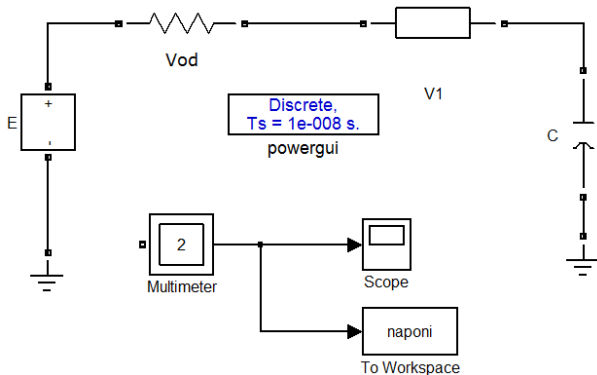
Measurements: Phase-to-ground voltages

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{Z_C}{v}, \quad C = \frac{1}{Z_C \cdot v}$$

```
1 function [L, C] = vod_parametri(Zc,v)
2 % [L, C] = vod_parametri(400,3e8)
3 L = Zc/v * 1000; % H/km
4 C = 1/(Zc * v) * 1000; % F/km
```

## Пример 5 - модели

- а) primer\_5a.mdl
- б) primer\_5b.mdl
- в) primer\_5v.mdl
- г) primer\_5g.mdl

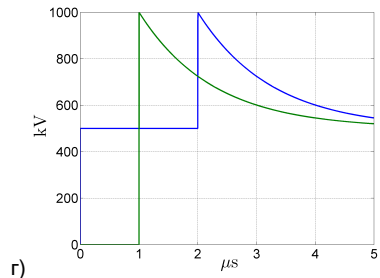
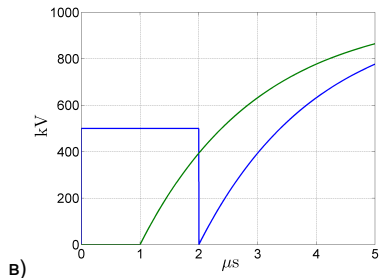
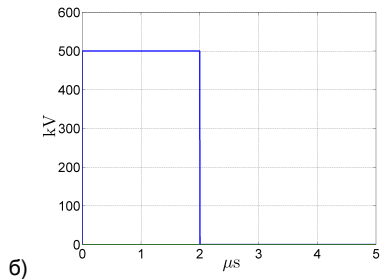
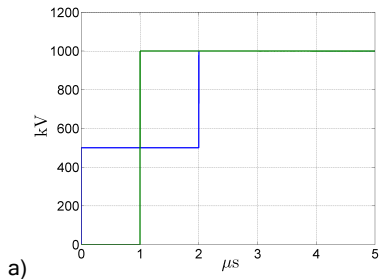


Напонскиот генератор е со облик на рампа со следните параметри:

$vreme = [0 \ 0.001 \ 50]/1e6$

$napon = 2*[0 \ 500 \ 500]*1000$

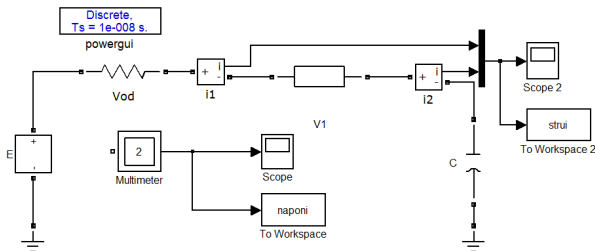
# Пример 5 - $u(t)$



## Пример 6

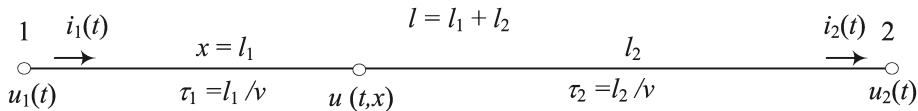
За случаите од примерот 5 да се одреди просторната распределба на напоните во функција од времето со што ќе се добие решение за простирање на брановите по должината на водот  $u(t, x)$ .

- а) primer\_6a.mdl
- б) primer\_6b.mdl
- в) primer\_6v.mdl
- г) primer\_6g.mdl



- Во работниот простор на Matlab ги испраќаме напоните и струите на двата краја на водот:  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,
- Водот треба да има име V1.

## Пример 6 - формула за $u(t, x)$



$$u(t, x) = \frac{u_1(t - \tau_1) + Z_C \cdot i_1(t - \tau_1) + u_2(t - \tau) - Z_C \cdot i_2(t - \tau)}{2}$$

$$\tau_1 = \frac{l_1}{v} = \frac{x}{v}$$

$$\tau = \frac{l}{v}$$



## Пример 6 - програма за $u(t, x)$

```
[t,u,i] = patuvacki_bran_1(datoteka,pauza,pravi_film);
```

Функцијата го прикажува патувањето на бранот по водот во форма на филм. Нејзините променливи го имаат следното значење:

`datoteka` - име на датотеката во која што е нацртан моделот на водот во Simulink,

`pauza` - пауза во секунди помеѓу две слики во филмот,

`pravi_film` - променлива (0/1) со која се одбира дали филмот ќе се сними во формат `avi` на дискот,

`t` - вектор кој го содржи времето,

`u` - матрица чии колони ги содржат напоните на почетокот и крајот на водот,

`i` - матрица чии колони ги содржат струите на почетокот и крајот на водот.

```
[t,u,i] = patuvacki_bran_1('primer_6a',0.02);
```

```
[t,u,i] = patuvacki_bran_1('primer_6a',0.02,1); ← снима филм
```

## Пример 6 - $u(t, x)$

Забелешка: филмовите primer\_6a.avi, primer\_6b.avi, primer\_6v.avi и primer\_6g.avi треба да се сместени во истиот директориум со овој документ.

primer\_6a.avi

primer\_6b.avi

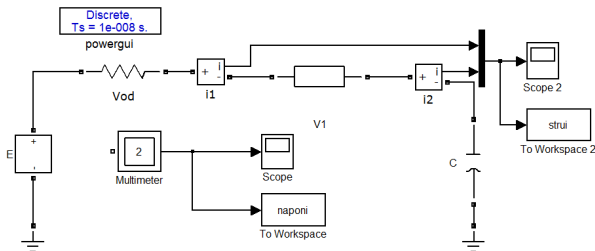
primer\_6v.avi

primer\_6g.avi

# Пример 7

Да се реши примерот 6 за случај кога напонскиот бран има правоаголен облик со амплитуда од 500 kV и времетраење од  $0,5 \mu\text{s}$ .

- а) primer\_7a.mdl
- б) primer\_7b.mdl
- в) primer\_7v.mdl
- г) primer\_7g.mdl

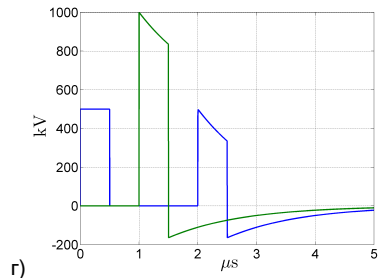
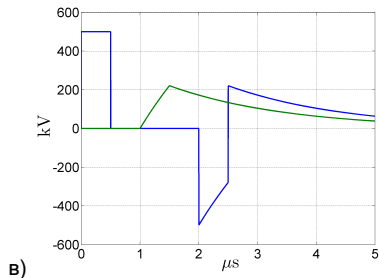
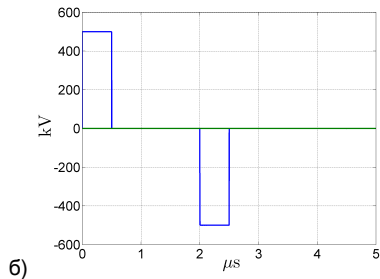
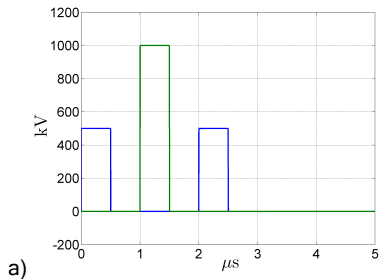


Напонскиот генератор е со облик на рампа со следните параметри:

$\text{vreme} = [0 \ 0.001 \ 0.5 \ 0.501 \ 50]/1\text{e}6$

$\text{napon} = 2*[0 \ 500 \ 500 \ 0 \ 0]*1000$

# Пример 7 - $u(t)$



## Пример 7 - $u(t, x)$

Забелешка: филмовите primer\_7a.avi, primer\_7b.avi, primer\_7v.avi и primer\_7g.avi треба да се сместени во истиот директориум со овој документ.

primer\_7a.avi

primer\_7b.avi

primer\_7v.avi

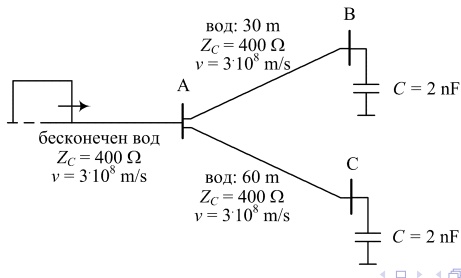
primer\_7g.avi

## Пример 8

Напонски бран со правоаголен облик со амплитуда од 500 kV и времетраење од  $0,5 \mu\text{s}$  патува по 110 kV надземен вод со карактеристична импеданција  $Z_C = 400 \Omega$ . Бранот патува со брзина  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Водот на крајот се завршува со други два вода со исти карактеристики. Ги разгледуваме следните два случаја:

- а) крајните водови се отворени,
- б) крајните водови се затворени со капацитет  $C = 2 \text{ nF}$ .

Да се одредат облиците на напоните на краевите од водовите, како и патувачките бранови по нив.



## Пример 8 - програма за $u(t, x)$

```
[t,u,i] = patuvacki_bran(datoteka,tip,pauza,pravi_film);
```

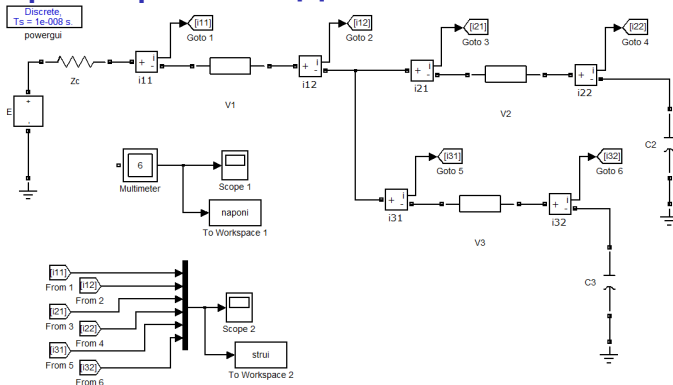
Функцијата го прикажува патувањето на бранот по водот во форма на филм. Нејзините променливи го имаат следното значење:

`datoteka` - име на датотеката во која што е нацртан моделот на водот во Simulink,  
`tip` - тип на дијаграмот ('plot3'/'stem3') кој ќе се користи за цртање на брановите,  
`pauza` - пауза во секунди помеѓу две слики во филмот,  
`pravi_film` - променлива (0/1) со која се одбира дали филмот ќе се сними во формат avi на дискот,  
`t` - вектор кој го содржи времето,  
`u` - матрица чии колони ги содржат напоните на почетокот и крајот на водот,  
`i` - матрица чии колони ги содржат струите на почетокот и крајот на водот.

```
[t,u,i] = patuvacki_bran_1('primer_6a','plot3',0.02);  
[t,u,i] = patuvacki_bran_1('primer_6a','plot3',0.02,1); ← снима филм
```

Покрај моделот во Simulink треба да се направи и датотека со  $X$  и  $Y$  координати на крајните точки на секој вод. Ако моделот е со име 'primer\_8b.mdl' тогаш датотеката треба да е со име 'primer\_8b\_koordinati.m'.

# Пример 8 - модел



primer\_8b\_koordinati.m

```

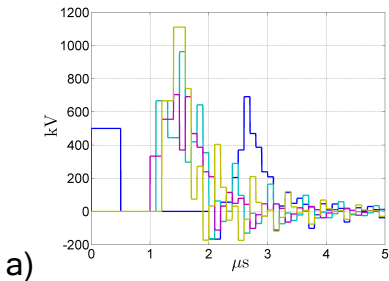
1  XY = [
2      0 0 300  0
3      300 0 300+30*cos(pi/4)  30*sin(pi/4)
4      300 0 300+60*cos(pi/4) -60*sin(pi/4)
5  ];

```

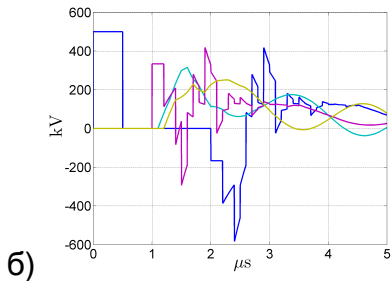


## Пример 8 - $u(t)$ и $u(t, x)$

Забелешка: филмовите primer\_8a.avi и primer\_8b.avi треба да се сместени во истиот директориум со овој документ.



primer\_8a.avi



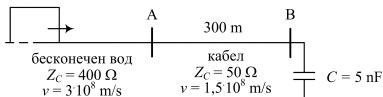
primer\_8b.avi

## Пример 9

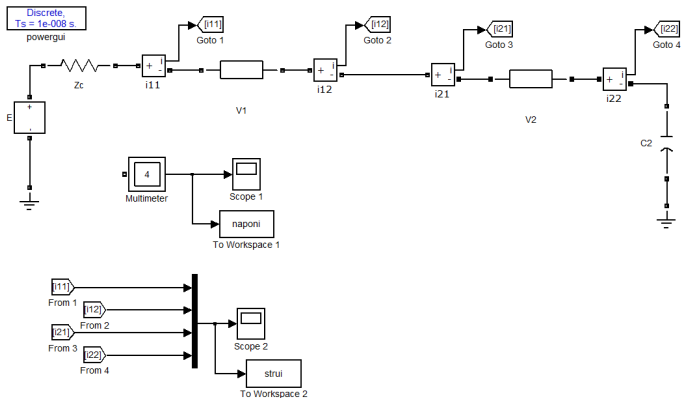
Напонски бран со правоаголен облик со амплитуда од 500 kV и времетраење од  $0,5 \mu\text{s}$  патува по 110 kV надземен вод со карактеристична импеданција  $Z_C = 400 \Omega$ . Бранот патува со брзина  $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Водот завршува со кабел долг 300 m со карактеристична импеданција  $Z_C = 50 \Omega$ , при што брзината на простирање на брановите во кабелот изнесува  $v = 1,5 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Ги разгледуваме следните два случаја за крајот на кабелот:

- а) отворен вод,
- б) вод затворен со капацитет  $C = 5 \text{ nF}$ .

Да се одредат облиците на напоните на двата краја од кабелот, како и патувачките бранови по водот и кабелот.



# Пример 9 - модел



primer\_9b\_koordinati.m

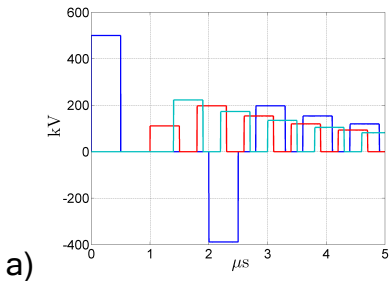
```

1 XY = [
2       0 0 300 0
3       300 0 360 0
4       ];

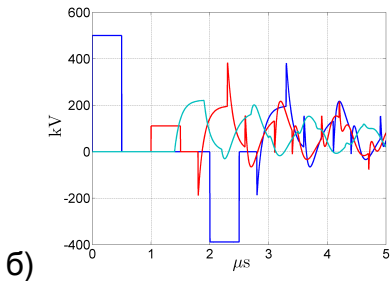
```

## Пример 9 - $u(t)$ и $u(t, x)$

Забелешка: филмовите primer\_9a.avi и primer\_9b.avi треба да се сместени во истиот директориум со овој документ.



primer\_9a.avi



primer\_9b.avi