



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI



Řešení přechodných dějů na transformátoru v nástroji MathWorks MATLAB

Cvičení PJS

doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D., ZČU, FEL, KEE



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
ELEKTROENERGETIKY

Výpočet přechodného děje na transformátoru

Pro výpočet přechodného děje zapnutí do stavu nakrátko využít simulační nástroj MathWorks MATLAB:

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Math. Graphics. Programming.

MATLAB is a programming and numeric computing platform used by millions of engineers and scientists to analyze data, develop algorithms, and create models.

[Download a free trial](#) [Request a quote](#)

Inference with the trained network

```
! Let's see how well the trained network performs on new data.
imgTestSet = augmentDataAugmentation(Layers(1), InputData, testSetLabels);
predictedLabels = classify(imgTestSet, netTested);
accuracy = mean(predictedLabels == testSetLabels);

figure
imshow(imgTestSet(1,:), predictedLabels(1), ...
    'ColorMap','jet'); hold on;
title('Predicted Labels: ' + string(predictedLabels(1)) + ', ...
    'Actual Labels: ' + string(testSetLabels(1)));
axis([1 512 1 512]); colormap('jet'); colorbar;

! Let's take a look at a few example images.
idx = 1; % Choose the first image.
img = imread(imgTestSet(idx,:));
trueLabel = imgTestSetLabels(idx);
[predictedLabel, score] = classify(imgTestSet(idx,:), netTested);
img = [img; predictedLabel];
[img, score, predictedLabel, trueLabel, SDC] = ...
```

What is MATLAB?

**Designed for the way you think
and the work you do.**

MATLAB® combines a desktop environment tuned for iterative analysis and design processes with a programming language that expresses matrix and array mathematics directly. It includes the Live Editor for creating scripts that combine code, output, and formatted text in an executable notebook.

Professionally Built

MATLAB toolboxes are professionally developed, rigorously tested, and fully documented.

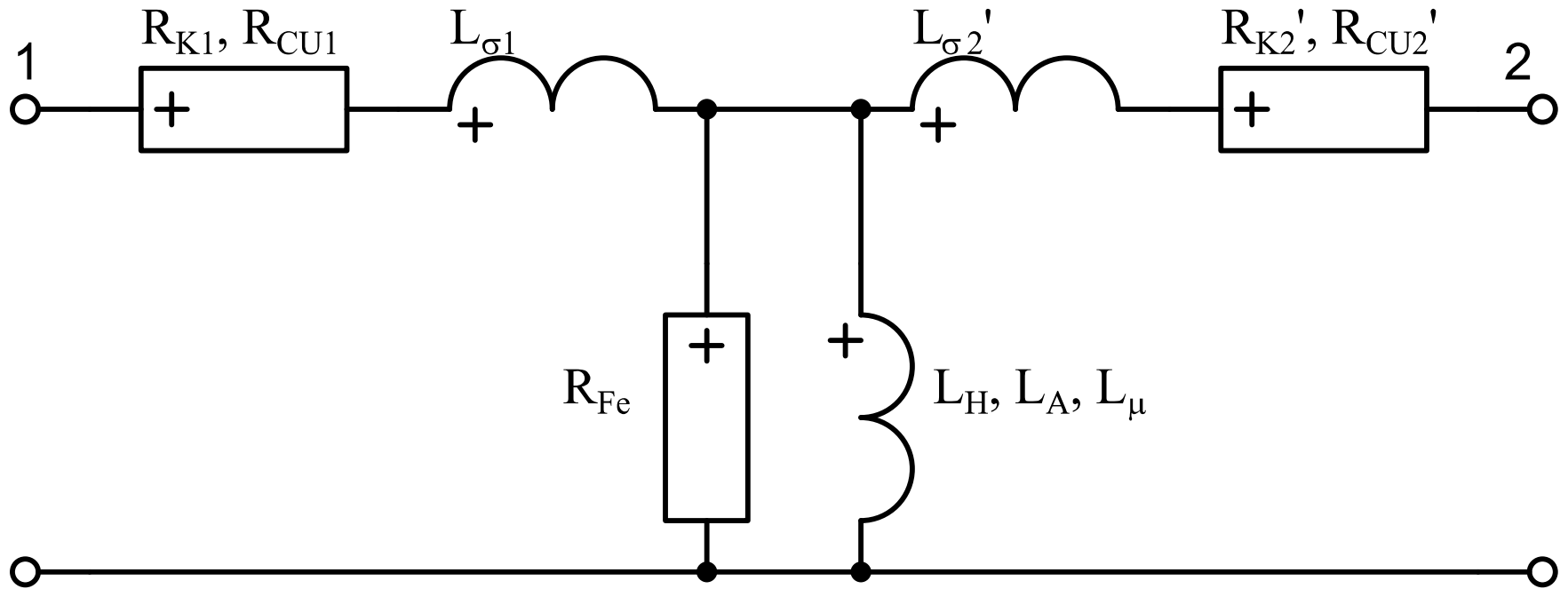
With Interactive Apps

MATLAB apps let you see how different algorithms work with your data. Iterate until you've got the results you want, then automatically generate a MATLAB program to reproduce or automate your work.

And the Ability to Scale

Scale your analyses to run on clusters, GPUs, and clouds with only minor code changes. There's no need to rewrite your code or learn big data programming and out-of-memory techniques.

Náhradní schéma transformátoru



Parametry transformátoru

$$u_K = 10 \%$$

$$i_0 = 1 \%$$

$$U_{N1} = 110 \text{ kV}$$

$$U_{N2} = 22 \text{ kV}$$

$$S_{NT} = 10 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_0 = 0.3 \%$$

$$\Delta P_K = 1.0 \%$$

$$U_{kp} = 10 ;$$

$$I_0p = 1 ;$$

$$U_{n1} = 110 ;$$

$$U_{n2} = 22 ;$$

$$S_{nt} = 10 ;$$

$$dP_0p = 0.3 ;$$

$$dP_{kp} = 1 ;$$

Parametry transformátoru

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$R_K = r_K Z_{NT} = \frac{\Delta p_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{NT}}$$

$$R_{K1} = \frac{R_K}{2}$$

$$Z_K = z_K Z_{NT} = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{NT}}$$

$$X_\sigma = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

$$L_\sigma = \frac{X_\sigma}{\omega} \quad L_{\sigma 1} = \frac{L_\sigma}{2}$$

$$G_{Fe} = g_{Fe} Y_{NT} = \frac{\Delta p_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_{NT}}{U_{N1}^2}$$

$$R_{Fe} = G_{Fe}^{-1}$$

$$Y_0 = y_0 Y_{NT} = \frac{i_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_{NT}}{U_{N1}^2}$$

$$X_H = \left(\sqrt{Y_0^2 - G_{Fe}^2} \right)^{-1} L_H = \frac{X_H}{\omega}$$

frekv=50;

omega=2*pi*frekv;

Rk= (dPkp/100) * (Un1^2/Snt) ;

Rk1=Rk/2 ;

Zk= (Ukp/100) * (Un1^2/Snt) ;

Xs=sqrt (Zk^2-Rk^2) ;

Ls=Xs/omega ;

Ls1=Ls/2 ;

Gfe= (dP0p/100) * (Snt/Un1^2) ;

Rfe=1/Gfe ;

Y0= (I0p/100) * (Snt/Un1^2) ;

Xh=1/sqrt (Y0^2-Gfe^2) ;

Lh=Xh/omega ;

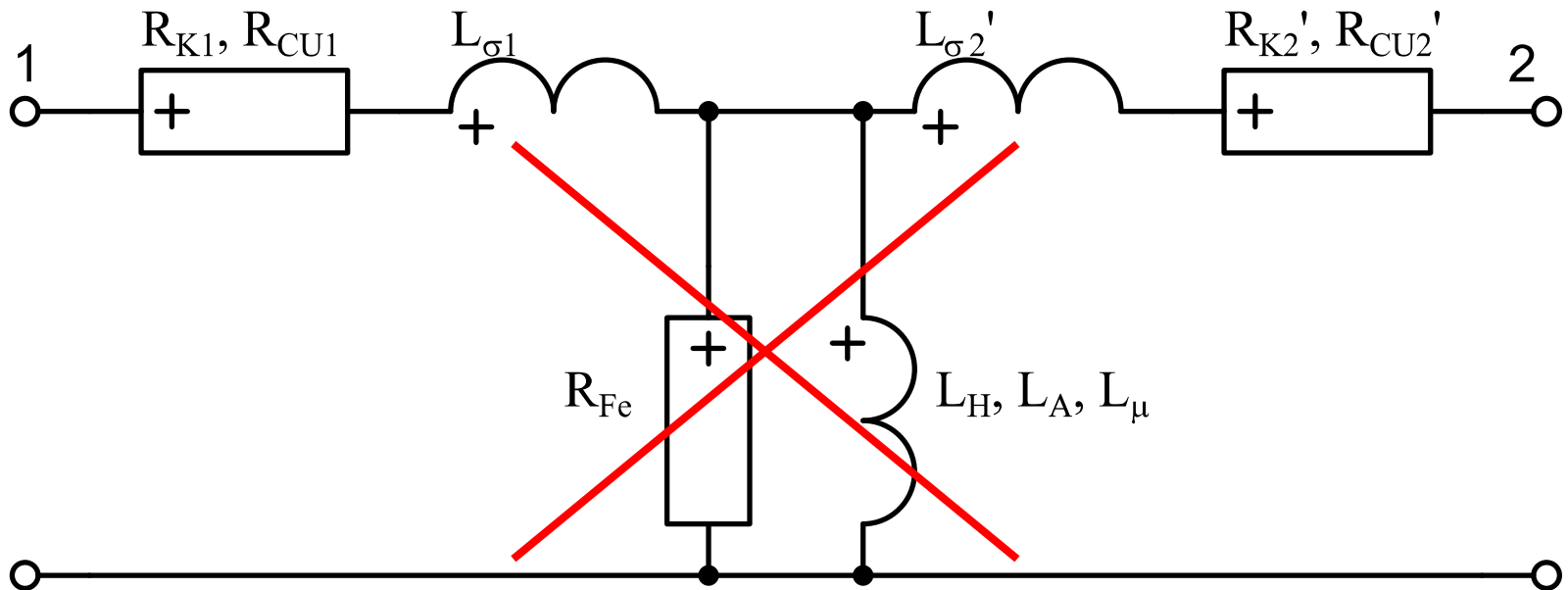
Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou se zanedbáním příčné části:

$$L_{\sigma} \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot R_K = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) \quad U_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$$



$$\frac{di_K}{dt} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_K \cdot R_K}{L_{\sigma}}$$



Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou se zanedbáním příčné části:

$$L_{\sigma} \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot R_K = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) \quad U_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$$



$$\frac{di_K}{dt} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_K \cdot R_K}{L_{\sigma}}$$

% Reseni prubehu proudu nakratko numerickou metodou

```
f1kcc = @(t,y) [(Un1/sqrt(3)*sqrt(2)*Ukp/100*sin(omega*t) -y*Rk)/Ls];
```

```
tspan = 0 : 0.0001 : 0.1;
```

```
y0 = 0;
```

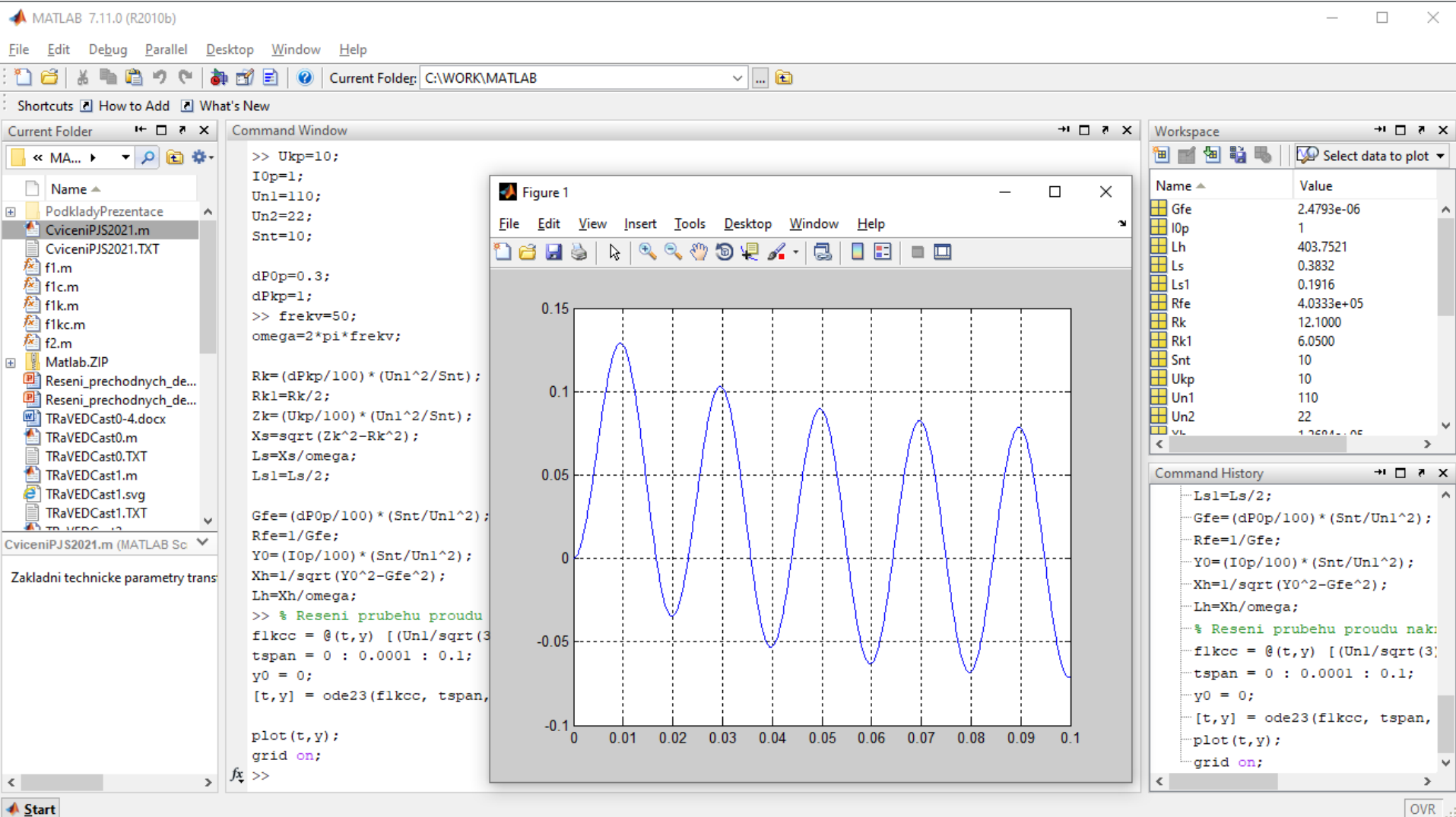
```
[t,y] = ode23(f1kcc, tspan, y0, []);
```

```
plot(t,y);
```

```
grid on;
```

Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko



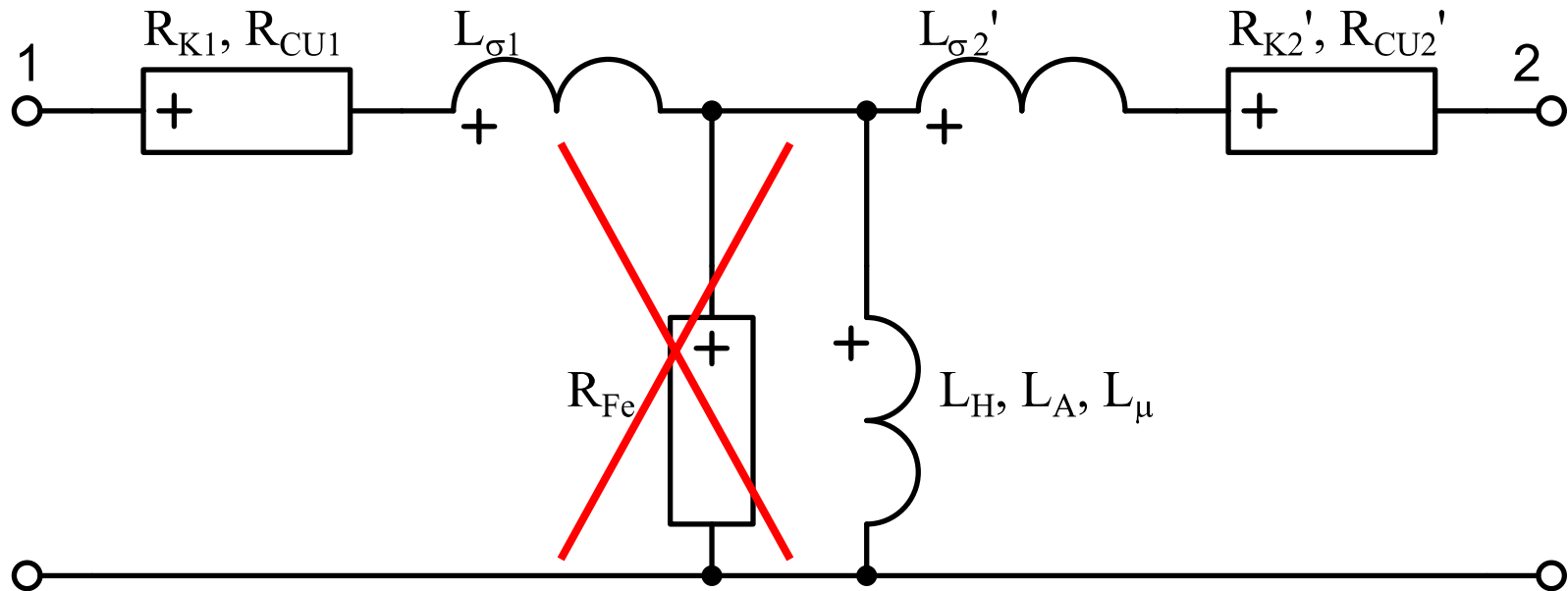
Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H :

$$\frac{L_\sigma}{2} \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot \frac{R_K}{2} + L_h \frac{di_1}{dt} - L_h \frac{di_2}{dt} = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)$$

$$-L_h \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{di_2}{dt} + \frac{L_\sigma}{2} \frac{di_2}{dt} + i_2 \cdot \frac{R_K}{2} = 0 \quad \rightarrow$$



Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H :

$$\frac{L_\sigma}{2} \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot \frac{R_K}{2} + L_h \frac{di_1}{dt} - L_h \frac{di_2}{dt} = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)$$
$$- L_h \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{di_2}{dt} + \frac{L_\sigma}{2} \frac{di_2}{dt} + i_2 \cdot \frac{R_K}{2} = 0 \quad \rightarrow$$

$$P_1 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h \qquad P_2 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h - \frac{L_h^2}{P_1}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_1 \cdot \frac{R_K}{2} - L_h \cdot i_2 \cdot \frac{R_K}{2} \cdot \frac{1}{P_1}}{P_2}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\frac{L_h \cdot \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)}{P_1} - \frac{L_h \cdot i_1 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_1} - i_2 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_2}$$

Transformátor nakrátko

$$P_1 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h$$

$$P_2 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h - \frac{L_h^2}{P_1}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_1 \cdot \frac{R_K}{2} - L_h \cdot i_2 \frac{R_K}{2} \cdot \frac{1}{P_1}}{P_2}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\frac{L_h \cdot u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - \frac{L_h \cdot i_1 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_1} - i_2 \frac{R_K}{2}}{P_2}$$



```
function ydot = f2(t,y)
```

```
Un1=110;
```

```
Ukp=10;
```

```
Um=Un1/sqrt(3)*sqrt(2);
```

```
omega=314.16;
```

```
Rk = 12.100;
```

```
Ls = 0.38322;
```

```
Lh = 403.75;
```

```
pom1=Ls/2+Lh;
```

```
pom2=Ls/2+Lh-Lh^2/pom1;
```

```
ydot=zeros(2,1);
```

```
ydot(1)=(Ukp/100*Um*sin(omega*t)-y(1)*Rk/2-Lh*y(2)*Rk/2/pom1)/pom2;
```

```
ydot(2)=(Lh*Ukp/100*Um*sin(omega*t)/pom1-Lh*y(1)*Rk/2/pom1-y(2)*Rk/2)/pom2;
```

```
tspan = 0 : 0.0001 : 0.1;
```

```
y0 = [0; 0];
```

```
[t,y] = ode23(@f2, tspan, y0, []);
```

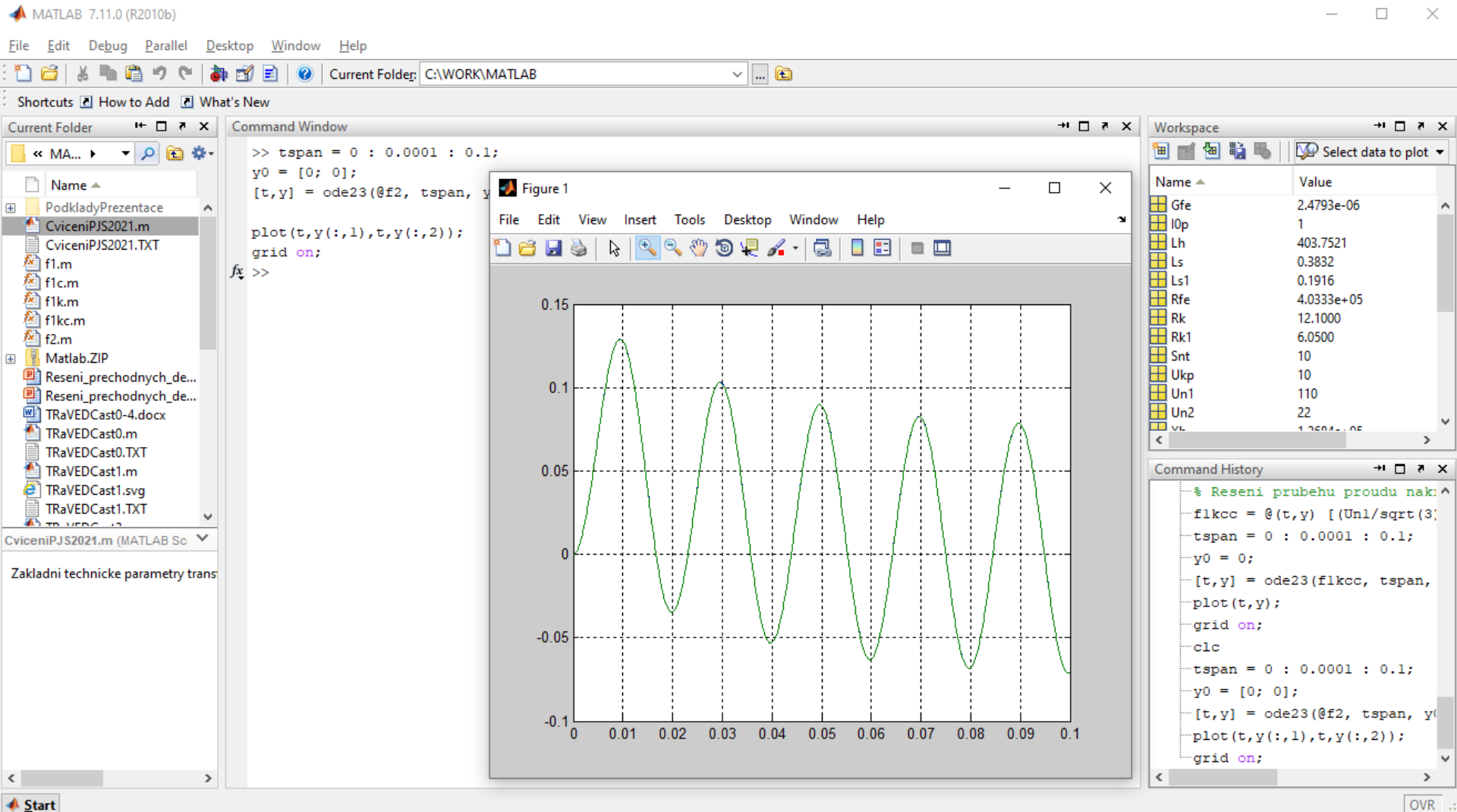
```
plot(t,y(:,1),t,y(:,2));
```

```
grid on;
```

Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

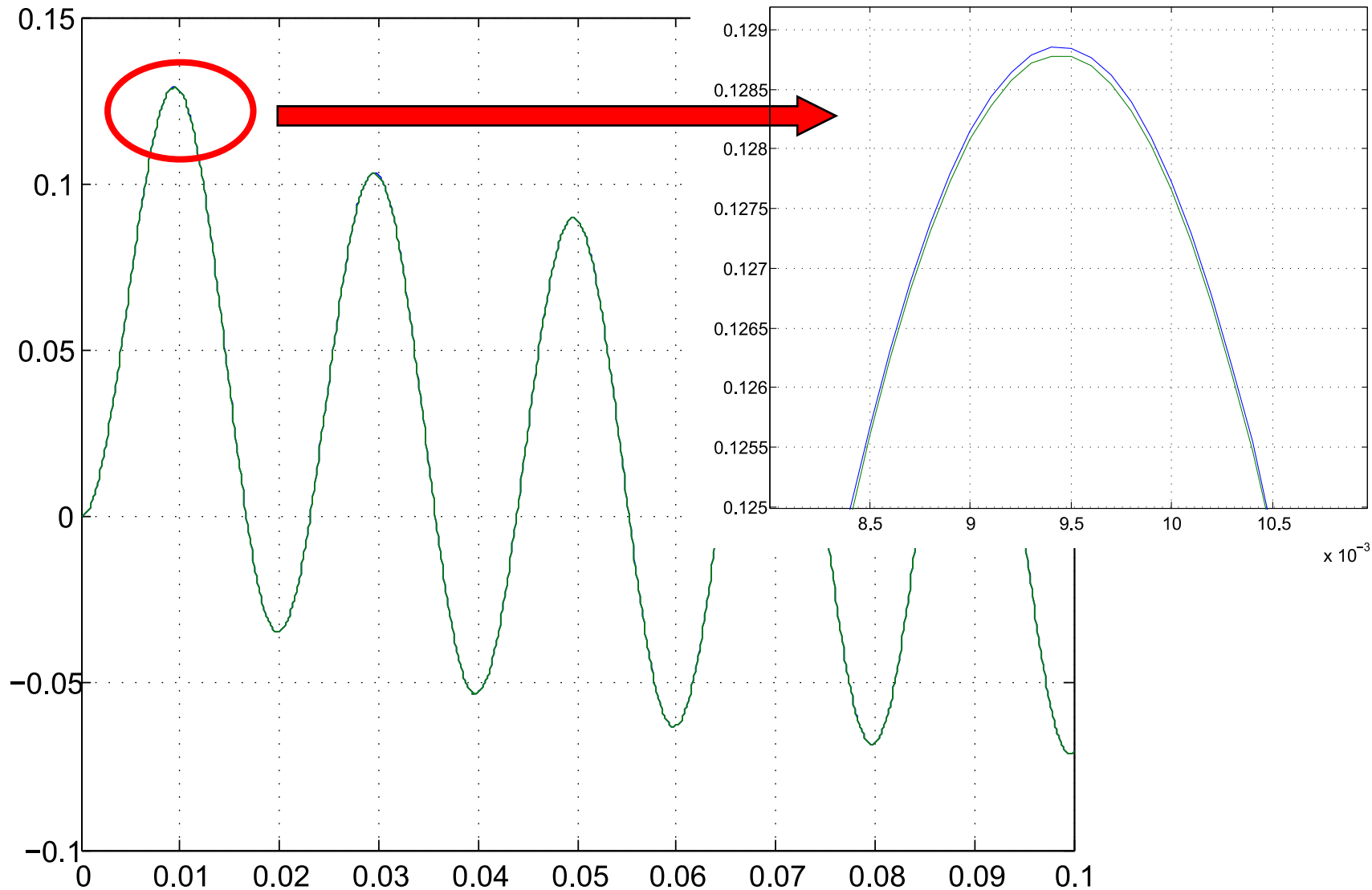
Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H :



Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H :



Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

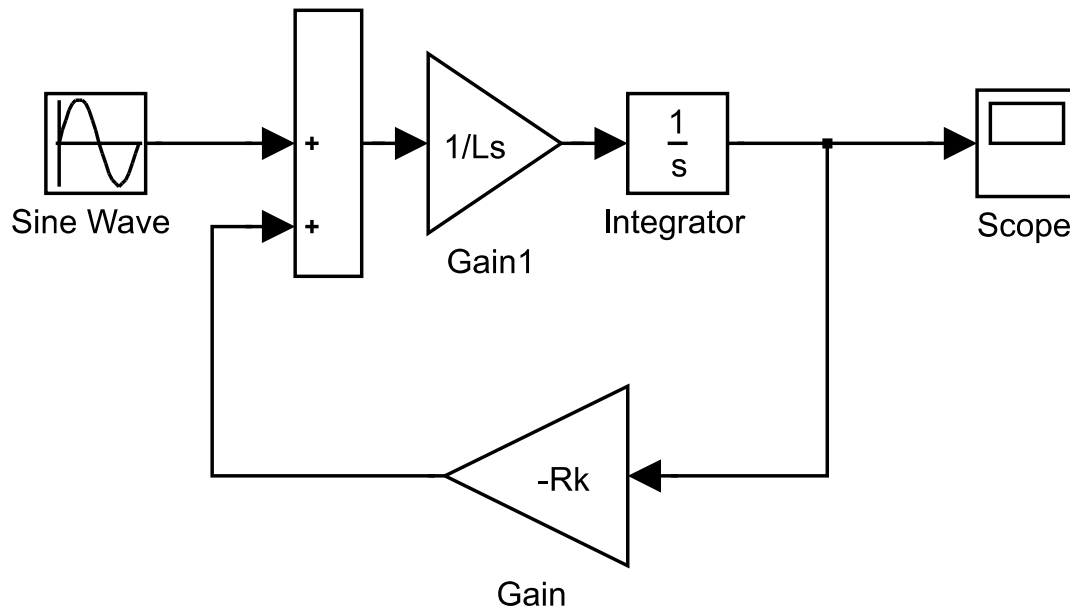
Transformátor nakrátko

$$L_{\sigma} \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot R_K = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$$

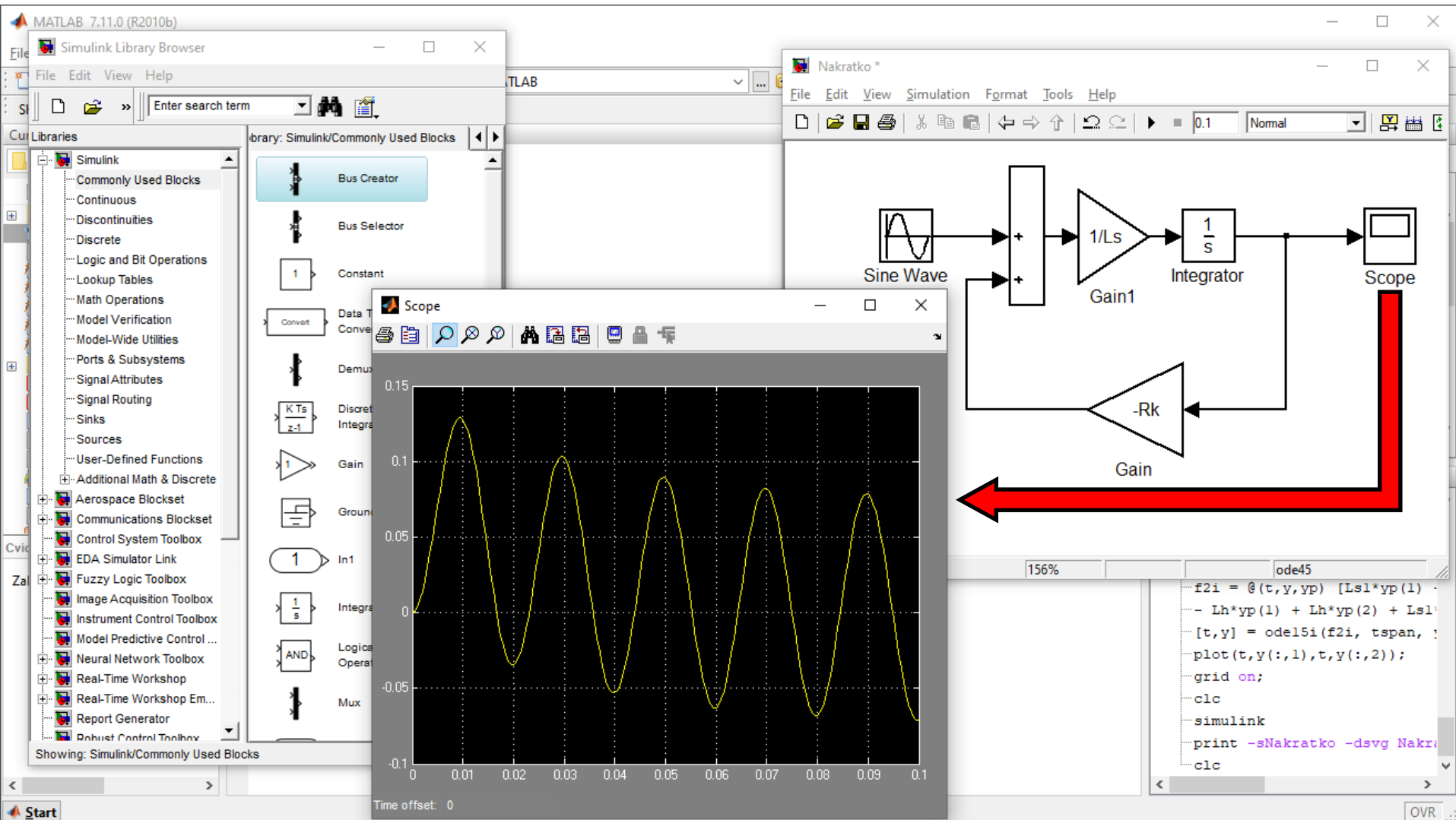
➔

$$\frac{di_K}{dt} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_K \cdot R_K}{L_{\sigma}}$$



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H :

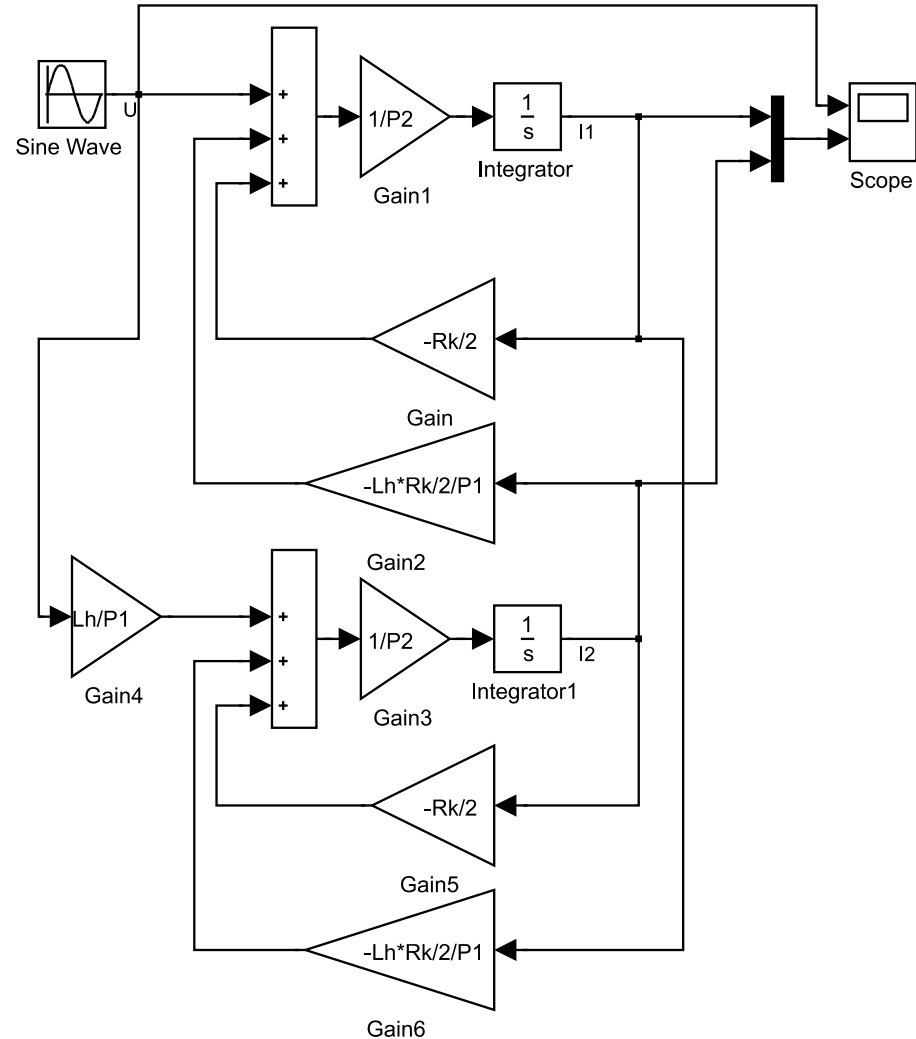
$$P_1 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h$$

$$P_2 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h - \frac{L_h^2}{P_1}$$



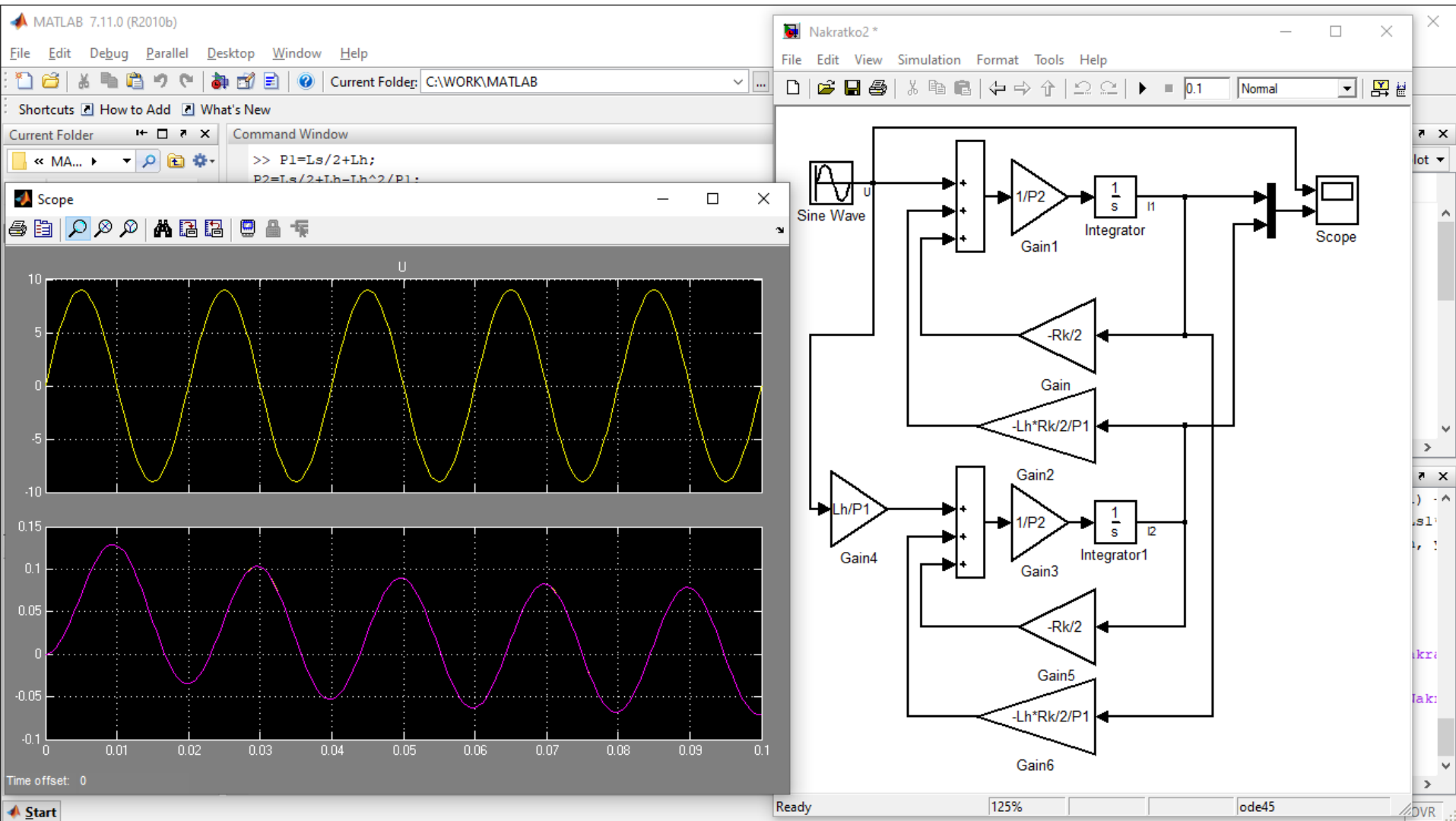
$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_1 \cdot \frac{R_K}{2} - L_h \cdot i_2 \frac{R_K}{2} \cdot \frac{1}{P_1}}{P_2}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{\frac{L_h \cdot u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - \frac{L_h \cdot i_1 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_1} - i_2 \frac{R_K}{2}}{P_2}$$



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko

Řešení implicitní numerickou metodou bez zanedbání L_H :

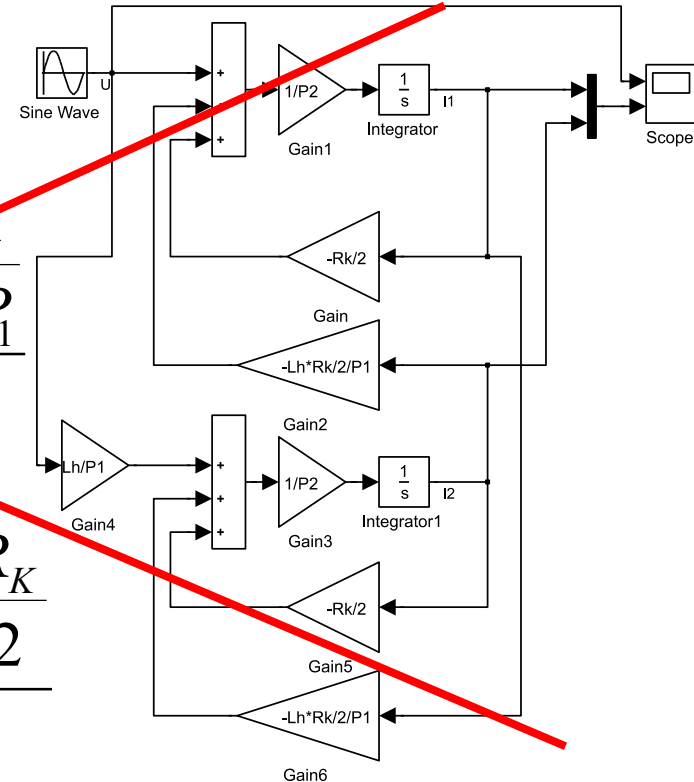
$$\frac{L_\sigma}{2} \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot \frac{R_K}{2} + L_h \frac{di_1}{dt} - L_h \frac{di_2}{dt} = \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)$$

$$-L_h \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{di_2}{dt} + \frac{L_\sigma}{2} \frac{di_2}{dt} + i_2 \cdot \frac{R_K}{2} = 0 \quad \rightarrow$$

$$P_1 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h \qquad P_2 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h - \frac{L_h^2}{P_1}$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_1 \cdot \frac{R_K}{2} - L_h \cdot i_2 \cdot \frac{R_K}{2} \cdot \frac{1}{P_1}}{P_2}$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{L_h \cdot \frac{u_K [\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)}{P_1} - \frac{L_h \cdot i_1 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_1} - i_2 \frac{R_K}{2}$$



Transformátor nakrátko

Řešení implicitní numerickou metodou bez zanedbání L_H :

$$L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot R_{K1} + L_h \frac{di_1}{dt} - L_h \frac{di_2}{dt} = U_{km} \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_{km} = \frac{u_K [\%]}{100} U_m$$

$$-L_h \frac{di_1}{dt} + L_h \frac{di_2}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_2}{dt} + i_2 \cdot R_{K1} = 0 \quad \rightarrow$$

```
Ukm=Ukp/100*Un1/sqrt(3)*sqrt(2);
```

```
tspan = 0 : 0.0001 : 0.1;
```

```
y0 = [0; 0];
```

```
yp0 = [0; 0];
```

```
% Ls1*i1' + Rk1*i1 + Lh*i1' + Lh*i2' = Ukm*sin(omega*t)
```

```
% - Lh*i1' + Lh*i2' + Ls1*i2' + Rk1*i2 = 0
```

```
f2i = @(t,y,yp) [Ls1*yp(1) + Rk1*y(1) + Lh*yp(1) - Lh*yp(2) - Ukm*sin(omega*t)  
                - Lh*yp(1) + Lh*yp(2) + Ls1*yp(2) + Rk1*y(2)];
```

```
[t,y] = ode15i(f2i, tspan, y0, yp0);
```

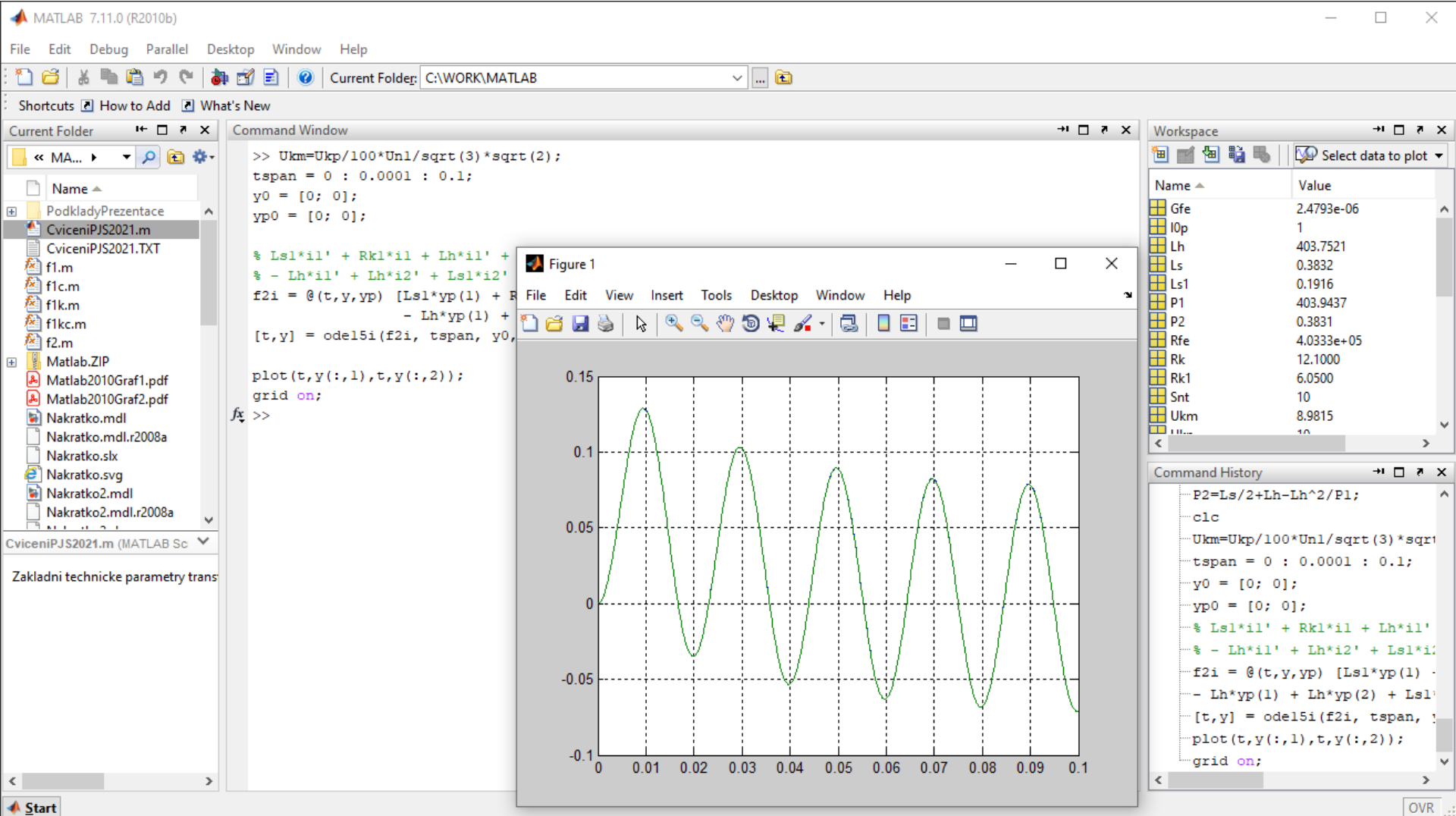
```
plot(t,y(:,1),t,y(:,2));
```

```
grid on;
```

Zpracování pomocí soustavy implicitních diferenciálních rovnic

Transformátor nakrátko

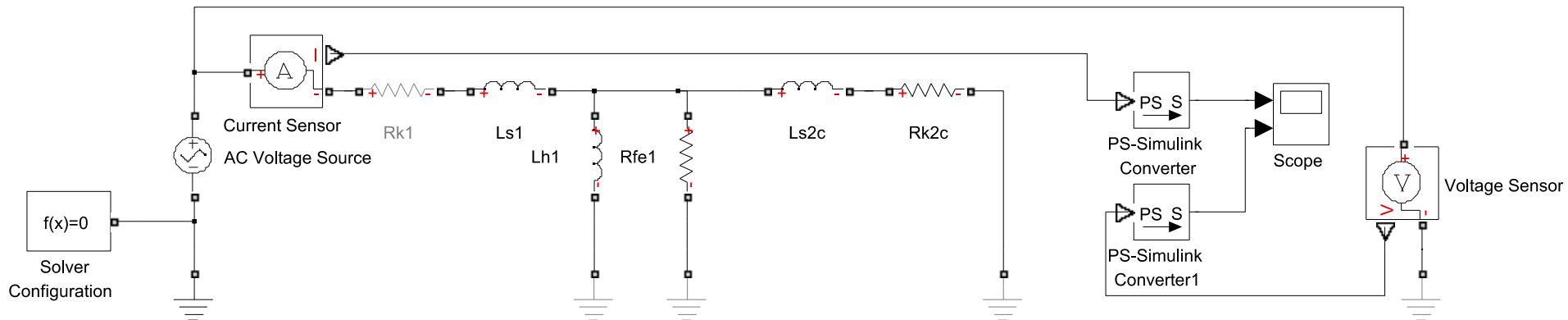
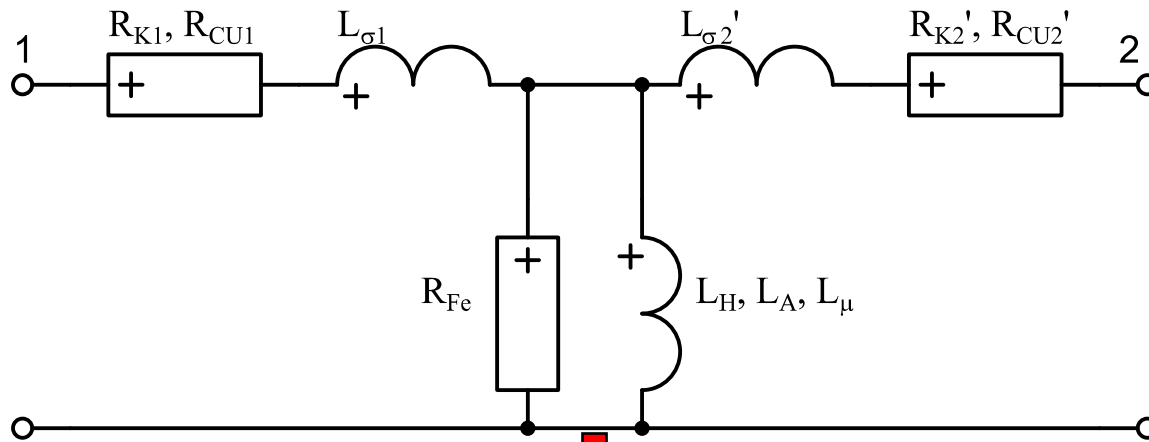
Řešení implicitní numerickou metodou bez zanedbání L_H :



Zpracování pomocí soustavy implicitních diferenciálních rovnic

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou s kompletní topologií:



Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou s kompletní topologií:

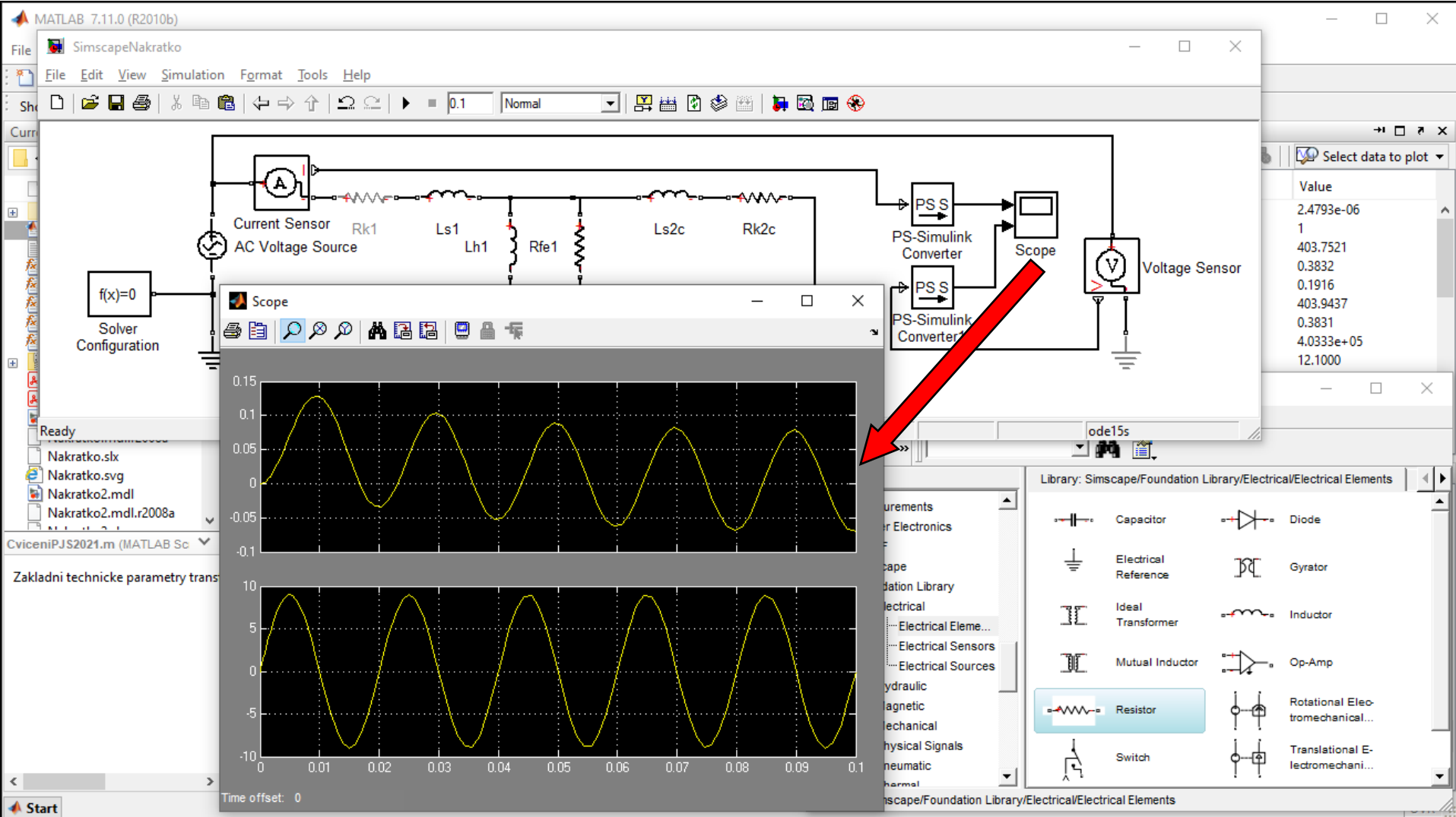
The screenshot shows the Simscape software interface with a circuit diagram of a transformer. The circuit includes an AC Voltage Source, a Current Sensor, resistors R_{k1} and R_{k2c} , inductors L_{s1} and L_{s2c} , and a transformer core with inductance L_{h1} and resistance R_{fe1} . The simulation results are displayed in a table on the right:

Value
2.4793e-06
1
403.7521
0.3832
0.1916
403.9437
0.3831
4.0333e+05
12.1000

Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

Transformátor nakrátko

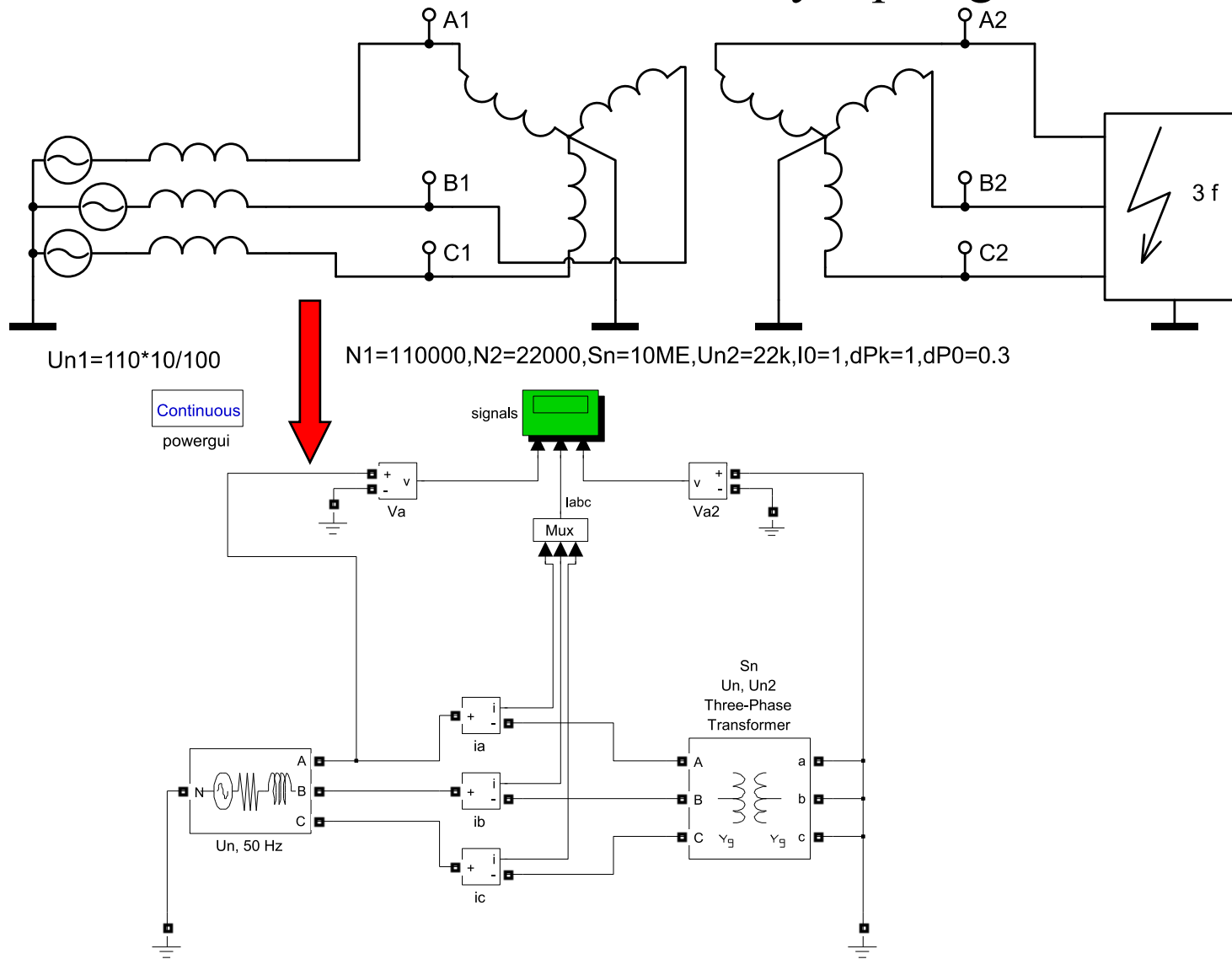
Řešení numerickou metodou s kompletní topologií:



Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou 3f varianty topologie:



Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou 3f varianty topologie:

The image displays a Simulink model of a three-phase transformer in a short-circuit configuration. The primary side is connected to a three-phase AC source labeled 'Un, 50 Hz'. The secondary side is short-circuited. A 'Mux' block is used to measure the primary currents i_a , i_b , and i_c . A 'signals' block is connected to the Mux output. A 'Continuous powergui' block is also present. A red arrow points from the transformer block in the model to the 'Block Parameters: Sn Un, Un2 Three-Phase Transformer' dialog box.

The dialog box shows the following parameters:

- Units: pu
- Nominal power and frequency [Pn(VA), fn(Hz)]: [Snt*1e6 50]
- Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)]: [Un1*1e3 Rk1/Znt Xs1/Znt]
- Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), L2(pu)]: [Un2*1e3 Rk1/Znt Xs1/Znt]
- Magnetization resistance Rm (pu): Rfe/Znt
- Magnetization inductance Lm (pu): Xh/Znt

The 'Value' table on the right side of the dialog box shows the following values:

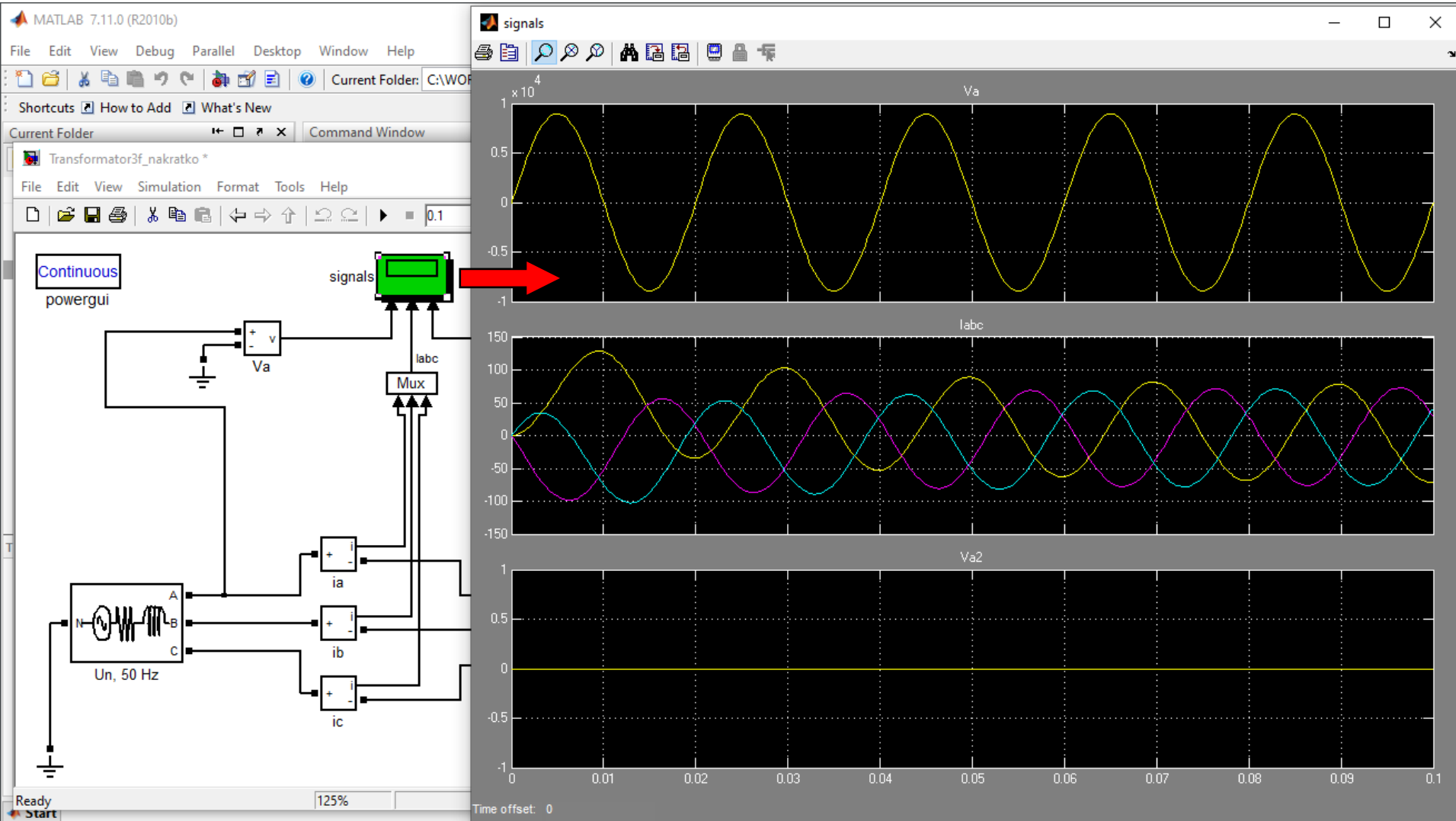
Value
7.0808e-04
0.0739
6.6804e-05
2.4793e-06
2.3881e-08 - 5.0069
7.0808e-04
7.0808e-04
7.4227e-04
1
<101x1 double>
0.0052 - 0.0522i
0.0742
0.0742

The equation $Z_{nt} = \frac{U_{n1}^2}{S_{nt}}$ is displayed at the bottom left of the model window.

Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou 3f varianty topologie:



Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems