ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Řešení přechodných dějů na transformátoru v nástroji MathWorks MATLAB R2021b

Cvičení PJS

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

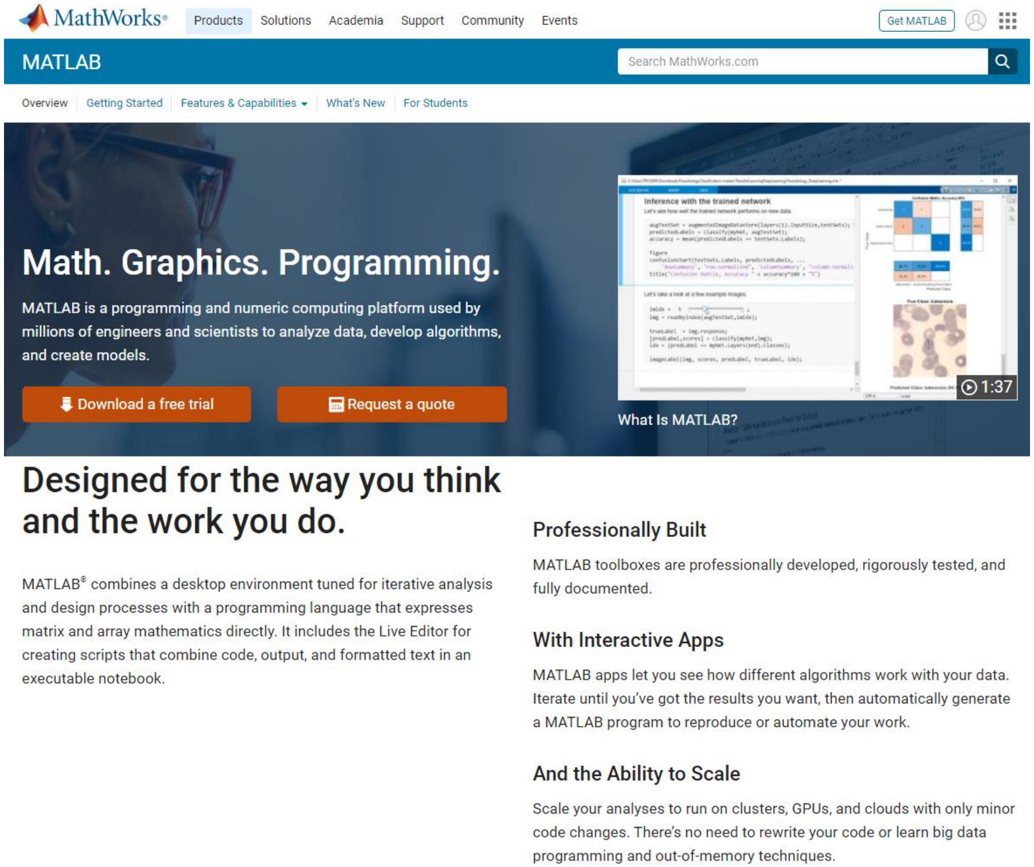
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

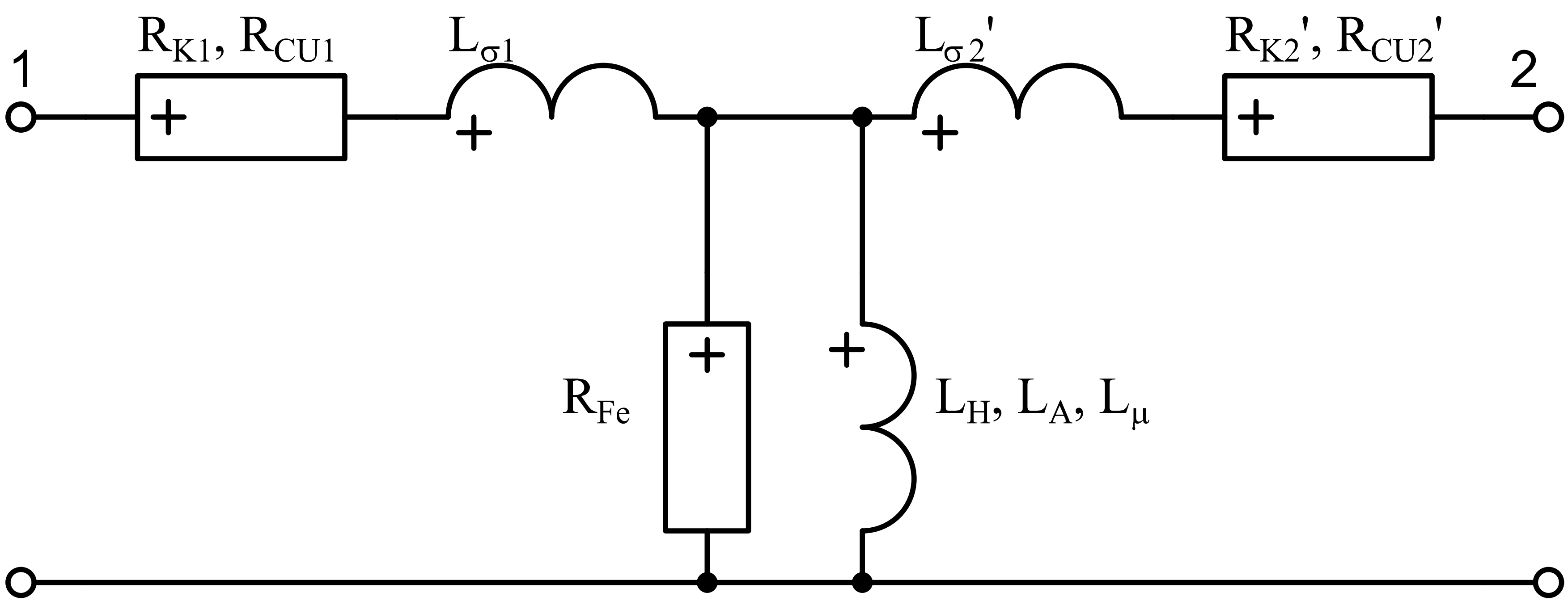
Výpočet přechodného děje na transformátoru

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

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



Náhradní schéma transformátoru



Parametry transformátoru

$$u_K = 10\,\%$$
$$i_0 = 1\,\%$$
$$U_{N1} = 110\,kV$$
$$U_{N2} = 22\,kV$$
$$S_{NT} = 10\,MVA$$

$$\Delta P_0 = 0.3\,\%$$
$$\Delta P_K = 1.0\,\%$$

```
Ukp=10;
I0p=1;
Un1=110;
Un2=22;
Snt=10;

dP0p=0.3;
dPkp=1;
```

Parametry transformátoru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

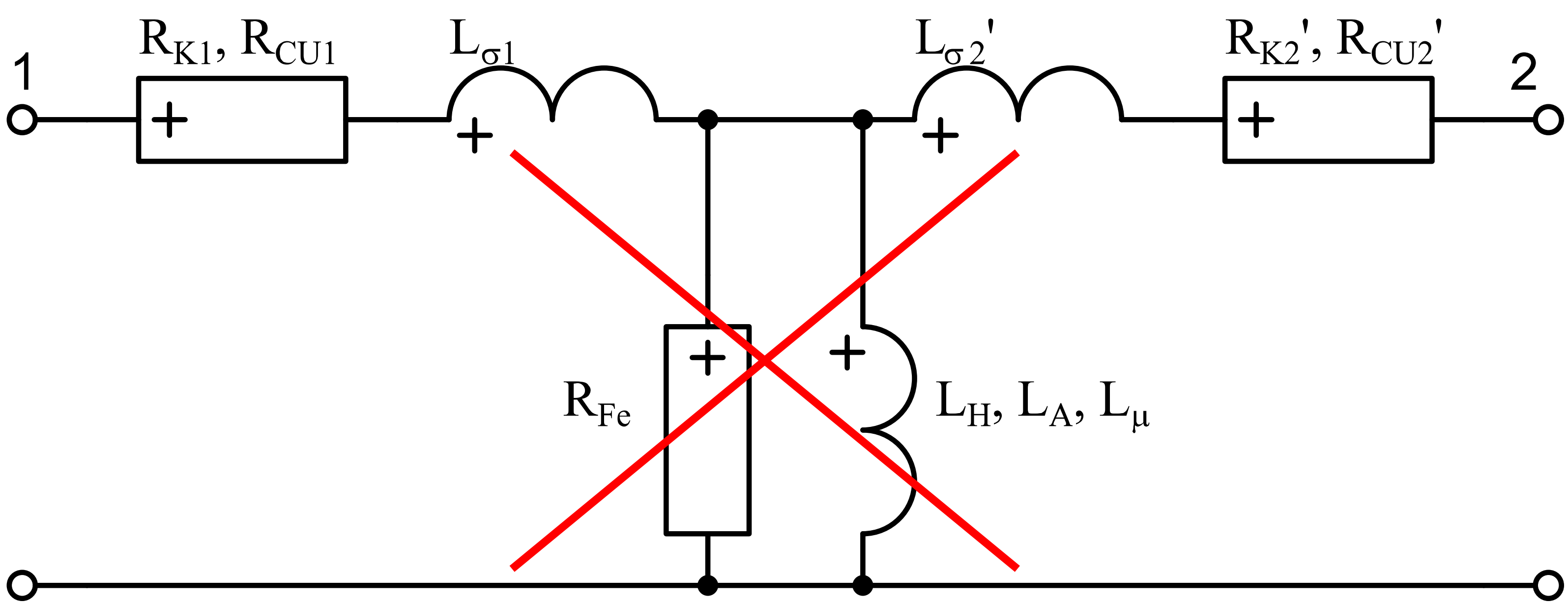
```
frekv=50;
omega=2*pi*frekv;

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:

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

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



Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou se zanedbáním příčné části:

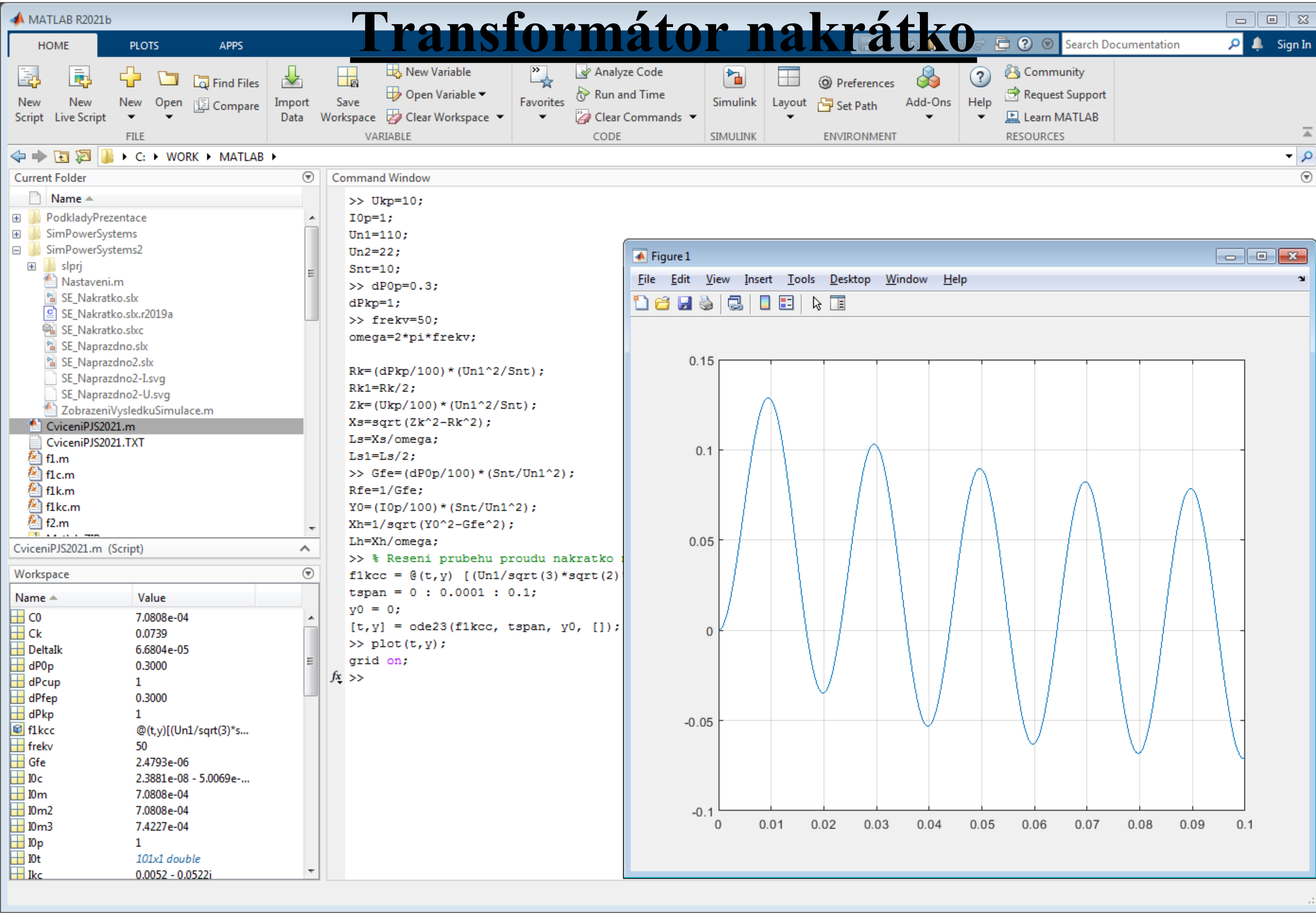
$$L_\sigma \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot R_K = \frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) \qquad U_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}}\sqrt{2}$$

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

```
% 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



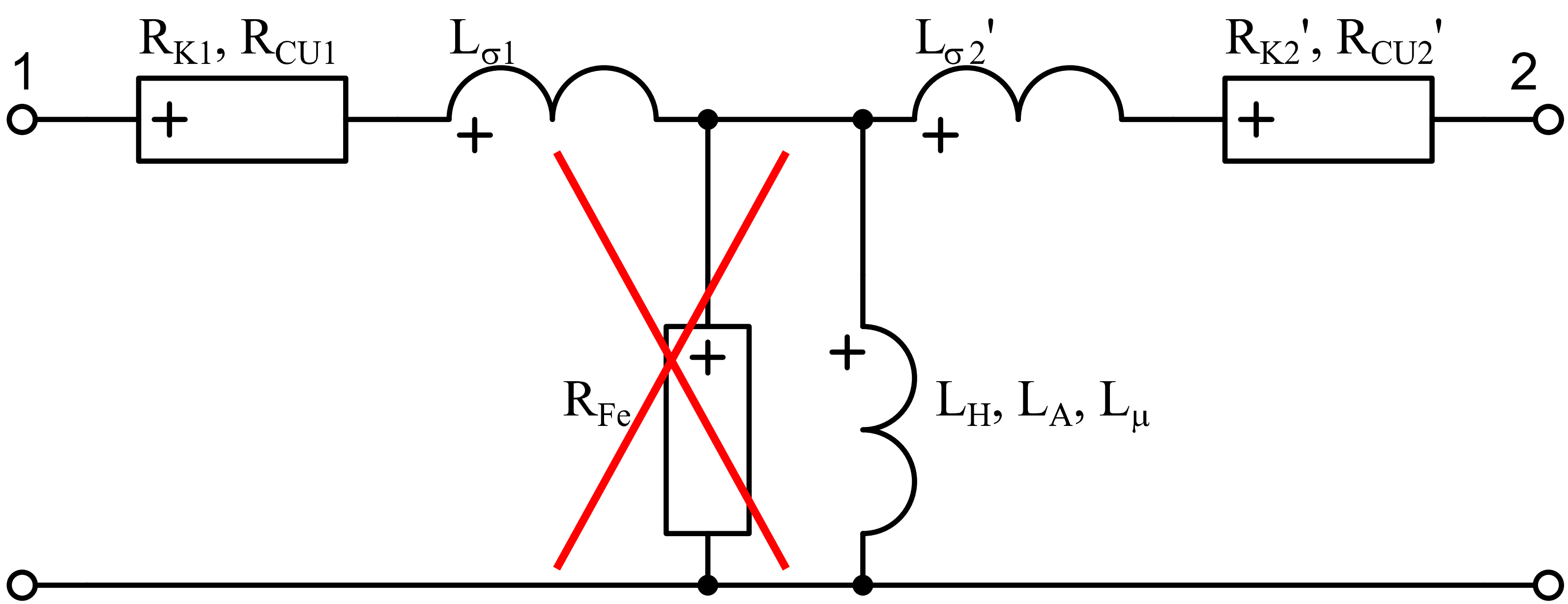
Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H:

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

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



Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H:

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

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

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

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

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

Transformátor nakrátko

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

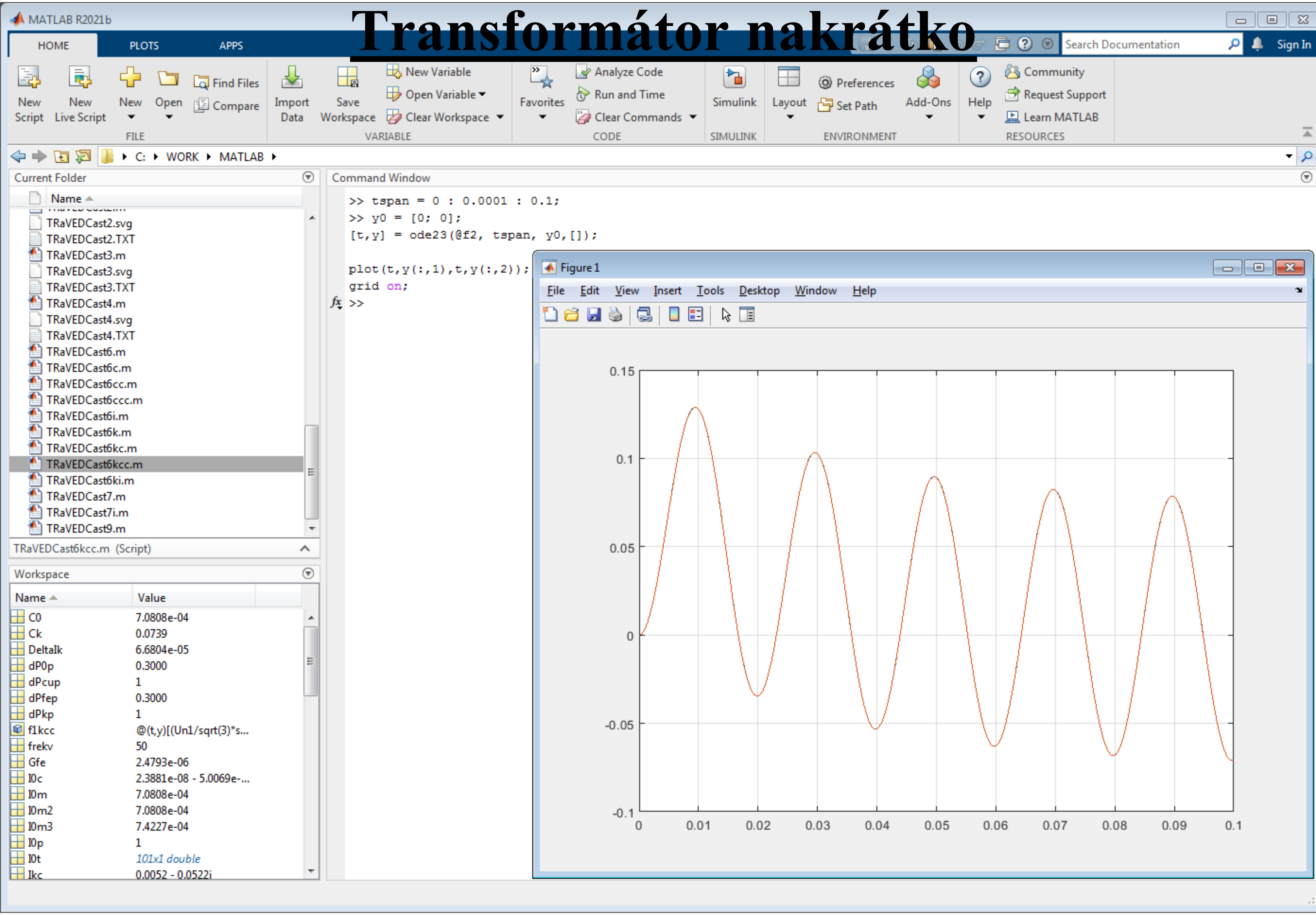
$$P_2 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h - \frac{L_h^{\ 2}}{P_1} \qquad \frac{di_2}{dt} = \frac{\frac{L_h \cdot \frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t)}{P_1} - \frac{L_h \cdot i_1 \cdot \frac{R_K}{2}}{P_1} - i_2 \frac{R_K}{2}}{P_2}$$

```
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

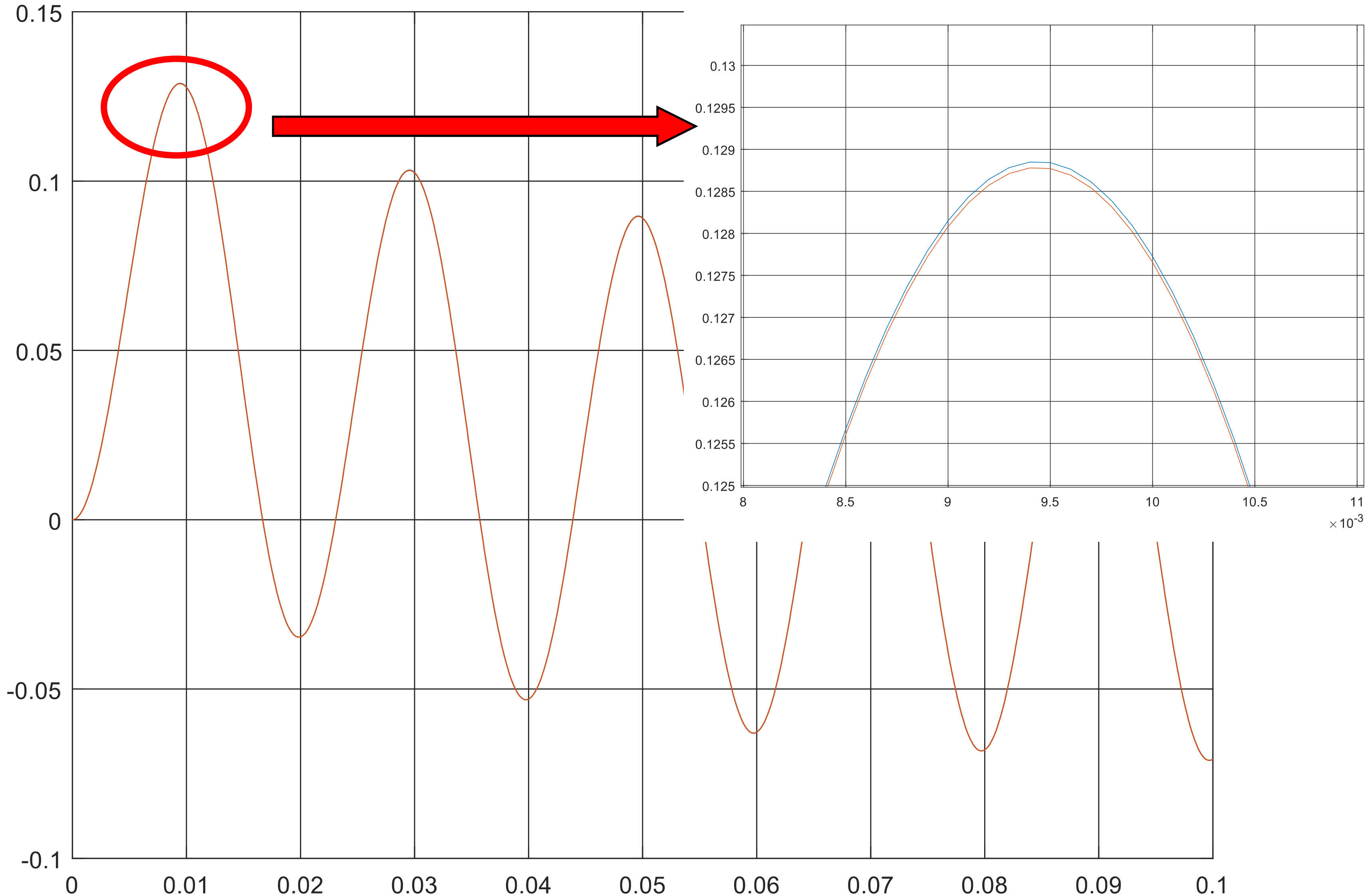
Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H:

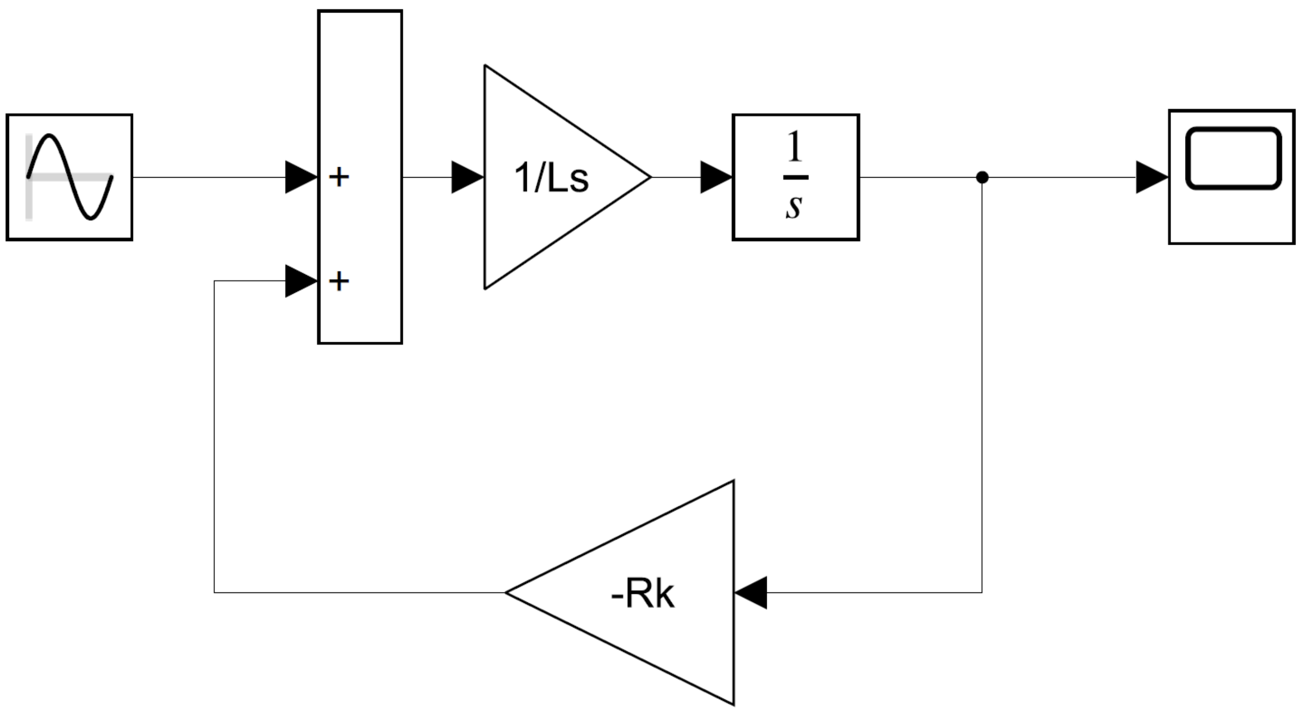


Zpracování pomocí integrační metody pro ODE

Transformátor nakrátko

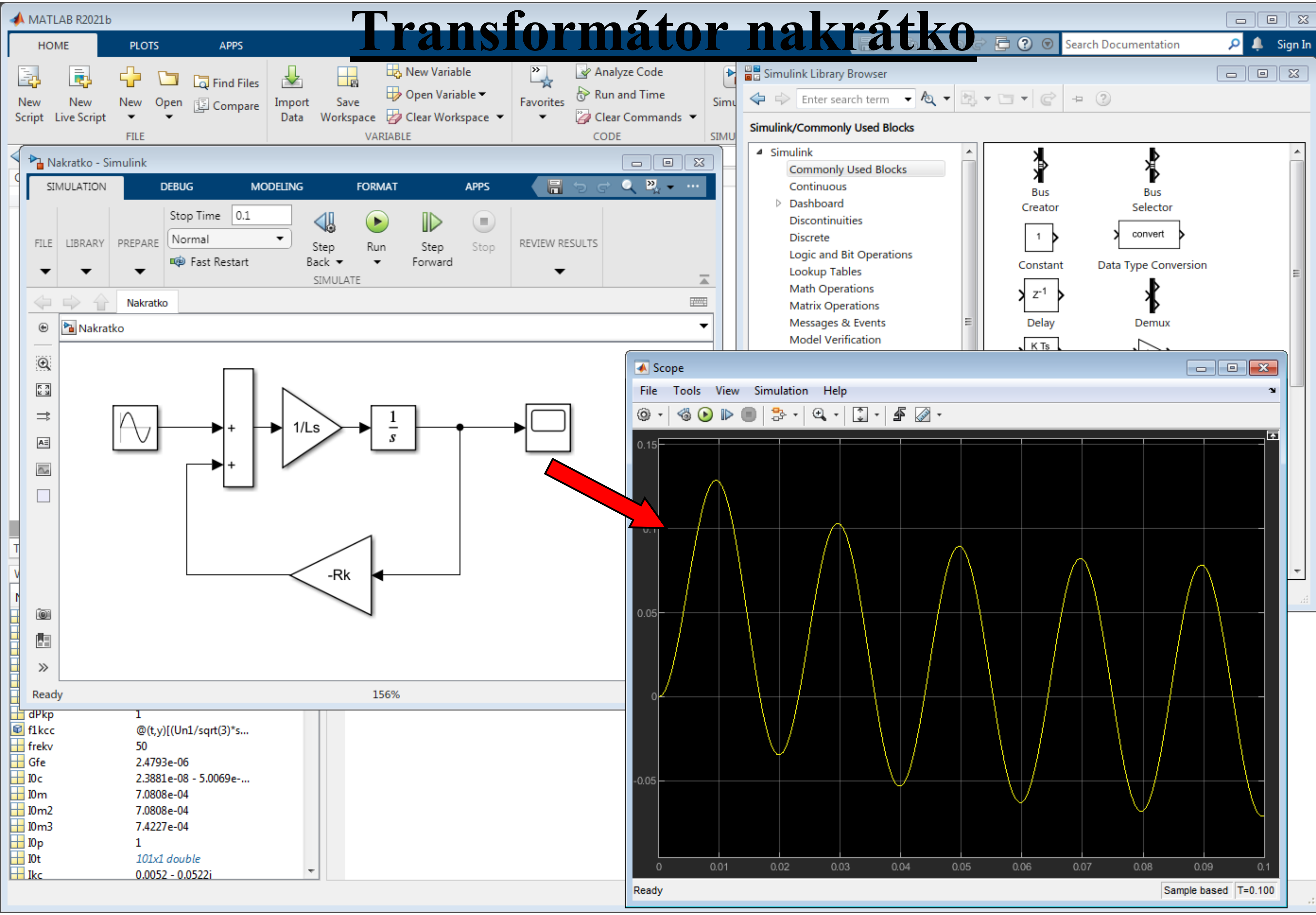
$$L_\sigma \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot R_K = \frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) \qquad U_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}}\sqrt{2}$$

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



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko

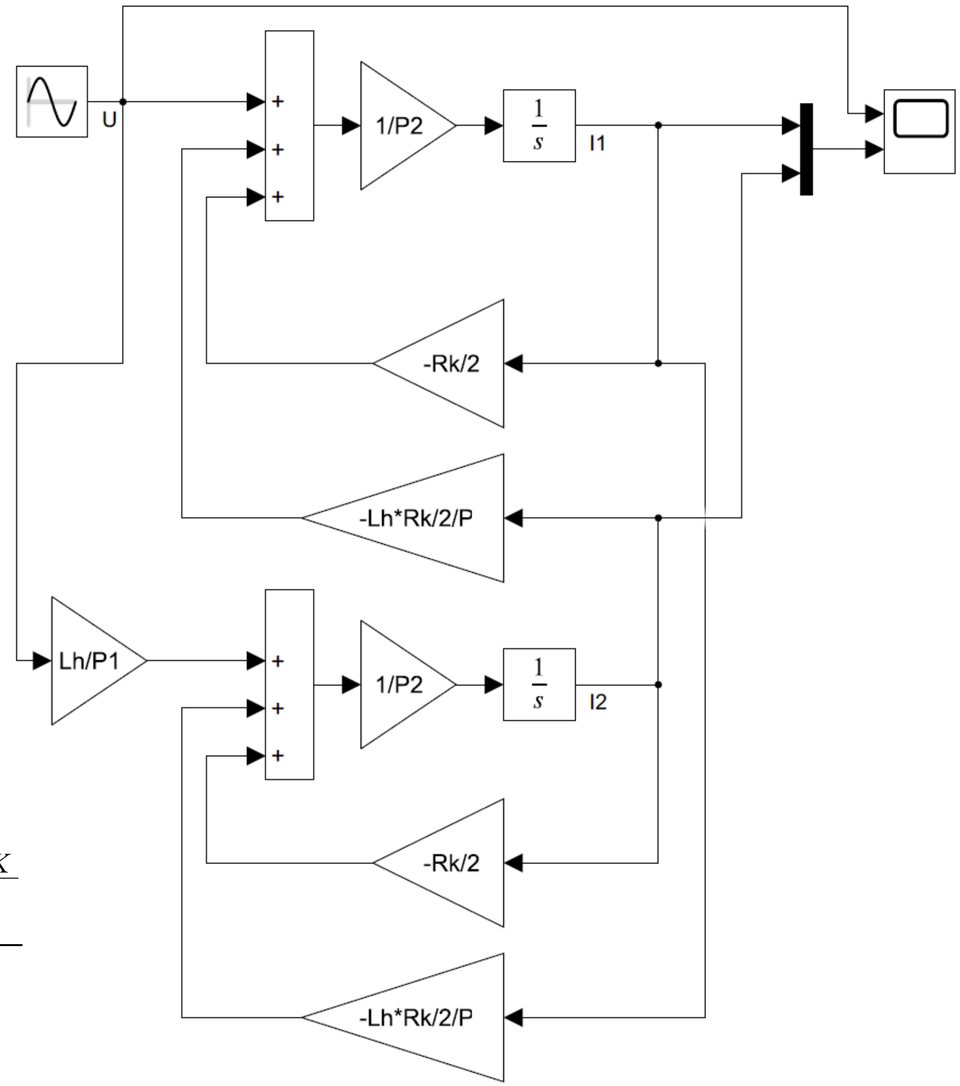
Řešení numerickou metodou bez zanedbání L_H:

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

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

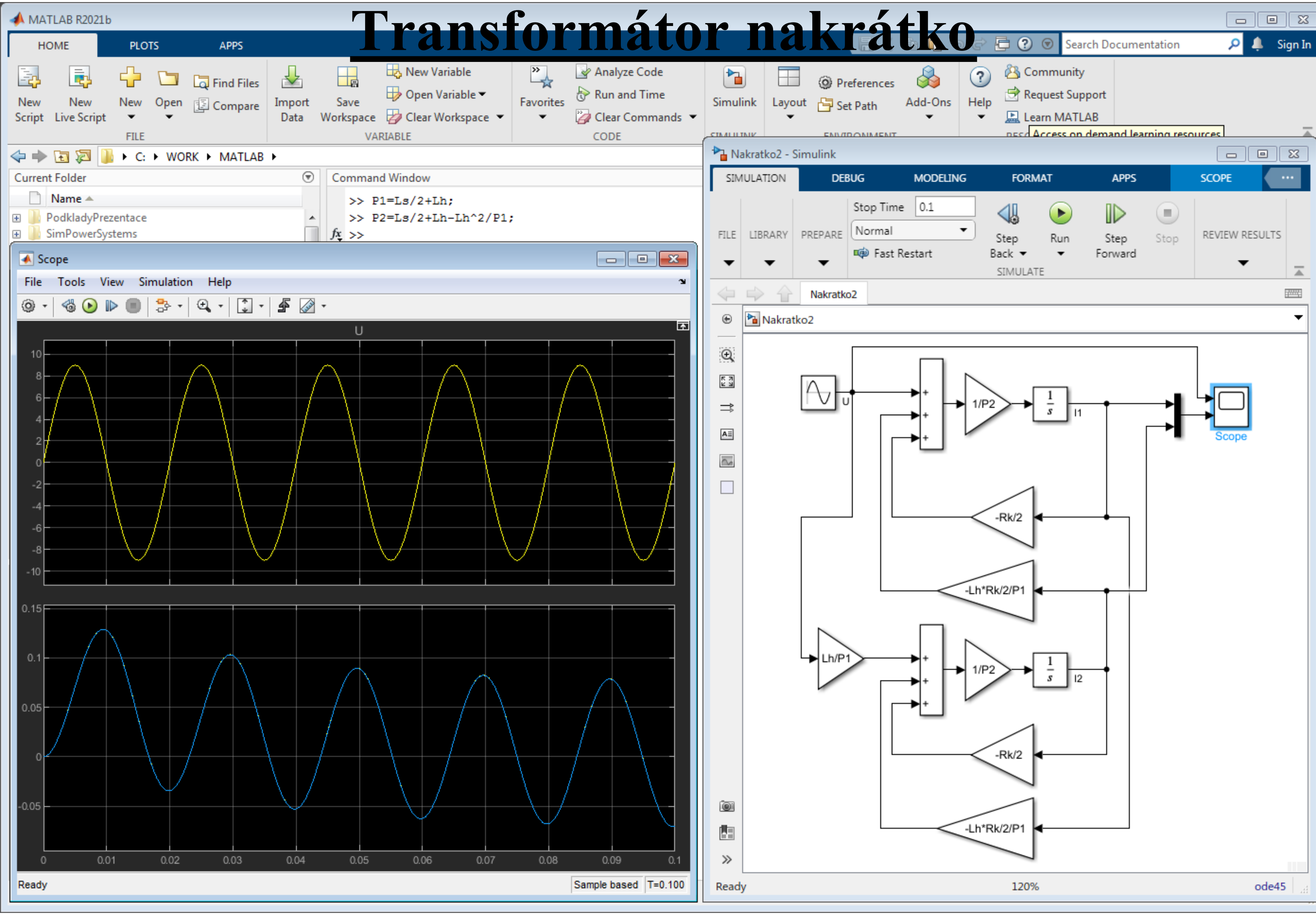
$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\frac{u_K[\%]}{100} U_m \sin(\omega \cdot t) - i_1 \cdot \frac{R_K}{2} - L_h \cdot i_2 \frac{R_K}{2} \cdot \frac{1}{P_1}}{P_2}$$

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



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí bloků nástroje Simulink

Transformátor nakrátko

Řešení implicitní numerickou metodou bez zanedbání L_H:

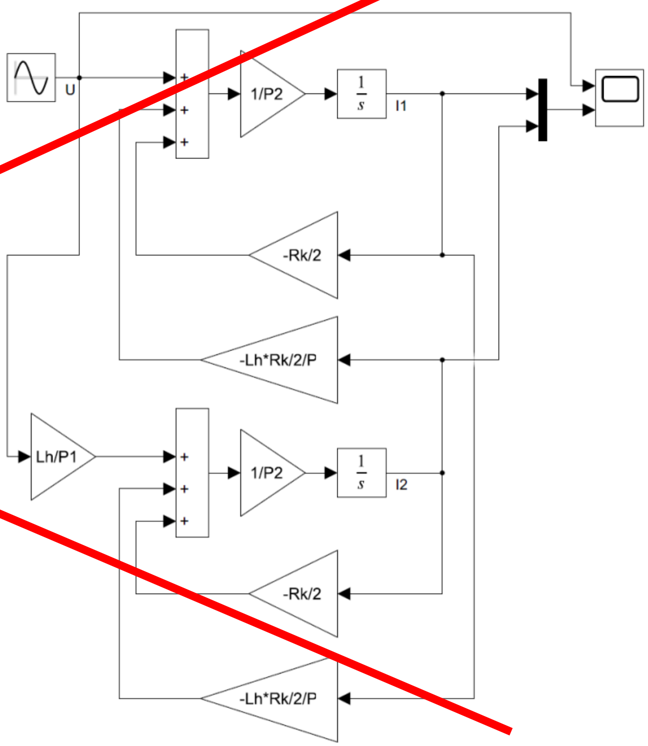
$$\frac{L_\sigma}{2}\frac{di_1}{dt}+i_1\cdot\frac{R_K}{2}+L_h\frac{di_1}{dt}-L_h\frac{di_2}{dt}=\frac{u_K[\%]}{100}U_m\sin(\omega\cdot t)$$

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

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

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

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



Transformátor nakrátko

Řešení implicitní numerickou metodou bez zanedbání L_H:

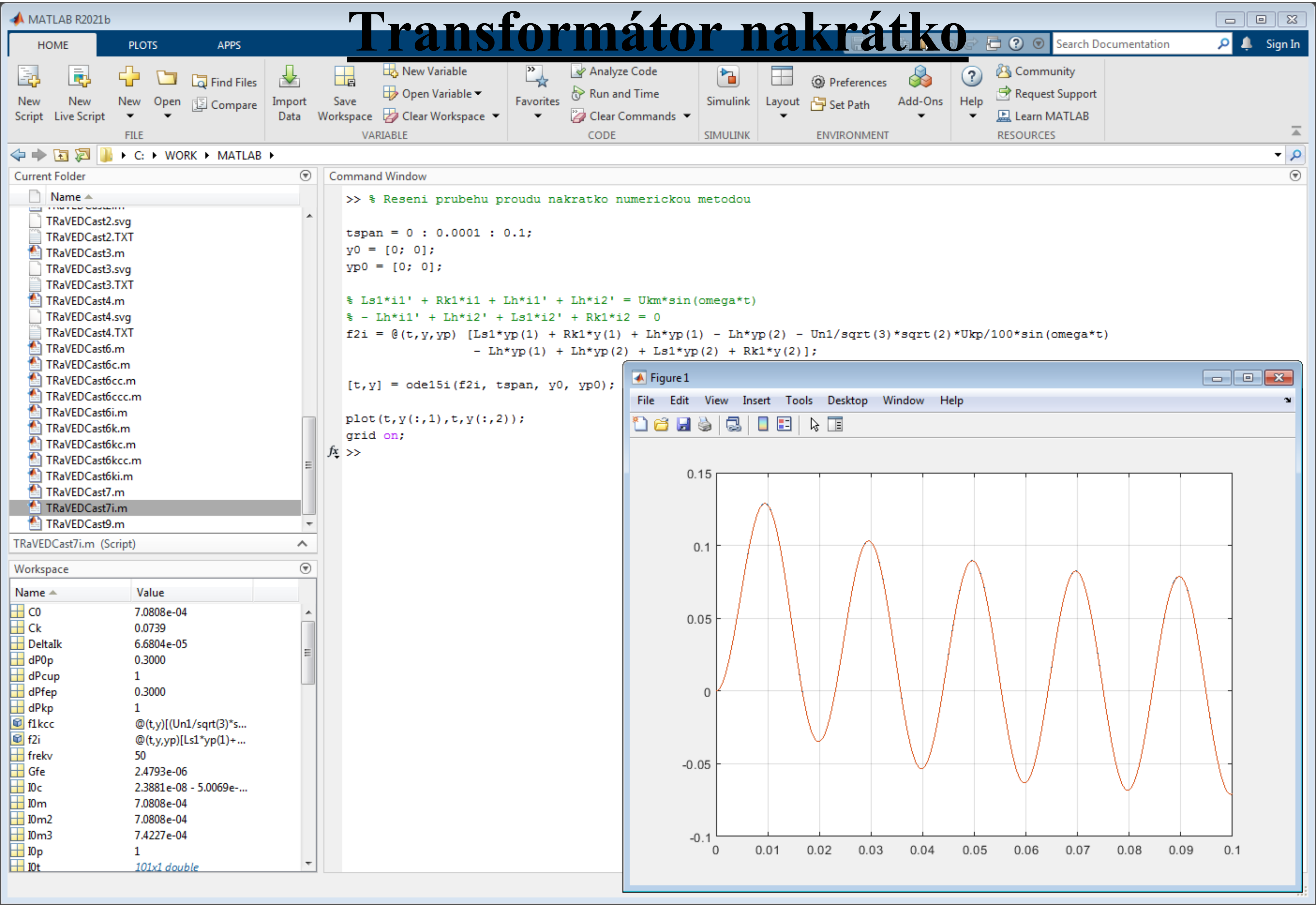
$$L_{\sigma 1}\frac{di_1}{dt}+i_1\cdot R_{K1}+L_h\frac{di_1}{dt}-L_h\frac{di_2}{dt}=U_{km}\sin(\omega\cdot t) \qquad U_{km}=\frac{u_K\left[\%\right]}{100}U_m$$

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

```
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

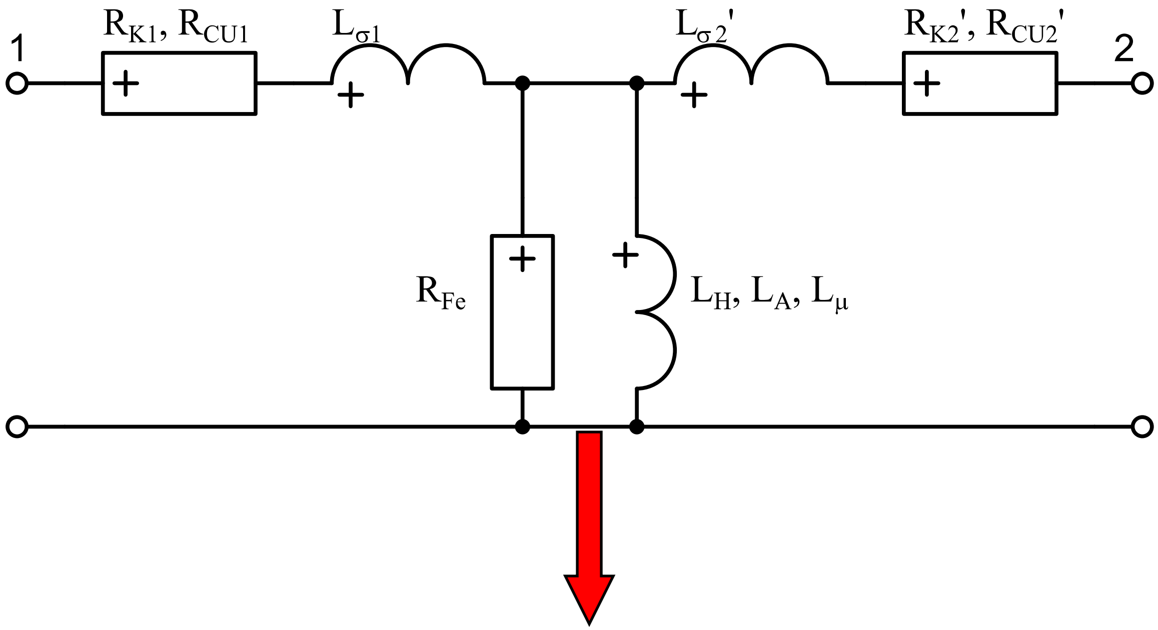
Transformátor nakrátko

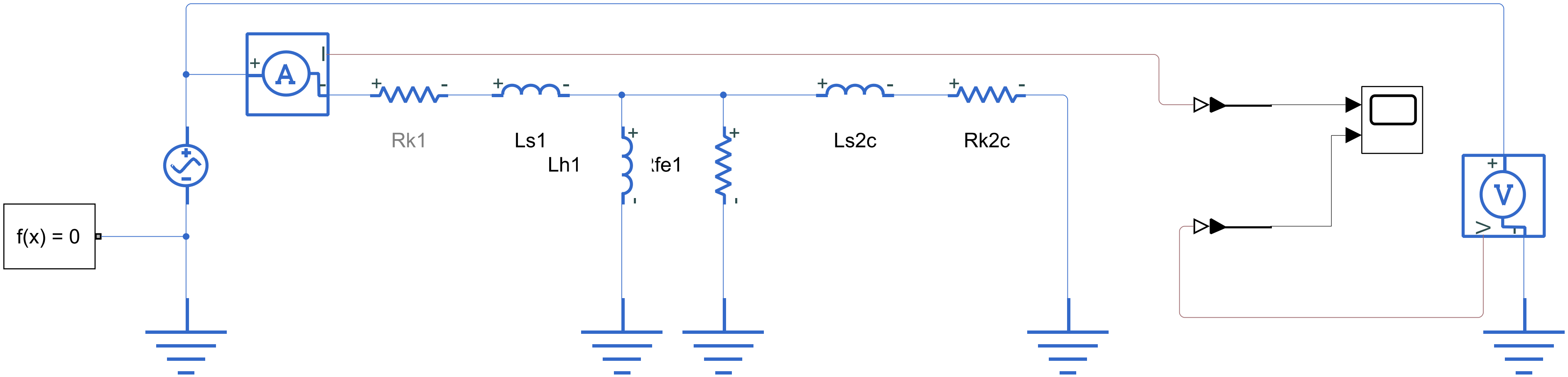


Zpracování pomocí soustavy implicitních diferenciálních rovnic

Transformátor nakrátko

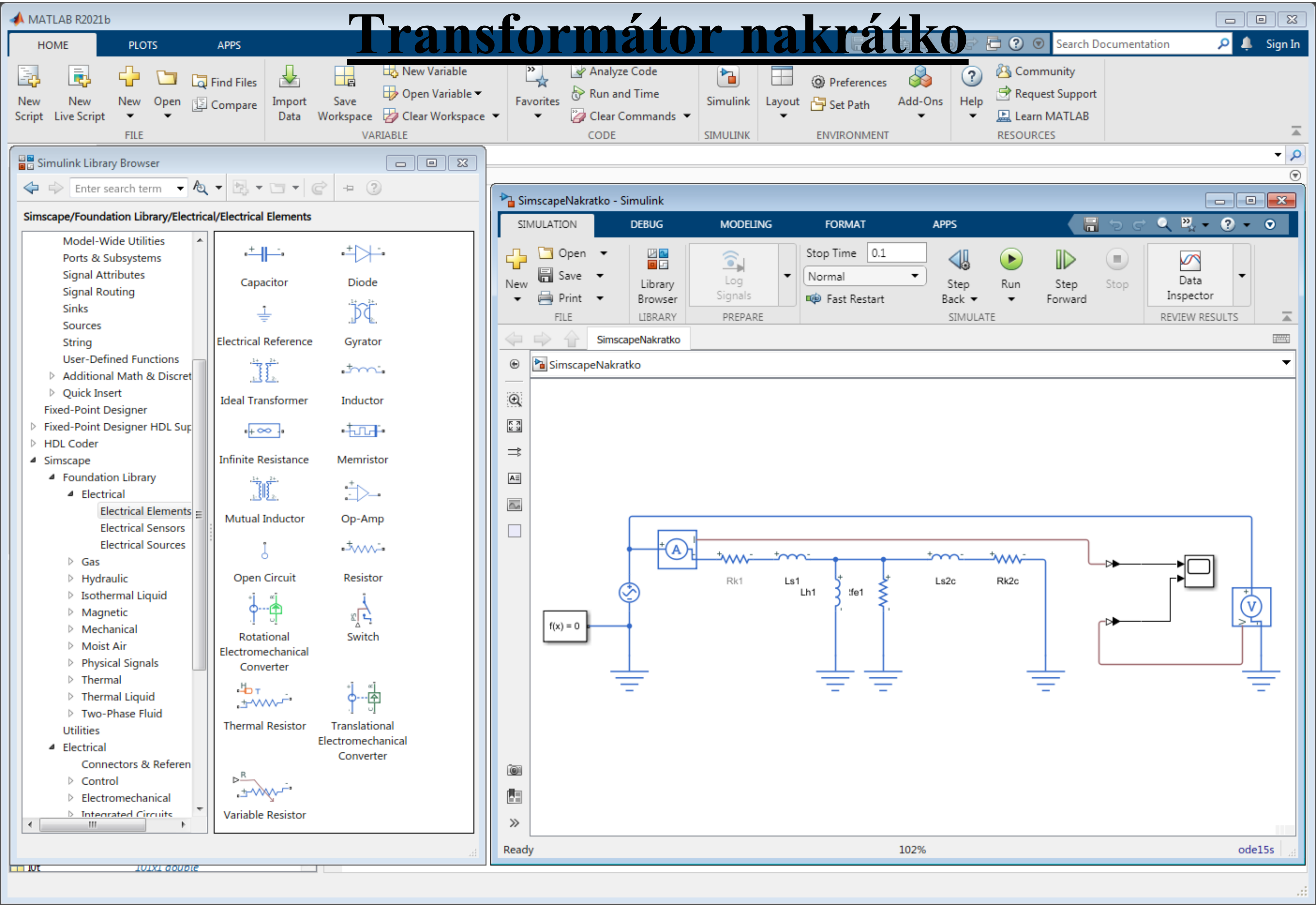
Řešení numerickou metodou s kompletní topologií:





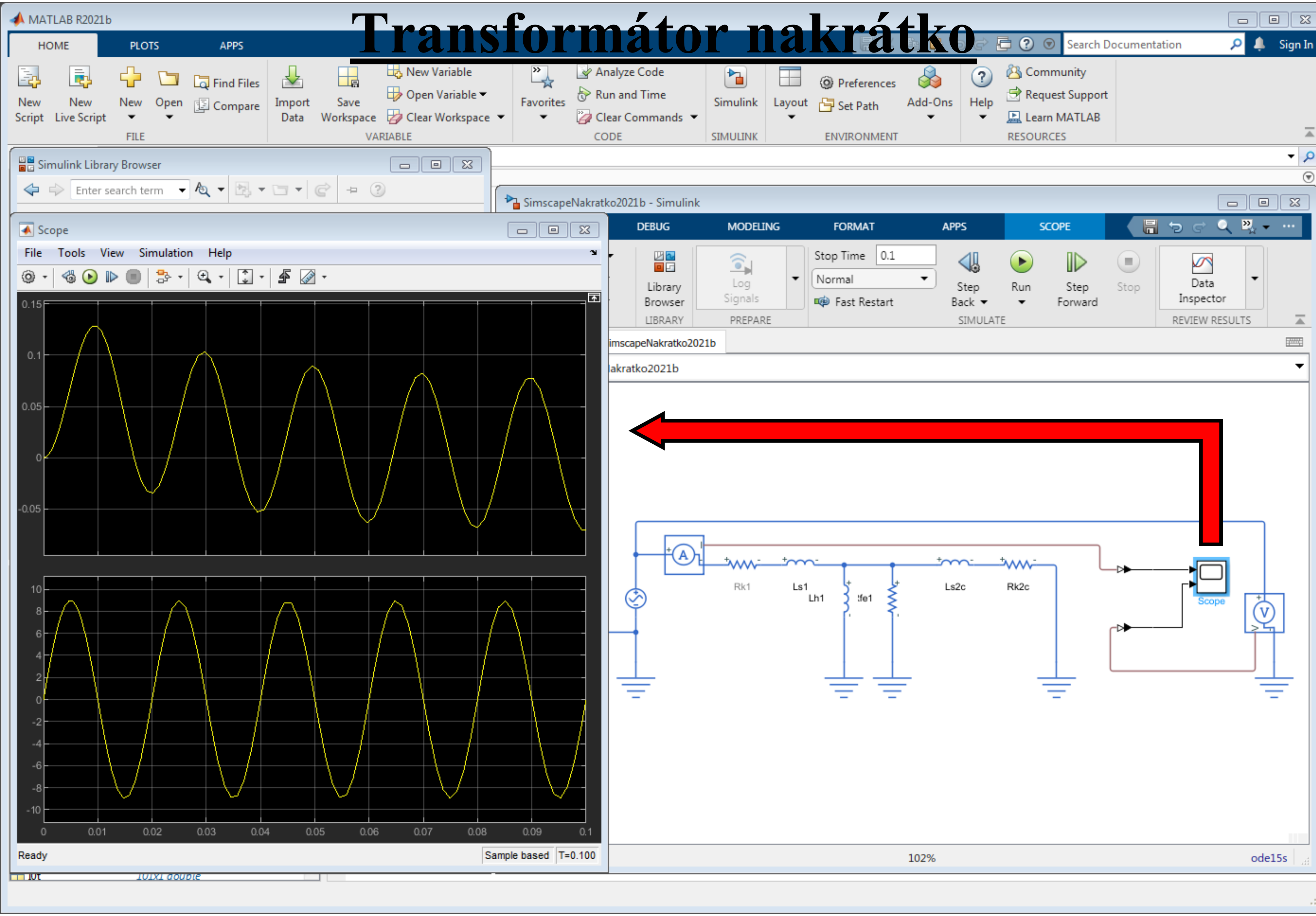
Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

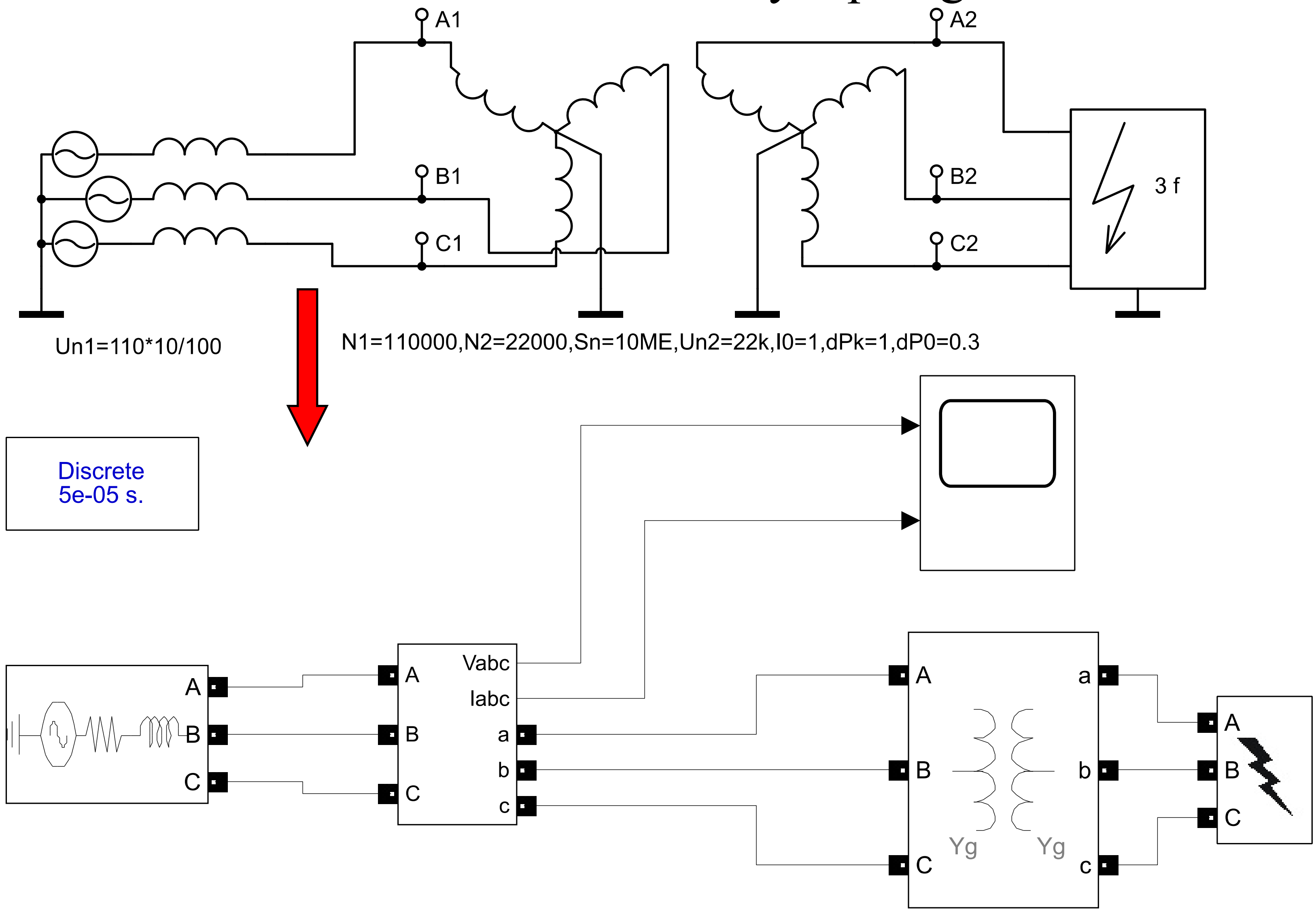
Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí obvodového schéma nástroje Simscape

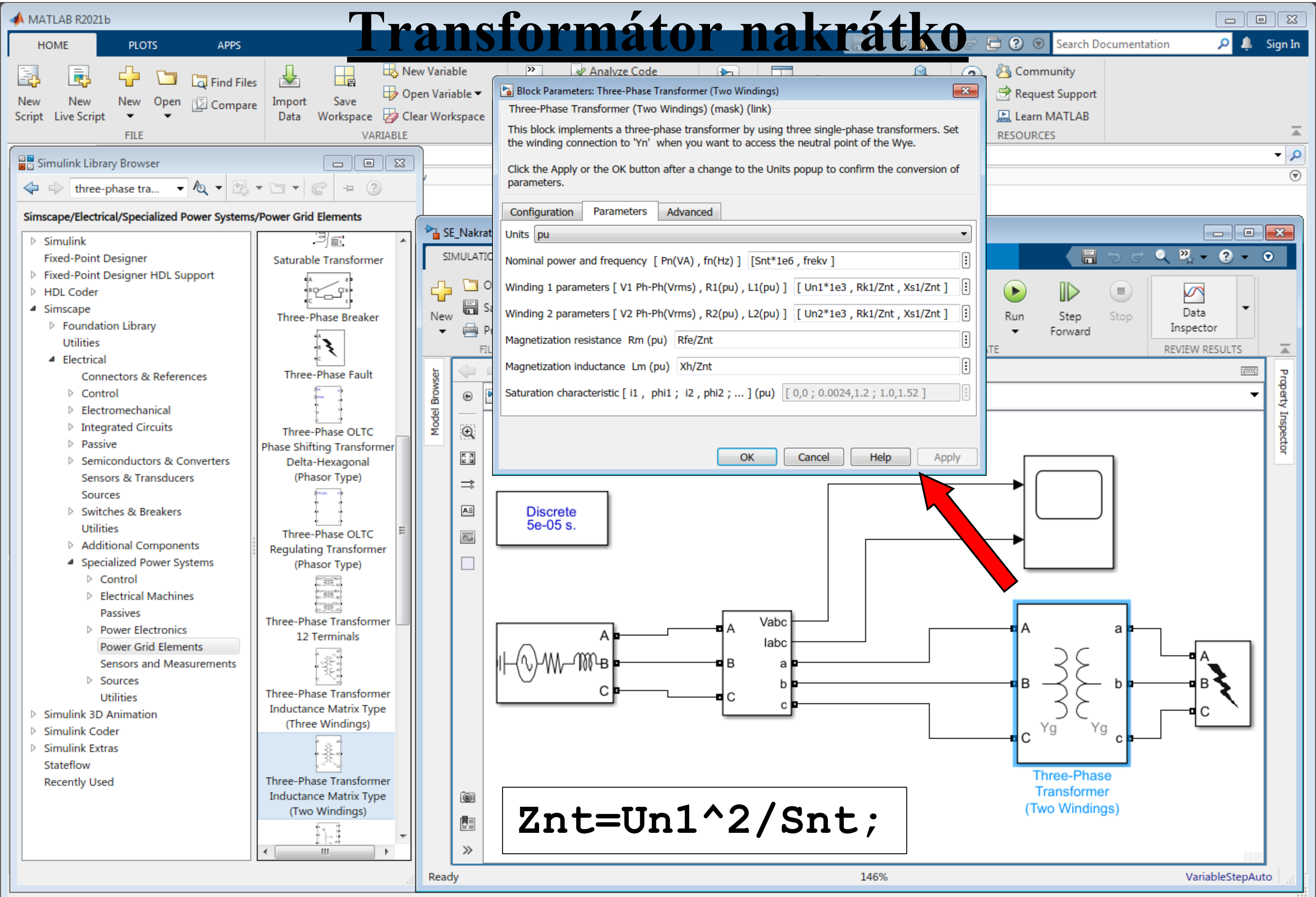
Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou 3f varianty topologie:



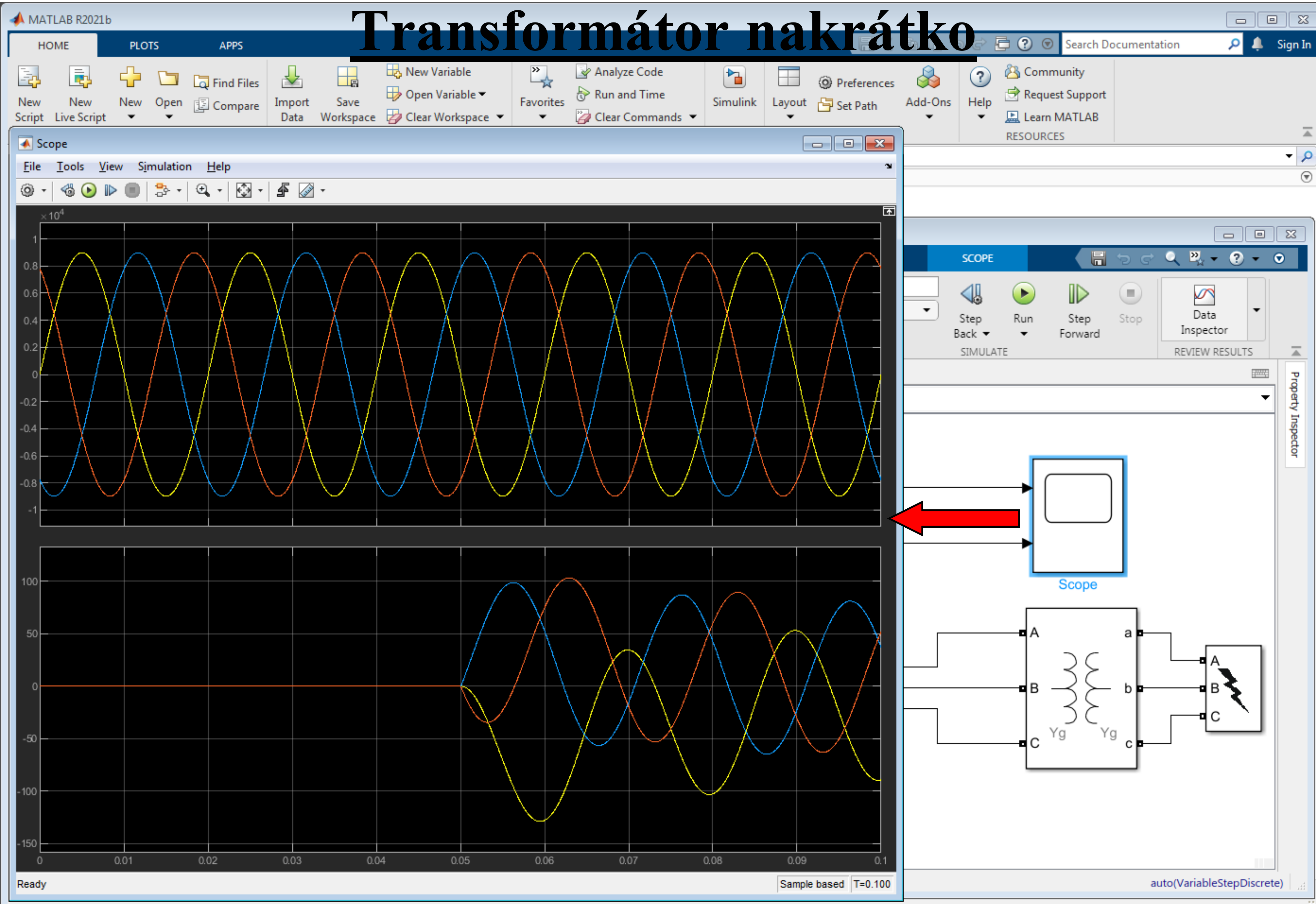
Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems

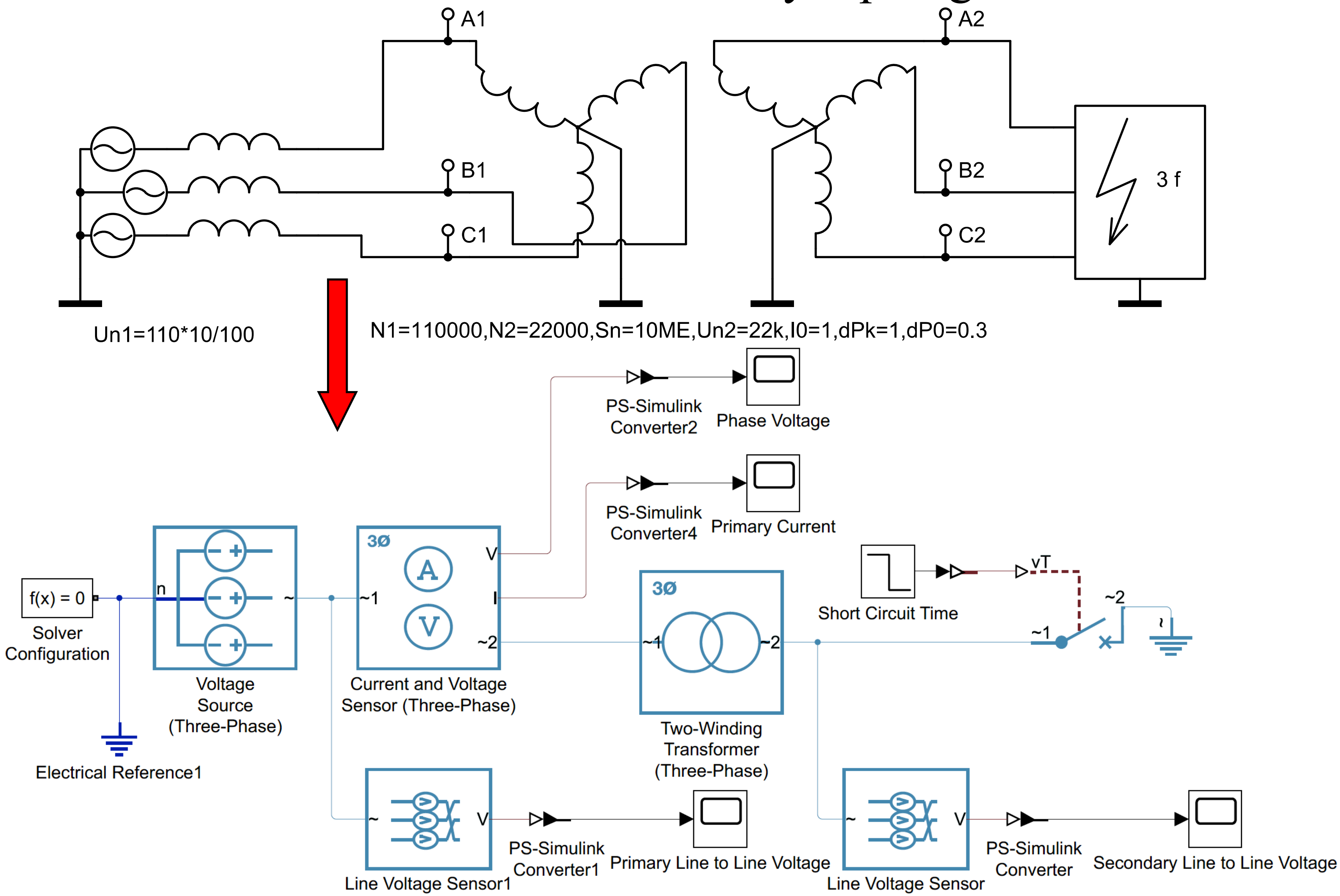
Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí nástroje Simscape a knihovny SimPowerSystems

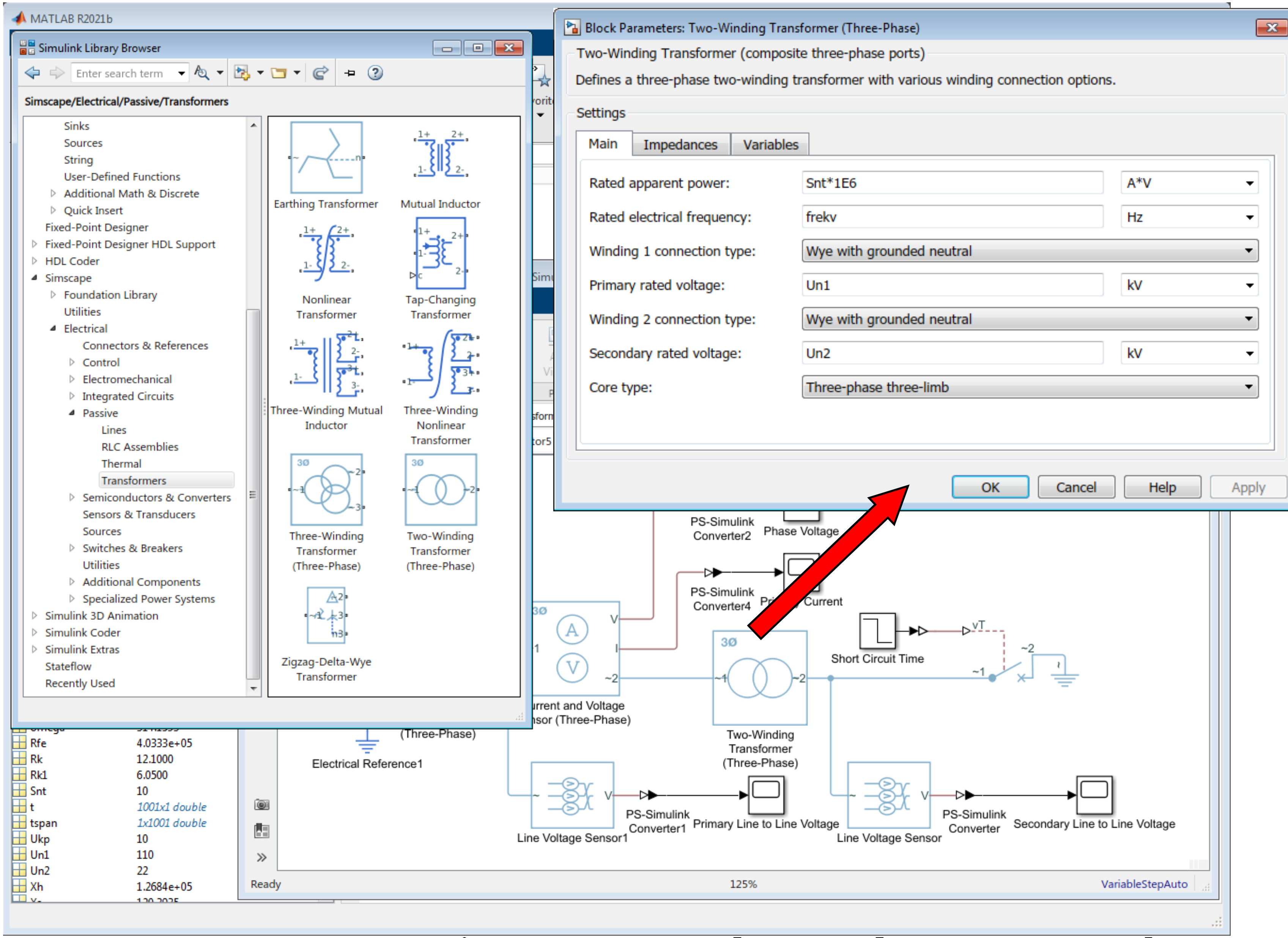
Transformátor nakrátko

Řešení numerickou metodou 3f varianty topologie:



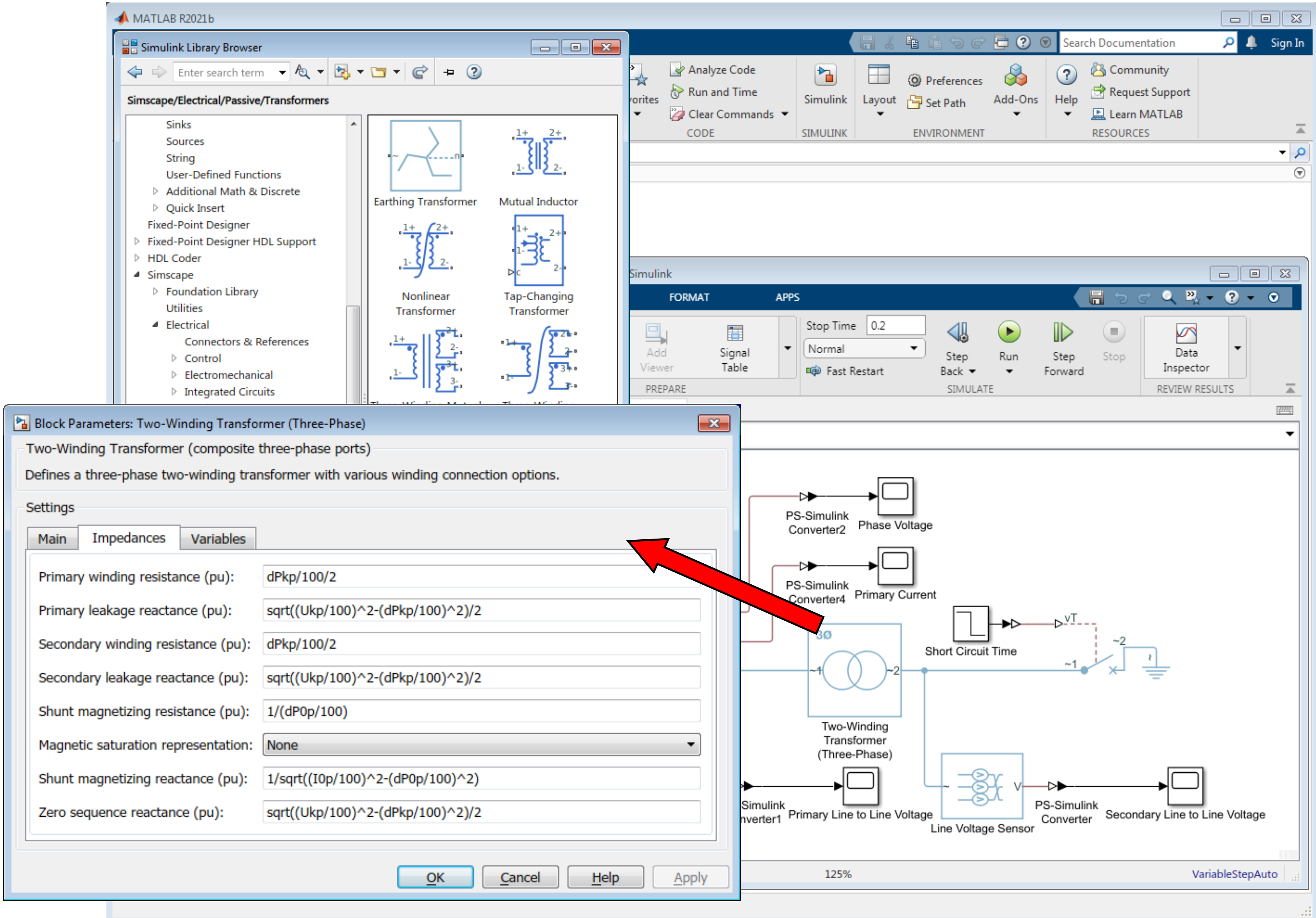
Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b

Transformátor nakrátko



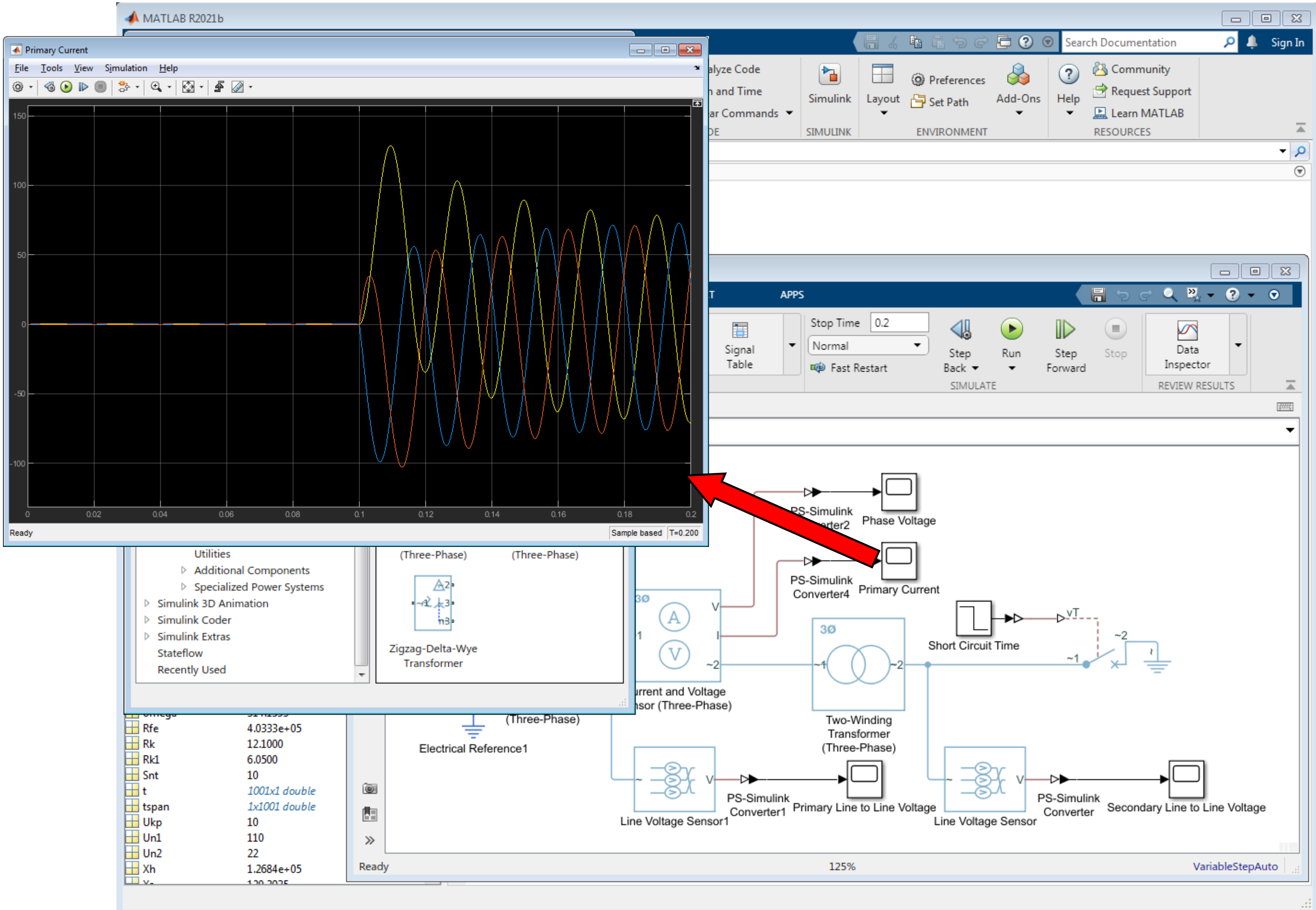
Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b

Transformátor nakrátko



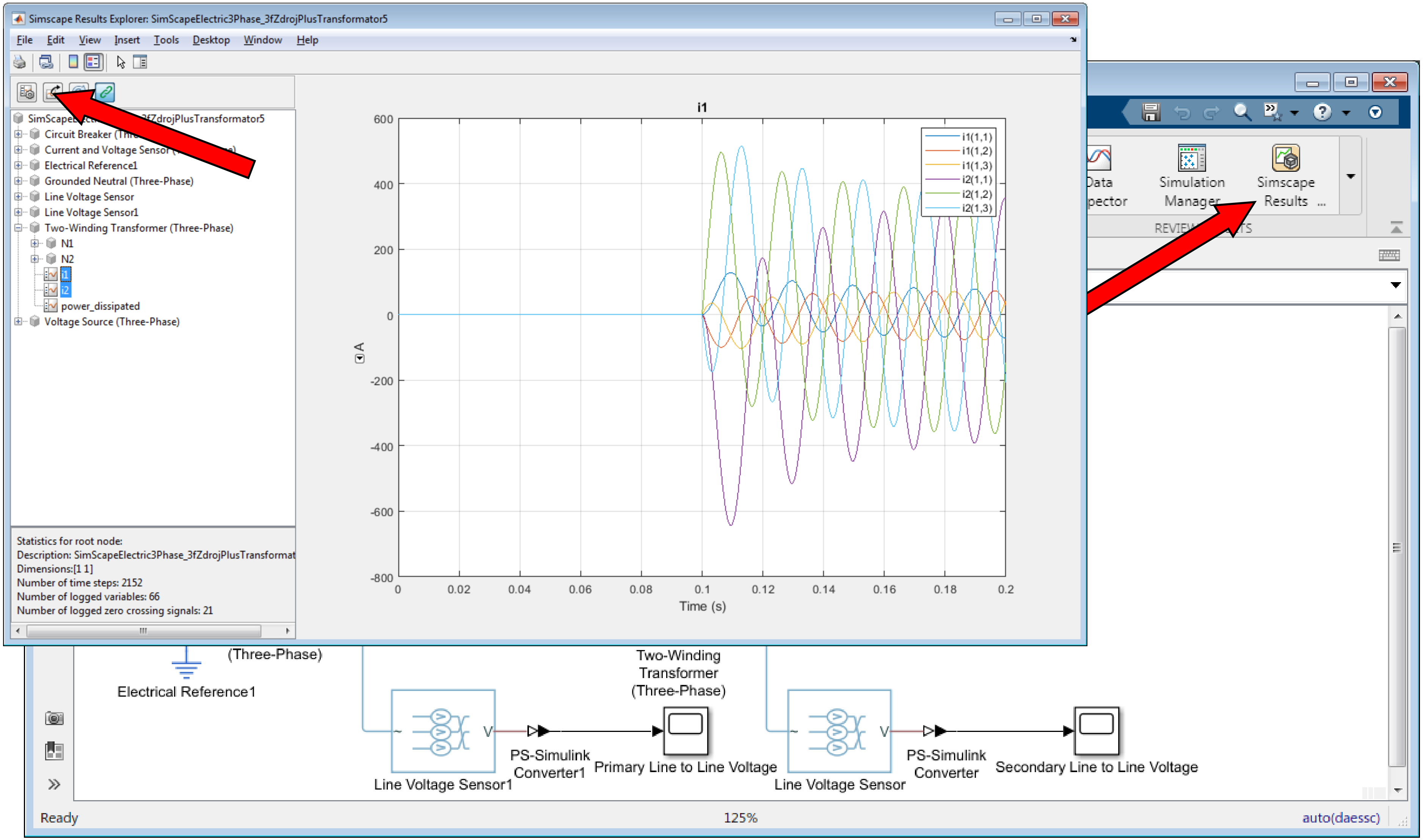
Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b

Transformátor nakrátko



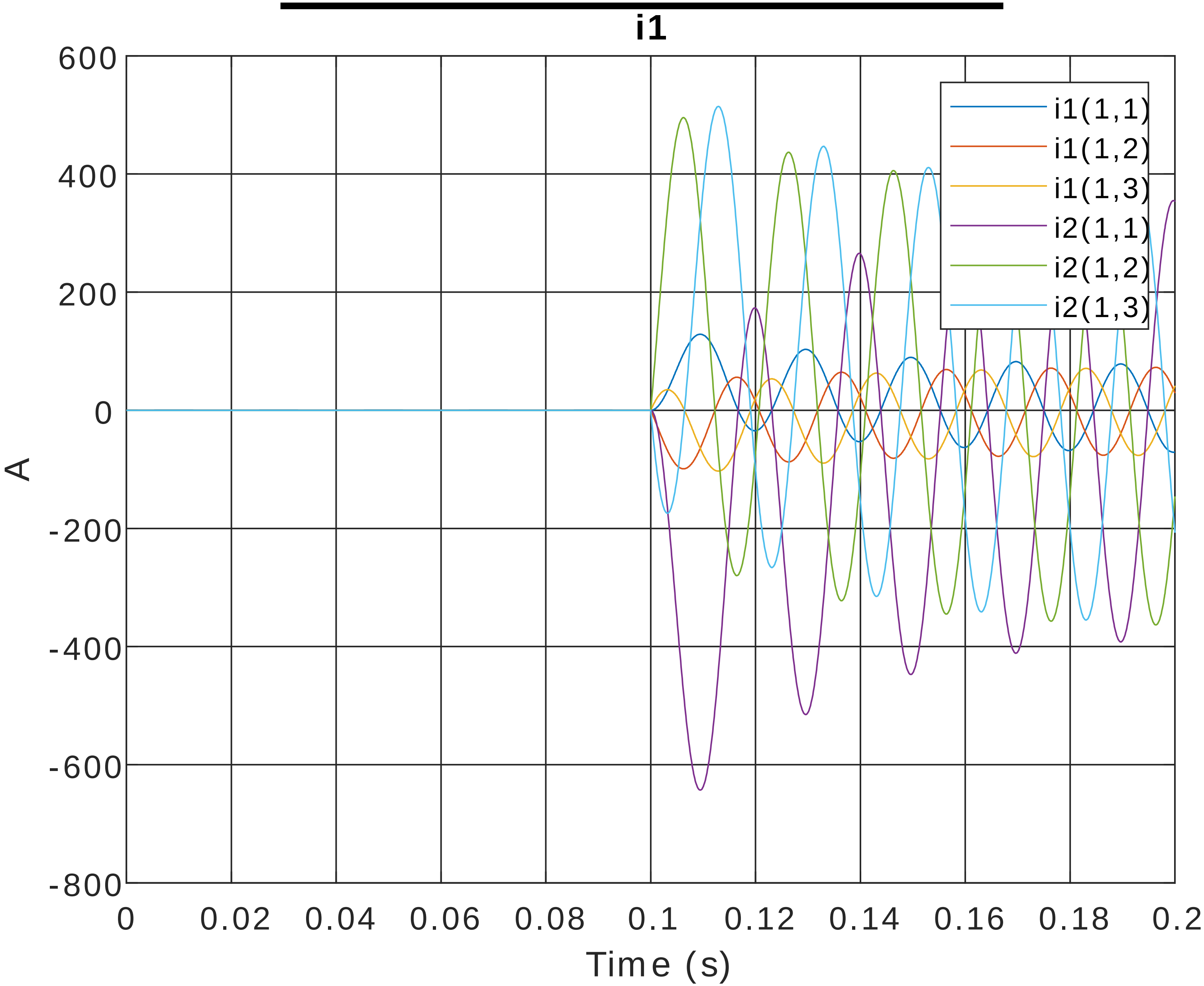
Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b

Transformátor nakrátko



Zpracování pomocí nástroje Simscape Electrical verse R2021b