



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

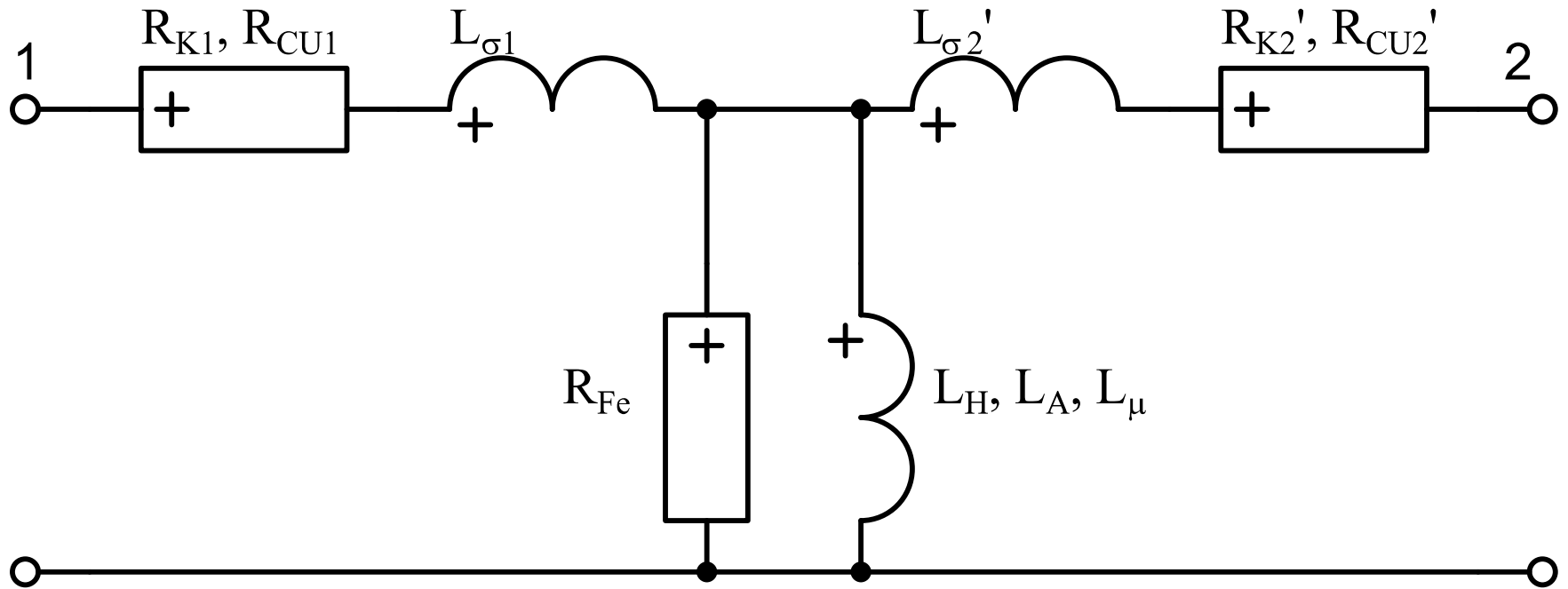


Řešení přechodných dějů na transformátoru

Cvičení PJS

Karel Noháč
ZČU, FEL, KEE

Náhradní schéma transformátoru



Parametry transformátoru

Transformatory Skoda									
Typ	Sn [MVA]	Prevod [kV]	Po [kW]	Po [%]	Pk [kW]	Pk [%]	Po/Pk	Uk [%]	Io [%]
1f zvyšovací	220	242/3/15	31	0,014	225	0,10	0,138	13,5	0,15
Radový, rozvodný	40	110/23	23	0,058	123	0,31	0,187	11,0	0,20
Se sníženým hlukem	25	110/23	14	0,056	90	0,36	0,156	11,5	0,15
Nízkonapětový	16	35/6.3	11	0,069	80	0,50	0,138	9,0	0,45

Transformatory ze skript ELS									
	1200		240	0,020	750	0,06	0,320	14,0	1,30
	250		110	0,044	650	0,26	0,169	12,5	1,60
	40		72	0,180	270	0,68	0,267	9,0	1,80
	25		51	0,204	195	0,78	0,262	9,0	2,00
	16		37	0,231	141	0,88	0,262	8,5	2,20

Transformátor s průměrnými parametry									
Skoda				0,049		0,317	0,154	11,250	0,238
ELS				0,136		0,532	0,256	10,600	1,780
Všechny				0,097		0,437	0,211	10,889	1,094

Parametry transformátoru

$$u_K = 10 \%$$

$$i_0 = 0.2 \%$$

$$U_N = 110 \text{ kV}$$

$$S_N = 20 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_0 = 0.05 \%$$

$$\Delta P_K = 0.3 \%$$

$$R_k = (dP_k/100) * (U_n^2/S_n)$$

$$Z_k = (U_k/100) * (U_n^2/S_n)$$

$$X_s = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$$L_s = X_s / \omega$$

$$G_{fe} = (dP_0/100) * (S_n/U_n^2)$$

$$R_{fe} = 1/G_{fe}$$

$$Y_g = (I_0/100) * (S_n/U_n^2)$$

$$X_h = 1/\sqrt{Y_g^2 - G_{fe}^2}$$

$$L_h = X_h / \omega$$

Parametry transformátoru

$$u_K = 10 \%$$

$$i_0 = 0.2 \%$$

$$U_N = 110 \text{ kV}$$

$$S_N = 20 \text{ MVA}$$

$$\Delta P_0 = 0.05 \%$$

$$\Delta P_K = 0.3 \%$$

$$R_k = 1.8150$$

$$Z_k = 60.500$$

$$X_s = 60.473$$

$$L_s = 0.19249$$

$$R_k/2 = 0.90750$$

$$L_s/2 = 0.096245$$

$$G_{fe} = 8.2645e-07$$

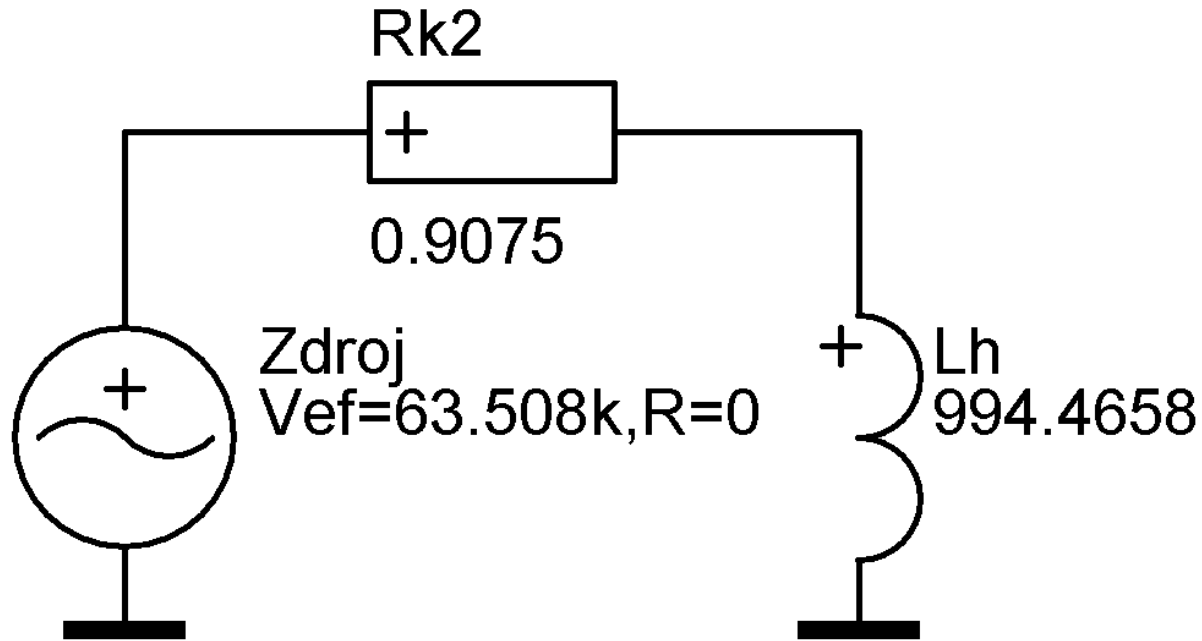
$$R_{fe} = 1210000$$

$$Y_g = 3.3058e-06$$

$$X_h = 3.1242e+05$$

$$L_h = 994.47$$

Transformátor naprázdno



$$L_h \frac{di_0}{dt} + i_0 \frac{R_K}{2} = U_m \sin(\omega \cdot t)$$

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

Transformátor naprázdno

$$L_h \frac{di_0}{dt} + i_0 \frac{R_K}{2} = U_m \sin(\omega \cdot t)$$

$$i_0(t) = i_{0V}(t) + i_{0P}(t) \qquad i_{0V} = C \cdot e^{\lambda \cdot t} = C \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}}$$

$$L_h \cdot \lambda \cdot C \cdot e^{\lambda \cdot t} + C \cdot e^{\lambda \cdot t} \frac{R_K}{2} = 0$$

$$\lambda = -\frac{(R_K/2)}{L_h}$$

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot L_h}{R_K}$$

$$\bar{I}_{0P} = \frac{\bar{U}_{Nf}}{Z_0}$$

$$Z_0 = |\bar{Z}_0| = \sqrt{(\omega \cdot L_h)^2 + \left(\frac{R_K}{2}\right)^2}$$

$$\psi_0 = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_h}{R_K/2}\right)$$

Transformátor naprázdno

$$I_{0m} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}{Z_0} = \frac{U_m}{Z_0}$$

$$i_{0P} = I_{0m} \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi_0)$$

$$i_0(0) = 0$$



$$C = -I_{0m} \sin(-\psi_0) = I_{0m} \sin(\psi_0)$$

$$i_0(t) = I_{0m} \left(\sin(\psi_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} + \sin(\omega \cdot t - \psi_0) \right)$$

$$Z_0 = \sqrt{(R_k/2)^2 + X_h^2}$$

$$I_{0m} = U_m / Z_0$$

$$\tau_0 = L_h / (R_k/2)$$

$$\psi_0 = \arctan(X_h / (R_k/2))$$

$$t = [0 : 0.001 : 0.1]';$$

$$I_{0t} = I_{0m} * (\sin(\psi_0) * \exp(-t/\tau_0) + \sin(\Omega * t - \psi_0));$$

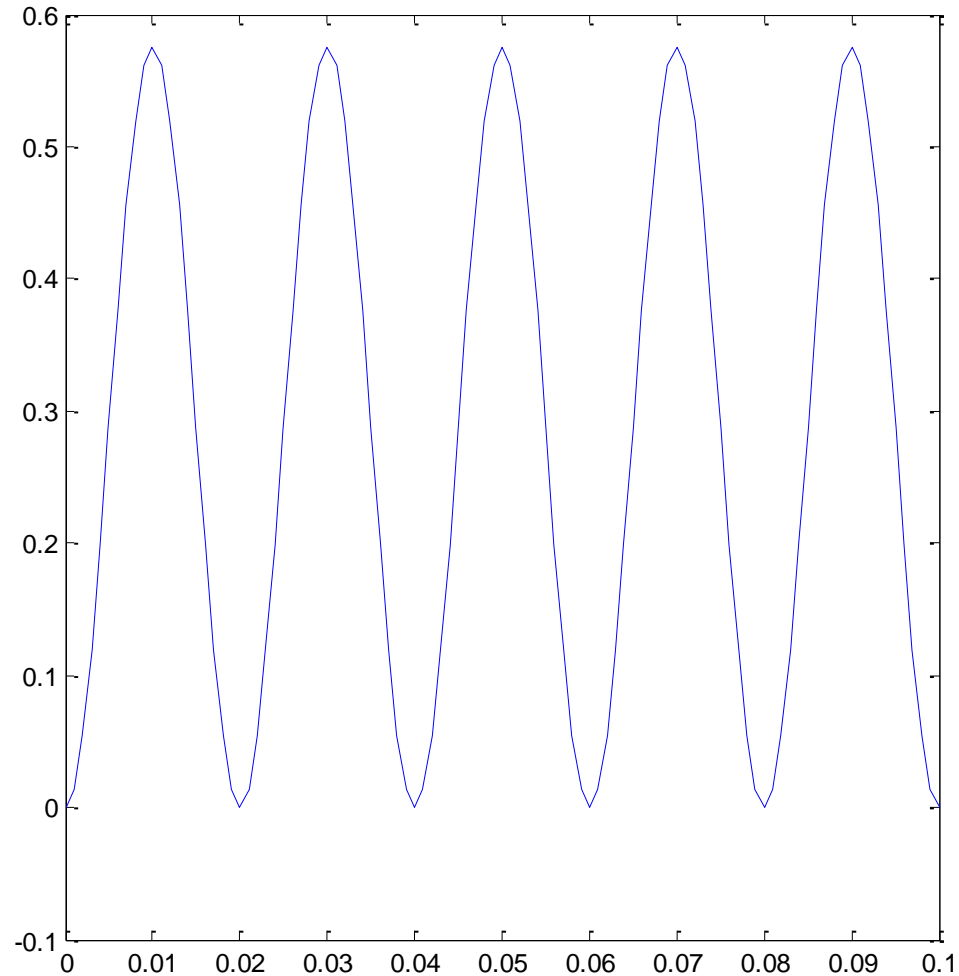
$$\text{plot}(t, I_{0t});$$

Transformátor naprázdno

```
t=[0:0.001:0.1]';
```

```
I0t=I0m*(sin(Psi0)*exp(-t/Tau0)+sin(Omega*t-Psi0));
```

```
plot(t,I0t);
```



Transformátor naprázdno

Proud naprázdno, resp. dvojnásobek jeho amplitudy ve výstupu musí být:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_0 &= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i_0 \cdot I_N = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i_0 \cdot \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \\ &= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{0.2}{100} \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.002 \cdot 104.97 = 0.59382 \text{ A} \end{aligned}$$

Transformátor naprázdno

Maximální okamžitá hodnota jmenovitého napětí musí být:

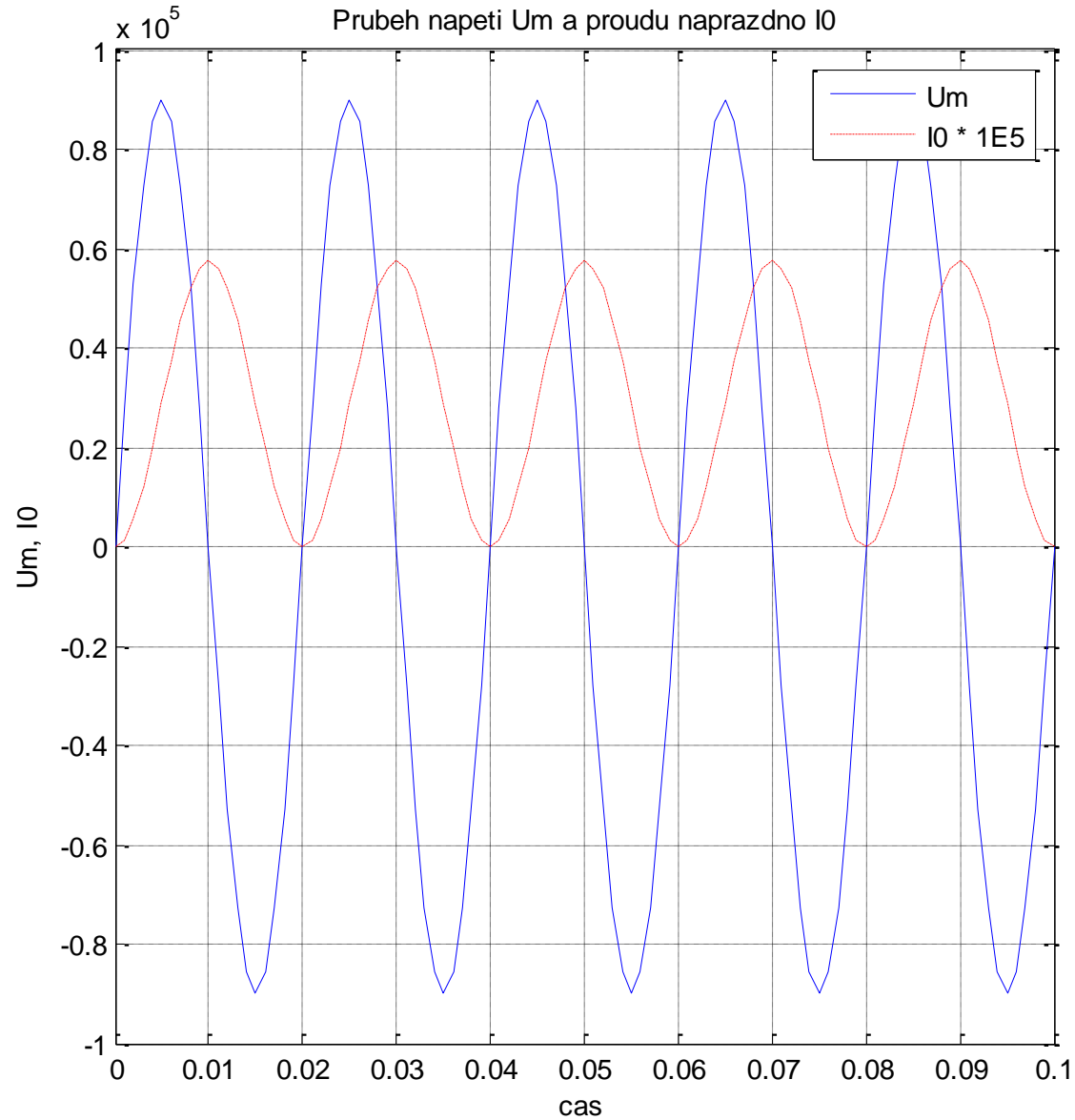
$$U_m = \sqrt{2} \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 89.8 \text{ kV}$$

Transformátor naprázdno

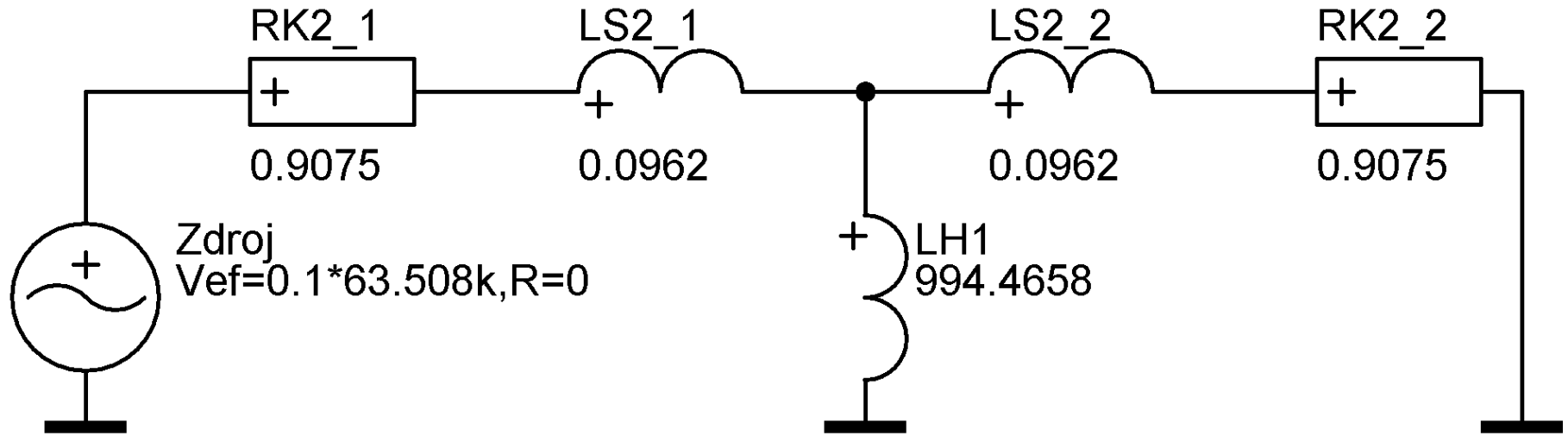
```
yp=Um*sin(omega*t);  
yp=[yp,I0t*1e5];  
plot(t,yp(:,1),'-b',t,yp(:,2),'-.r');  
xlabel('cas');  
ylabel('Um, I0');  
title('Prubeh napeti Um a proudu naprazdno I0');  
h = legend('Um','I0 * 1E5');  
grid on;
```

Poznámka: Zde pro přehlednost uveden stotisícinásobek proudu naprázdno, aby jeho fáze vzhledem k napájecímu napětí byla zřejmá.

Transformátor naprázdno



Transformátor nakrátko



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

Transformátor nakrátko

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

$$i_K(t) = i_{KV}(t) + i_{KP}(t)$$

$$i_{KV} = C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} = C_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_K}}$$

$$L_{\sigma} \cdot \lambda_2 \cdot C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} R_K = 0$$

$$\lambda_2 = -\frac{R_K}{L_{\sigma}} \quad \tau_K = \frac{L_{\sigma}}{R_K}$$

$$\bar{I}_{NP} = \frac{\bar{U}_{Kf}}{Z_K}$$

$$Z_K = |\bar{Z}_K| = \sqrt{(\omega \cdot L_{\sigma})^2 + R_K^2}$$

$$\psi_K = \arctg \left(\frac{\omega \cdot L_{\sigma}}{R_K} \right)$$

Transformátor nakrátko

$$I_{K_m} = \frac{U_{K_m}}{Z_K} = \frac{\frac{u_K [\%]}{100} U_m}{Z_K} \quad i_{KP} = I_{K_m} \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi_K)$$

$$i_K(t) = C_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_K}} + I_{K_m} \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi_K)$$

$$i_K(0) = 0 \quad \longrightarrow \quad C_2 = -I_{K_m} \sin(-\psi_K) = I_{K_m} \sin(\psi_K)$$

$$i_K(t) = I_{K_m} \left(\sin(\psi_K) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_K}} + \sin(\omega \cdot t - \psi_K) \right)$$

Transformátor nakrátko

$$I_{km} = (U_k / 100) * U_m / Z_k$$

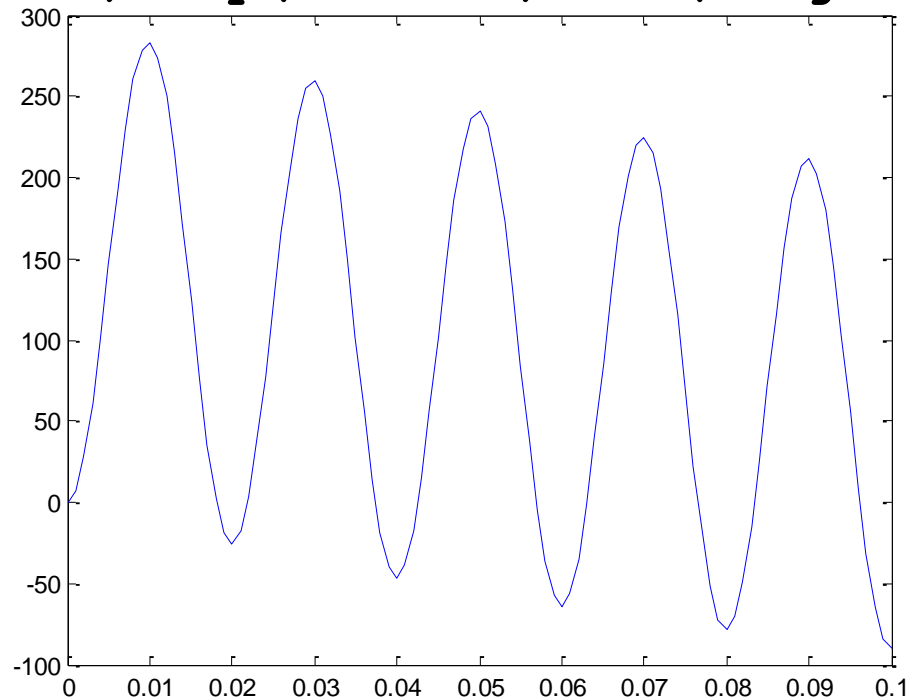
$$\tau_k = L_s / R_k$$

$$\psi_k = \arctan(X_s / R_k)$$

$$t = [0 : 0.001 : 0.1]';$$

$$i_k(t) = I_{km} * (\sin(\psi_k) * \exp(-t / \tau_k) + \sin(\omega * t - \psi_k));$$

plot(t, i_k);



Transformátor nakrátko

Proud nakrátko (vlastně jmenovitý proud), resp. dvojnásobek jeho amplitudy ve výstupu musí být:

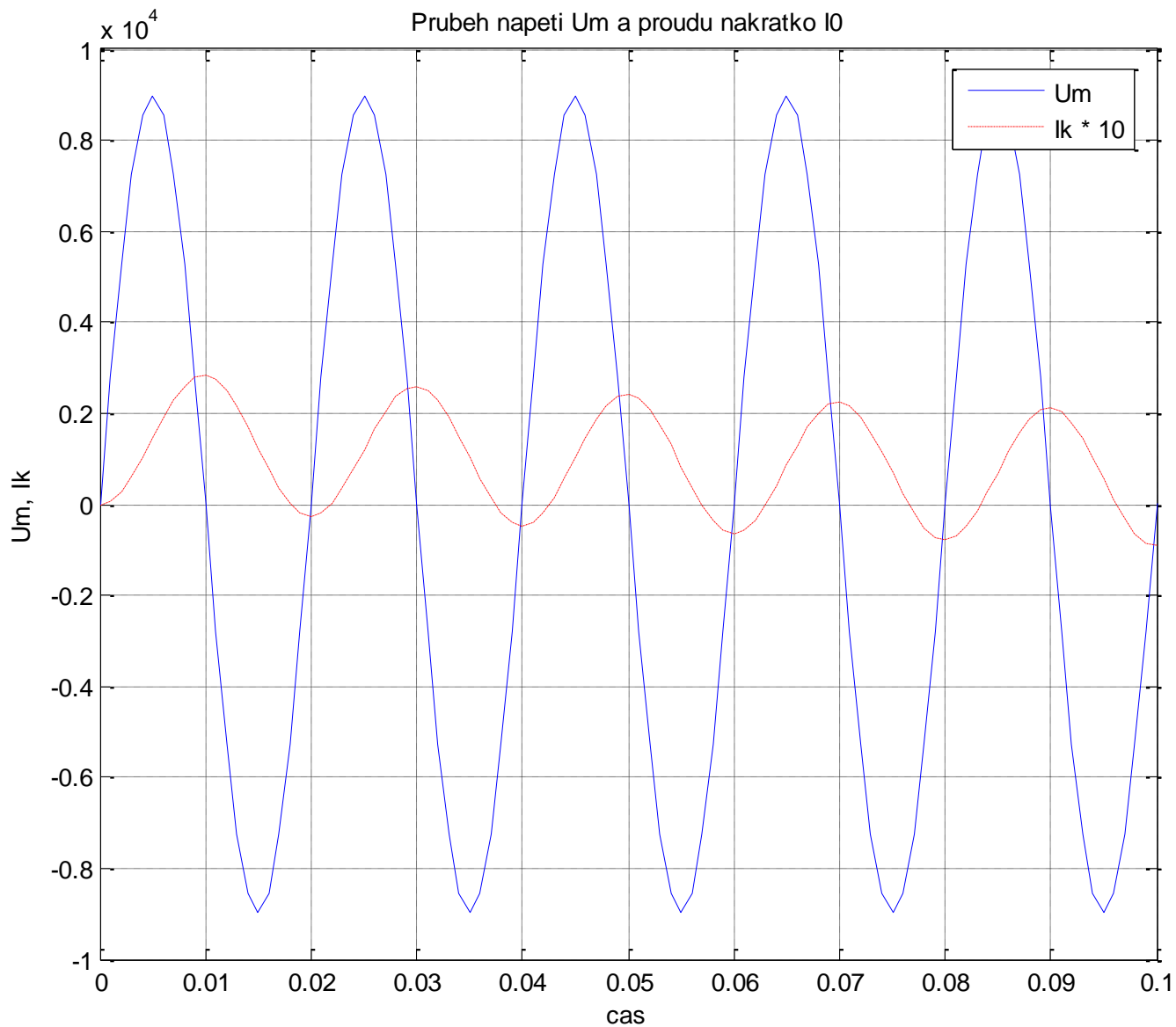
$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_N = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 104.97 = 296.91 \text{ A}$$

Transformátor nakrátko

```
yp=(Uk/100)*Um*sin(omega*t);  
yp=[yp,Ikt*10];  
plot(t,yp(:,1),'-b',t,yp(:,2),'-.r');  
xlabel('cas');  
ylabel('Um, Ik');  
title('Prubeh napeti Um a proudu nakratko I0');  
h = legend('Um','Ik * 10');  
grid on;
```

Poznámka: Zde pro přehlednost uveden desetinásobek proudu nakrátko, aby jeho fáze vzhledem k napětí nakrátko byla zřejmá.

Transformátor nakrátko



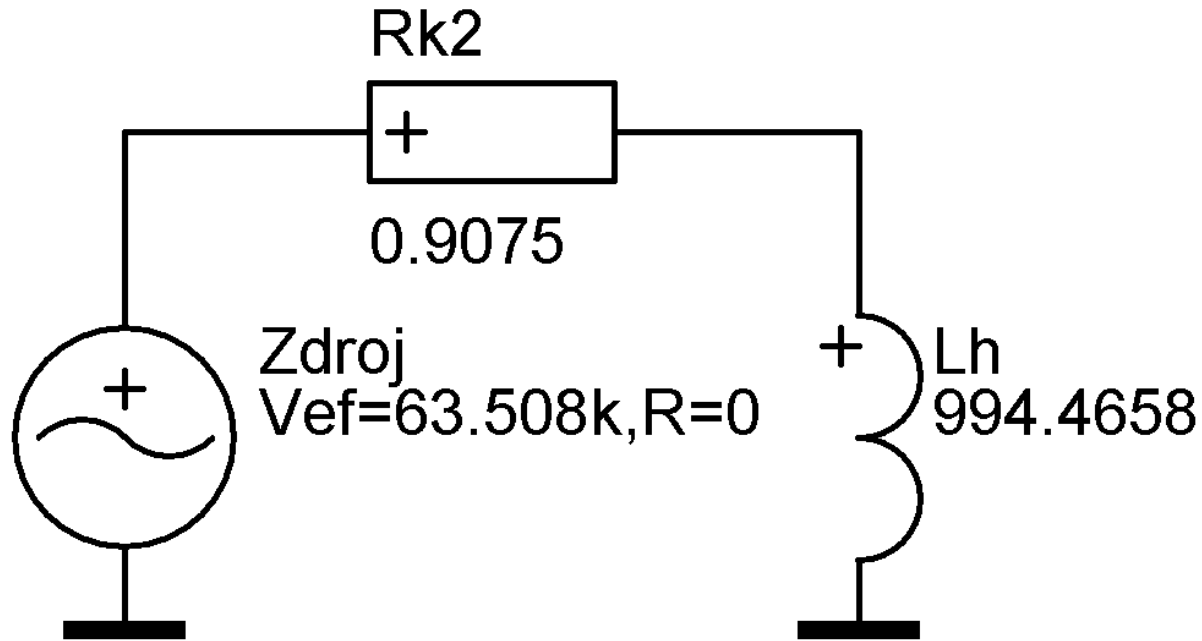
Transformátor nakrátko

Maximální okamžitá hodnota napětí nakrátko musí být:

$$\frac{U_k [\%]}{100} \cdot U_m = \sqrt{2} \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 8.98 \text{ kV}$$

Transformátor naprázdno

Řešení numerickou metodou:



$$L_h \frac{di_0}{dt} + i_0 \frac{R_K}{2} = U_m \sin(\omega \cdot t) \longrightarrow \frac{di_0}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t) - i_0 \cdot \frac{R_K}{2}}{L_h}$$

Transformátor naprázdno

```
function ydot=f1(t,y)
Un=110;
Um=Un/sqrt(3)*sqrt(2);
Omega=2*pi*50;
Rk=1.815;
Lh=994.5;
ydot=(Um*sin(Omega*t)-y(1)*Rk/2)/Lh;
end
```

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

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t) - i_0 \cdot \frac{R_K}{2}}{L_h}$$

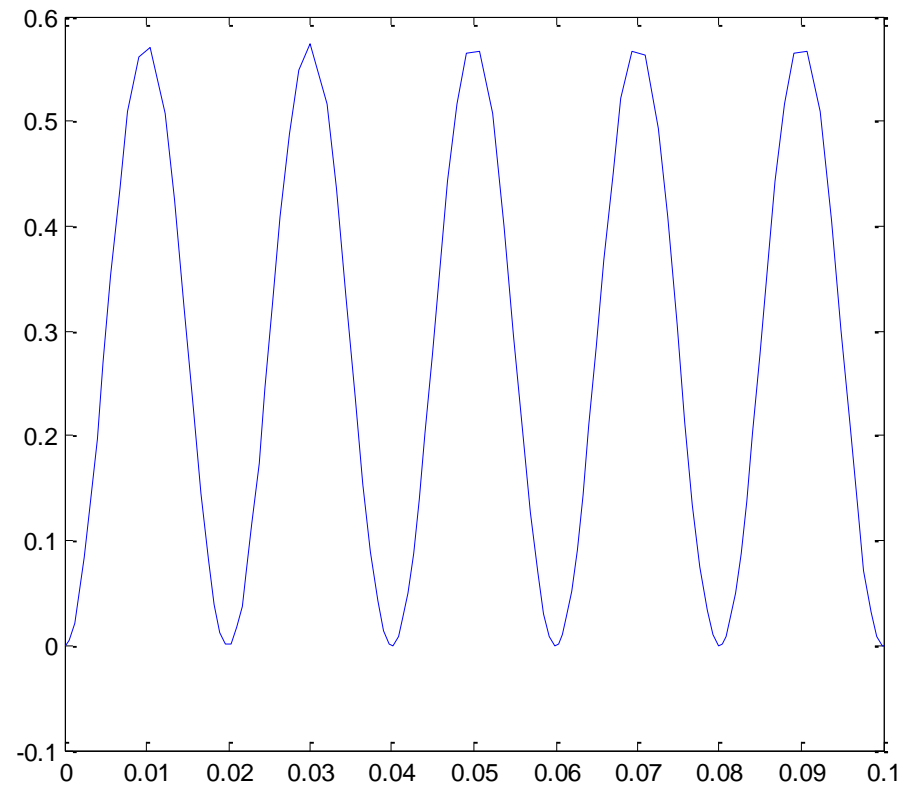
Transformátor naprázdno

```
tspan = [0, 0.1];
```

```
y0 = 0;
```

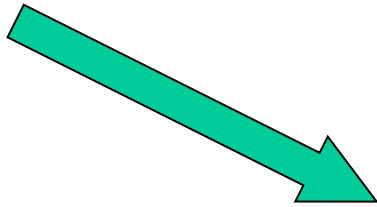
```
[t,y] = ode23(@f1, tspan, y0,[]);
```

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



Transformátor naprázdno - alternativně

```
function ydot=f1(t,y)
Um=8.9815e+04;
Omega=314.16;
Rk=1.815;
Lh=994.5;
ydot=(Um*sin(Omega*t)-y(1)*Rk/2)/Lh;
end
```



```
function i0dot=f1(t,i0,Un,Rk,Lh)
Um=Un/sqrt(3)*sqrt(2);
Omega=2*50*pi;
i0dot=(Um*sin(Omega*t)-i0(1)*Rk/2)/Lh;
end
```

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t) - i_0 \cdot \frac{R_K}{2}}{L_h}$$

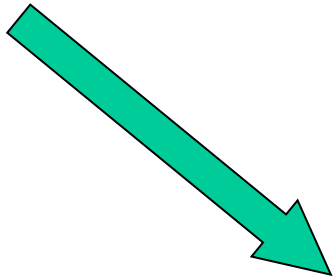
Transformátor naprázdno - alternativně

```
tspan = [0, 0.1];
```

```
y0 = 0;
```

```
[t,y] = ode23(@f1, tspan, y0,[]);
```

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



```
RozsahCasu = [0, 0.1];
```

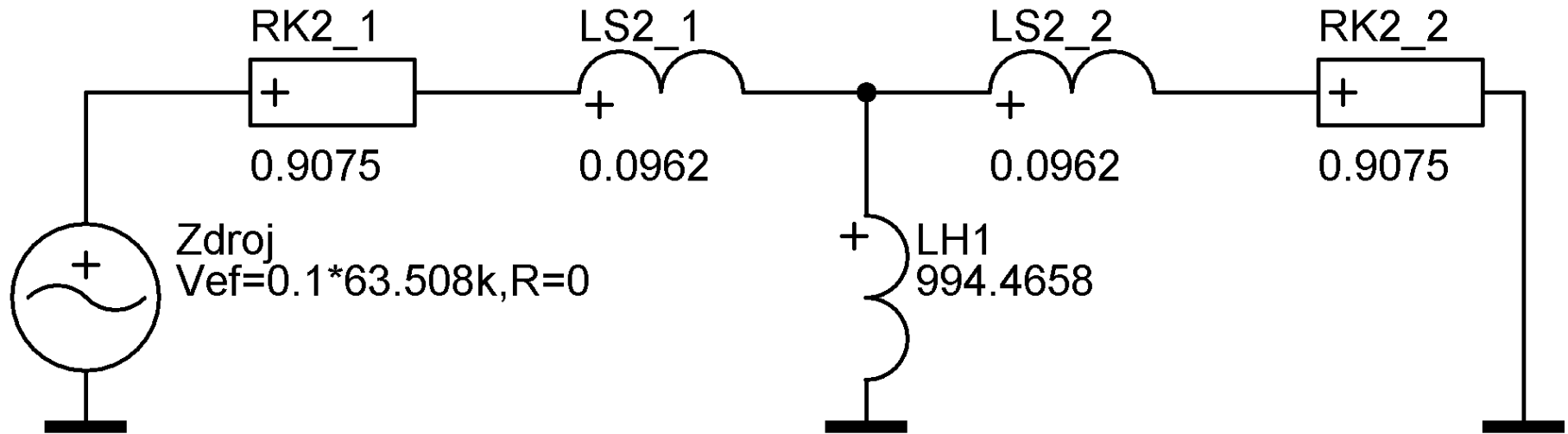
```
i00 = 0;
```

```
[t,i0] = ode23(@ (t,i0) f1(t,i0,Un,Rk,Lh), RozsahCasu, i00,[]);
```

```
plot(t,i0);
```

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

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

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

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

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

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

Transformátor nakrátko

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

function ydot = f2(t,y)

Uk=10;

Um=8.9815e+04*Uk/100;

Omega=314.16;

Rk=1.815;

Lh=994.5;

Ls=0.1925;

pom1=Ls/2+Lh;

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

ydot=zeros(2,1);

ydot(1)=(Um*sin(Omega*t)-y(1)*Rk/2-Lh*y(2)*Rk/2/pom1)/pom2;

ydot(2)=(Lh*Um*sin(Omega*t)/pom1-Lh*y(1)*Rk/2/pom1-y(2)*Rk/2)/pom2;

end

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

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

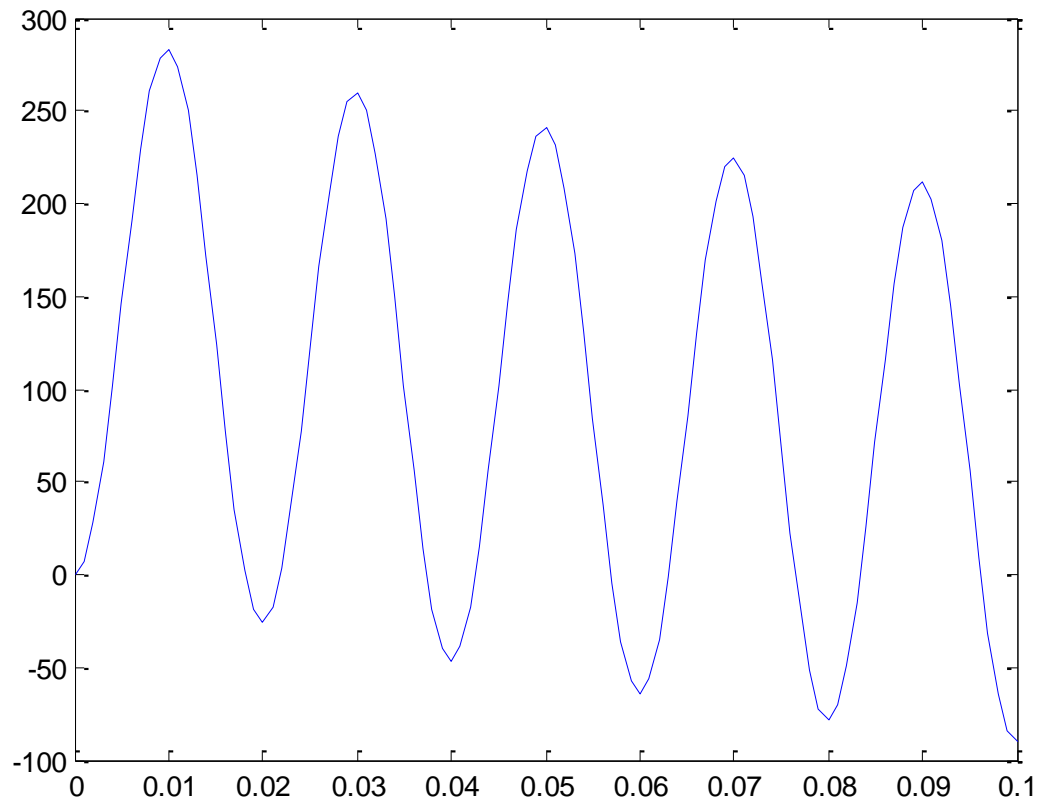
Transformátor nakrátko

```
tspan = [0, 0.1];
```

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

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

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



Transformátor nakrátko

```
yp=Um*sin(omega*t)*Uk/100;
```

```
yp=[yp,y];
```

```
plot(t,yp(:,1),'-',t,yp(:,2)*10,'-.',t,yp(:,3)*10,'.');
```

```
xlabel('cas');
```

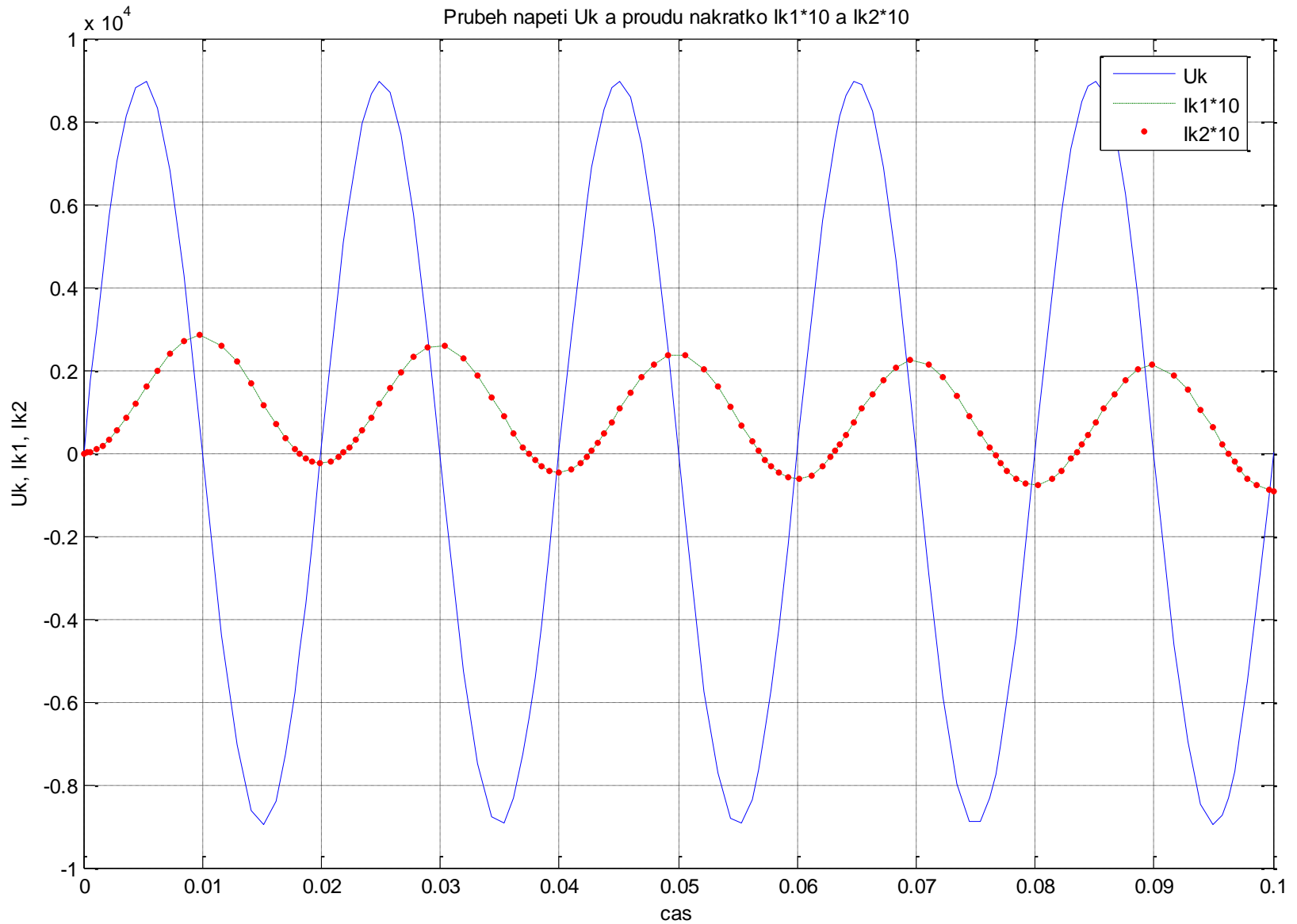
```
ylabel('Uk, Ik1, Ik2');
```

```
title('Prubeh napeti Uk a proudu nakratko Ik1*10 a  
Ik2*10');
```

```
h = legend('Uk','Ik1*10','Ik2*10');
```

```
grid on;
```

Transformátor nakrátko



Transformátor nakrátko - alternativně

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

```
Uk=10;
```

```
Um=8.9815e+04*Uk/100;
```

```
Omega=314.16;
```

```
Rk=1.815;
```

```
Lh=994.5;
```

```
Ls=0.1925;
```

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

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

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

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

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

```
end
```

```
function ikdot = f3(t,ik,Un,Rk,Lh,Uk,Ls)
```

```
Um=Un/sqrt(3)*sqrt(2)*Uk/100;
```

```
Omega=2*50*pi;
```

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

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

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

```
ikdot(1)=(Um*sin(Omega*t)-ik(1)*Rk/2-Lh*ik(2)*Rk/2/pom1)/pom2;
```

```
ikdot(2)=(Lh*Um*sin(Omega*t)/pom1-Lh*ik(1)*Rk/2/pom1-ik(2)*Rk/2)/pom2;
```

```
end
```



Transformátor nakrátko - alternativně

```
tspan = [0, 0.1];
```

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

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

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

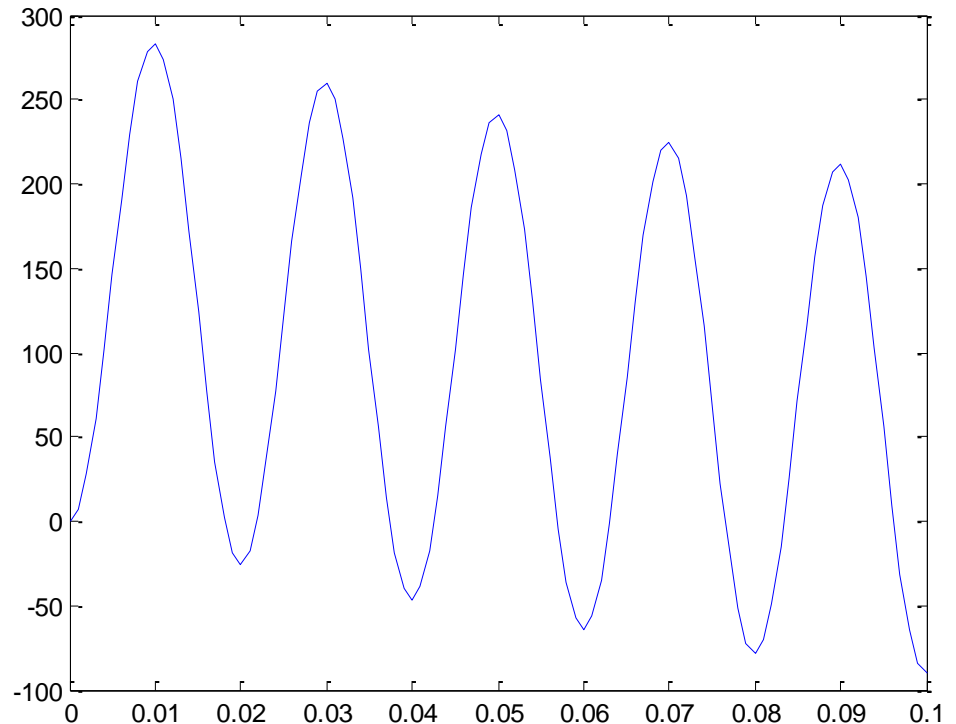


```
RozsahCasu = [0, 0.1];
```

```
ik0 = [0; 0];
```

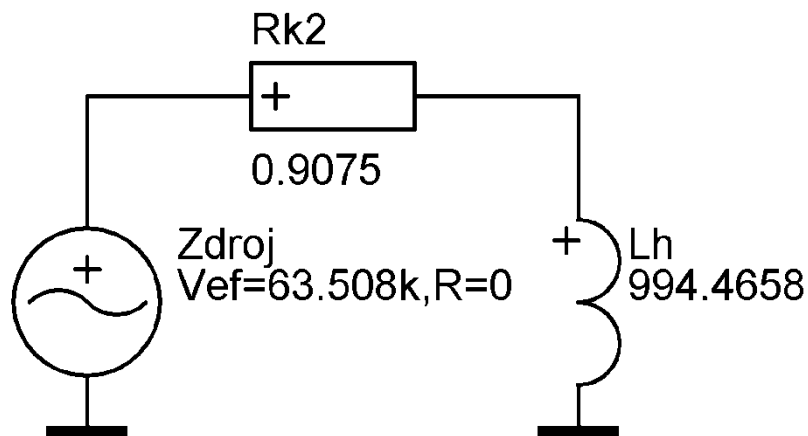
```
[t,ik] = ode23(@(t,ik) f3(t,ik,Un,Rk,Lh,Uk,Ls), RozsahCasu, ik0,[]);
```

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

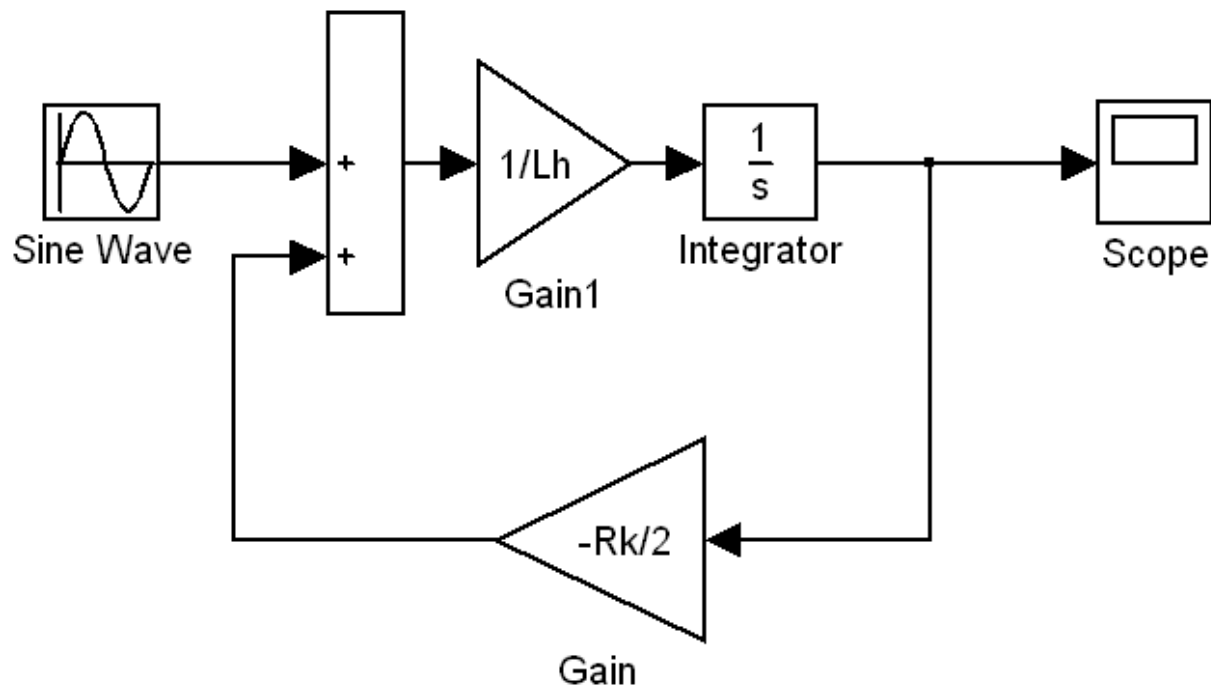


Transformátor naprázdno

Řešení simulačním programem MATLAB - SIMULINK:

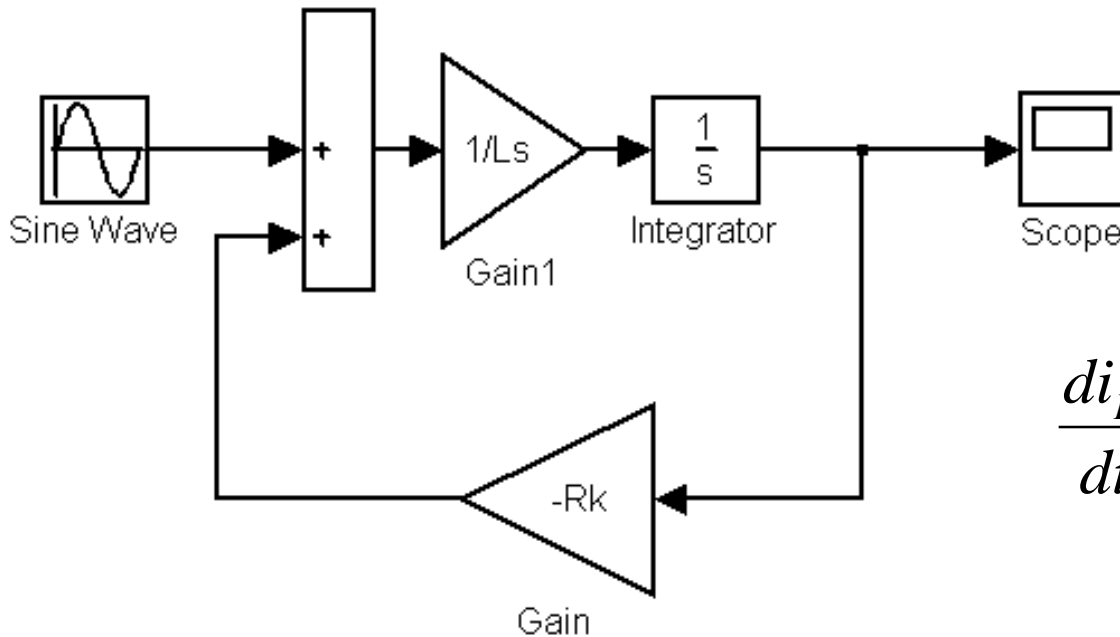
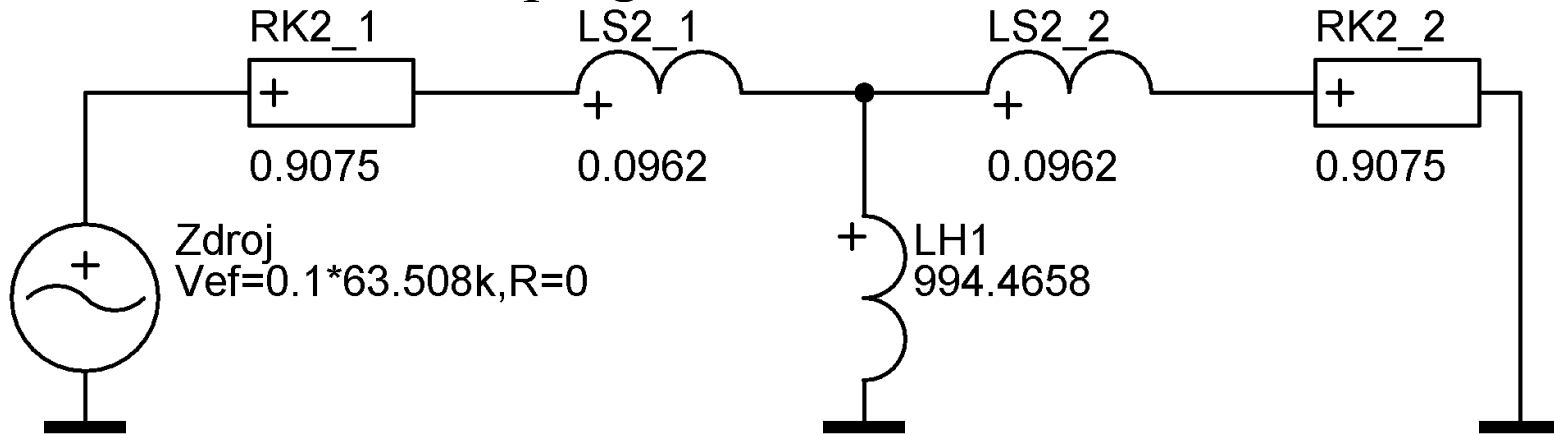


$$\frac{di_0}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega \cdot t) - i_0 \cdot \frac{R_K}{2}}{L_h}$$



Transformátor nakrátko

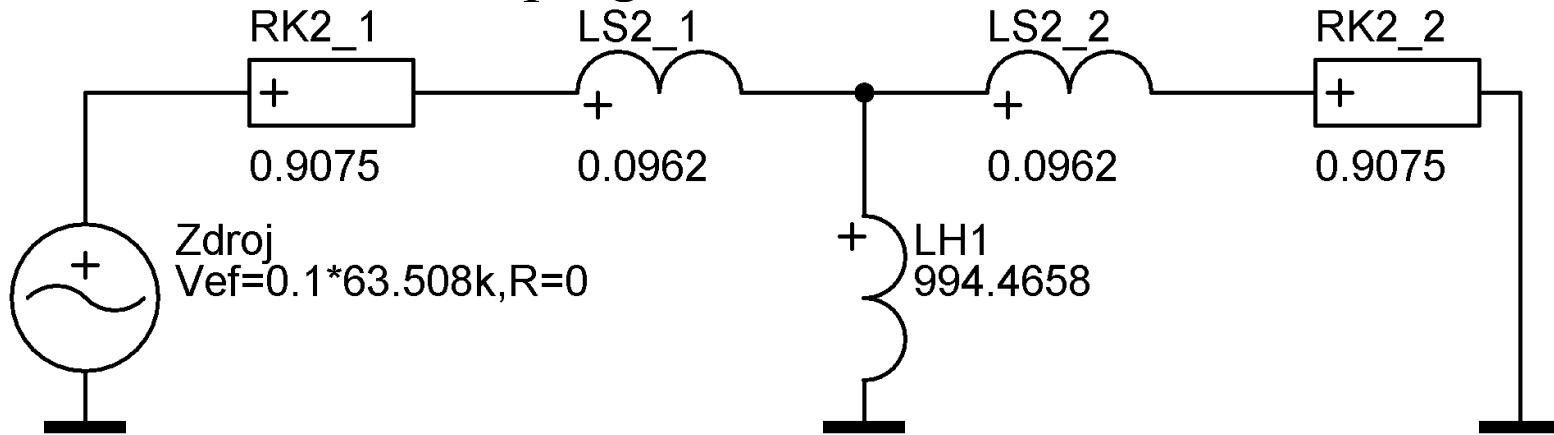
Řešení simulačním programem MATLAB - SIMULINK:



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

Transformátor nakrátko

Řešení simulačním programem MATLAB - SIMULINK:



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

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

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

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

Transformátor nakrátko

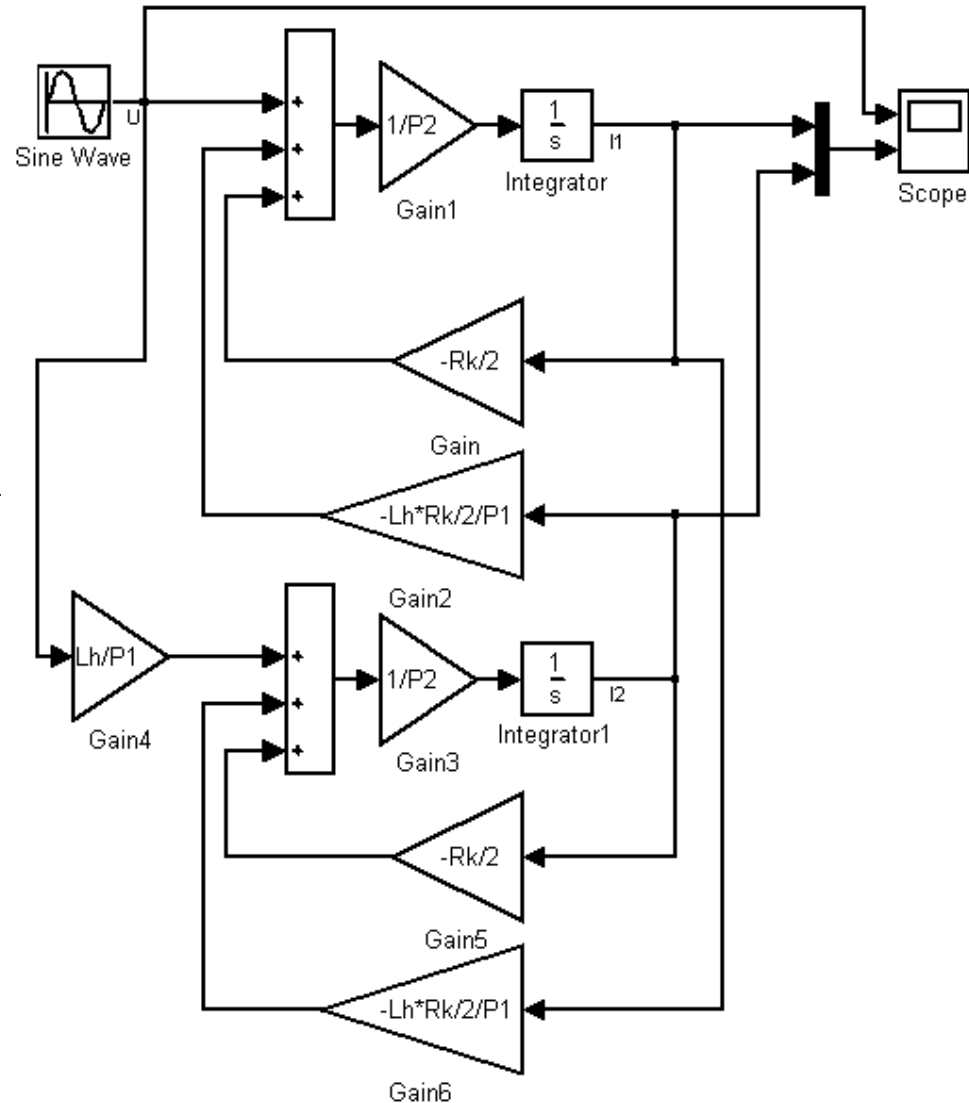
Řešení simulačním programem MATLAB - SIMULINK:

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

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

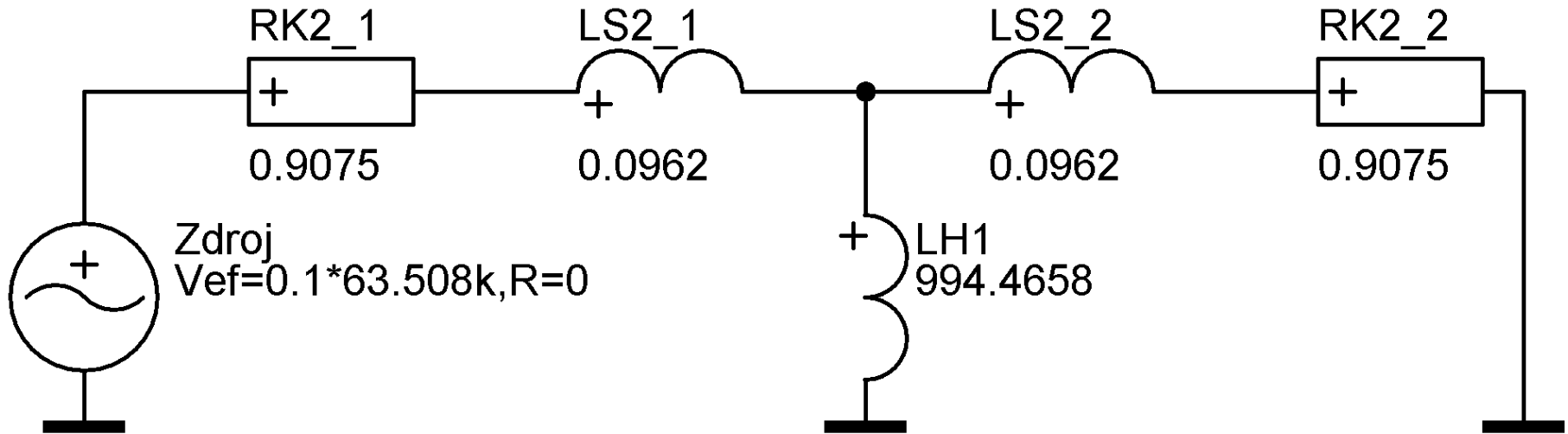
$$P_1 = \frac{L_\sigma}{2} + L_h$$

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



Transformátor nakrátko

Řešení simulačním programem DYNAST rovnicemi:



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

$$0 = L_s/2 \cdot VD \cdot I1 + I1 \cdot R_k/2 + L_h \cdot VD \cdot I1 - L_h \cdot VD \cdot I2 - U_t;$$

$$0 = -L_h \cdot VD \cdot I1 + L_h \cdot VD \cdot I2 + L_s/2 \cdot VD \cdot I2 + I2 \cdot R_k/2;$$

Transformátor nakrátko

Řešení simulačním programem DYNAST rovnicemi:

```
*SYSTEM;
SYSVAR I1, I2;

Un=110E3;
Um=Un/sqrt(3)*sqrt(2);
f=50;
Omega=2pi*f;

Sn=20E6;
Uk=10;
I0=0.2;
dPk=0.3;
dP0=0.05;
dPcu=dPk;
dPfe=dP0;

Rk=(dPk/100)*(Un**2/Sn);
Zk=(Uk/100)*(Un**2/Sn);
Xs=sqrt(Zk**2-Rk**2);
Ls=Xs/Omega;
Gfe=(dP0/100)*(Sn/Un**2);
Rfe=1/Gfe;
Yg=(I0/100)*(Sn/Un**2);
Xh=1/sqrt(Yg**2-Gfe**2);
Lh=Xh/Omega;

Ut=Uk/100*Um*sin(Omega*TIME);

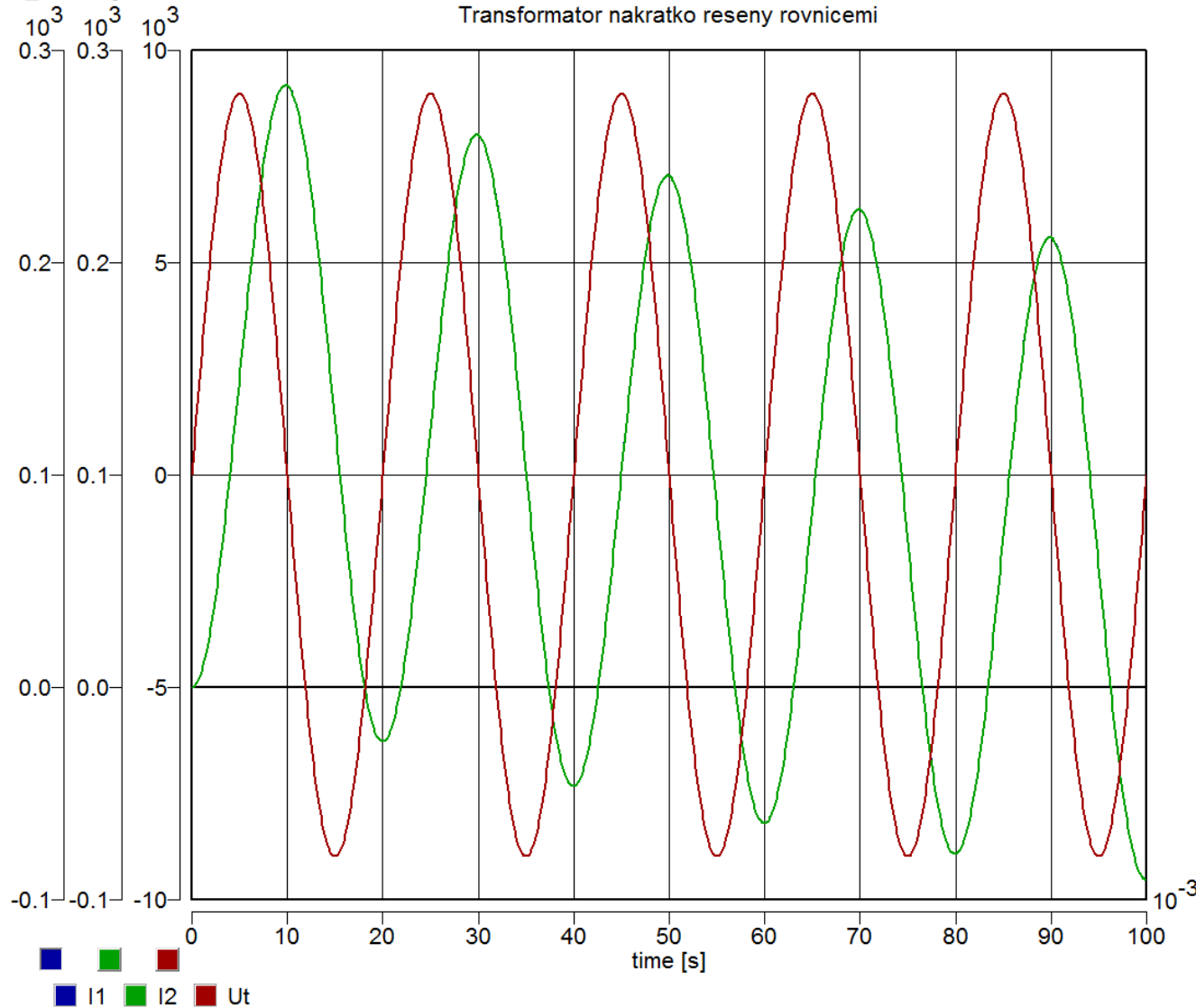
0=Ls/2*VD.I1+I1*Rk/2+Lh*VD.I1-Lh*VD.I2-Ut;
0=-Lh*VD.I1+Lh*VD.I2+Ls/2*VD.I2+I2*Rk/2;

deltaI=I1-I2;
```


Transformátor nakrátko

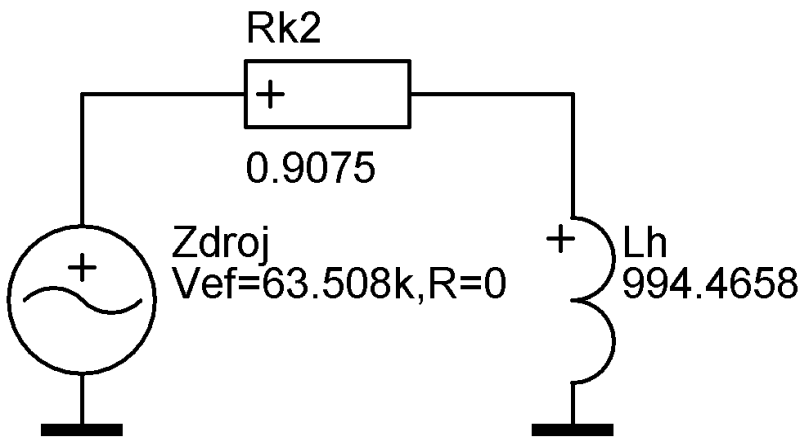
Řešení simulačním programem DYNAST rovnicemi:

```
*TR;  
TR 0 0.1;  
PRINT(1001) I1, I2,  
Ut, deltaI;  
INIT I1=0, I2=0;  
RUN;  
*END;
```



Transformátor naprázdno

Řešení simulačním programem DYNAST branovým schématem:

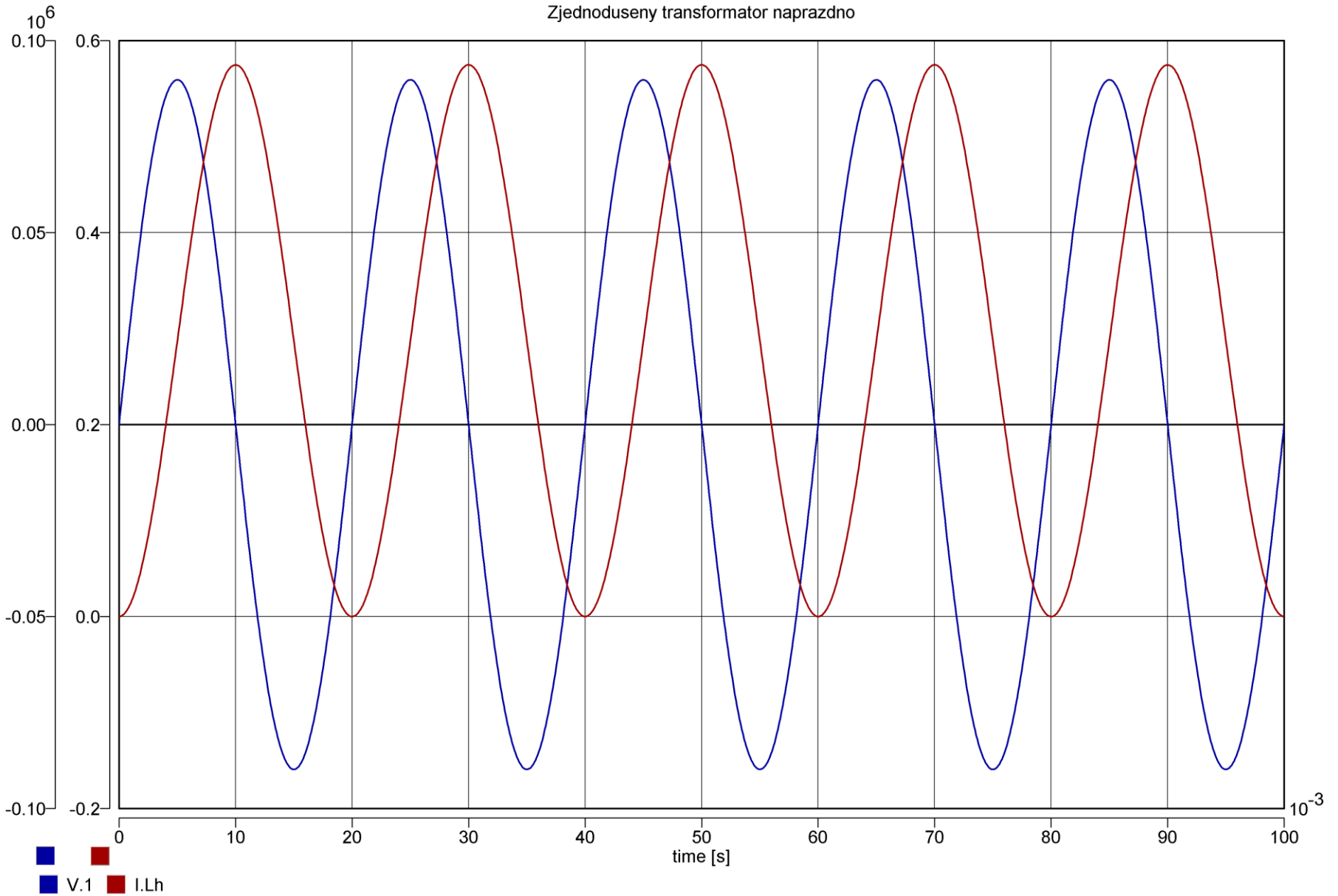


```
*: Zjednodusený transformator naprazdno
*SYSTEM;
Rk2 1-2 = 0.9075;
Lh 2 = 994.4658;
Zdroj > @mains 1,0 / Vef=63.508k,R=0;

*TR;
TR 0 0.1;
PRINT(1000) V.1, V.2, I.Lh;
RUN;
*END;
```

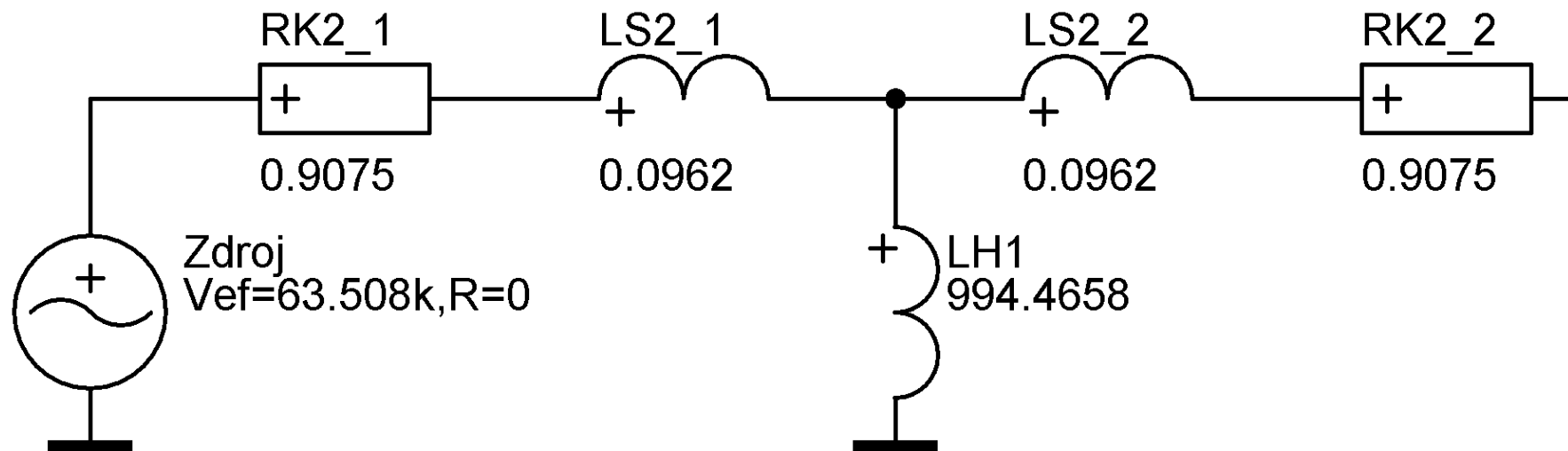
Transformátor naprázdno

Zjednodusený transformátor naprázdno



Transformátor naprázdno

Řešení simulačním programem DYNAST:



*: Transformator naprazdno

*SYSTEM;

RK2_1 1-2 = 0.9075;

LS2_1 2-3 = 0.0962;

LS2_2 3-4 = 0.0962;

RK2_2 4-5 = 0.9075;

LH1 3 = 994.4658;

Zdroj > @mains 1,0 / Vef=63.508k,R=0;

*TR;

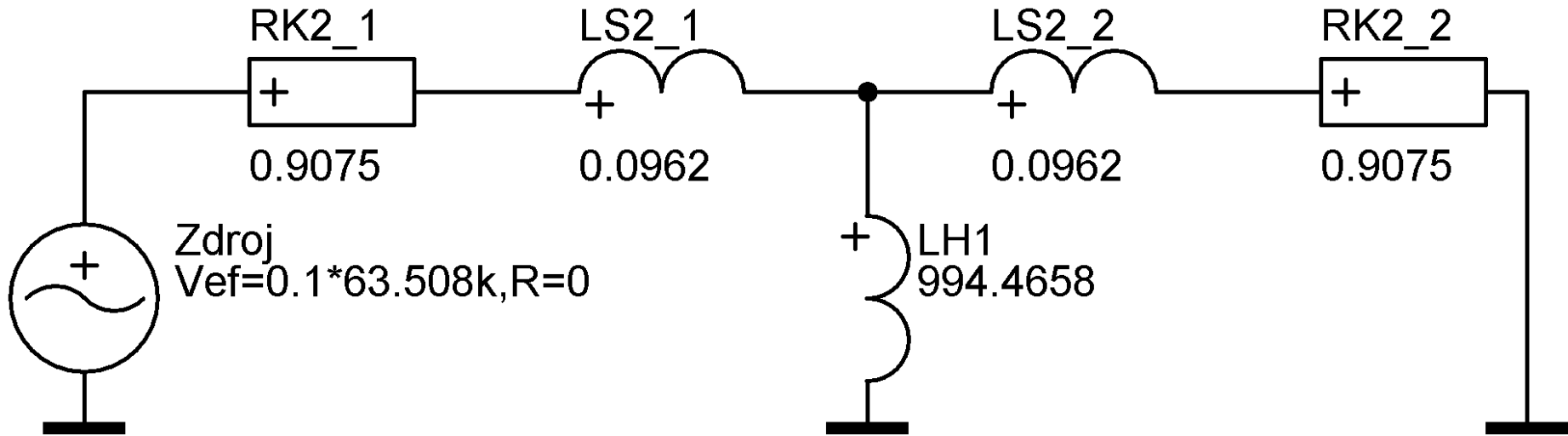
TR 0 0.1;

PRINT(1000) V.1, V.3, I.Rk2_1;

RUN;

*END;

Transformátor nakrátko



Rozdíly proti chodu naprázdno:

...

```
RK2_2 4 = 0.9075;
```

```
Zdroj > @mains 1,0 / Vef=0.1*63.508k,R=0;
```

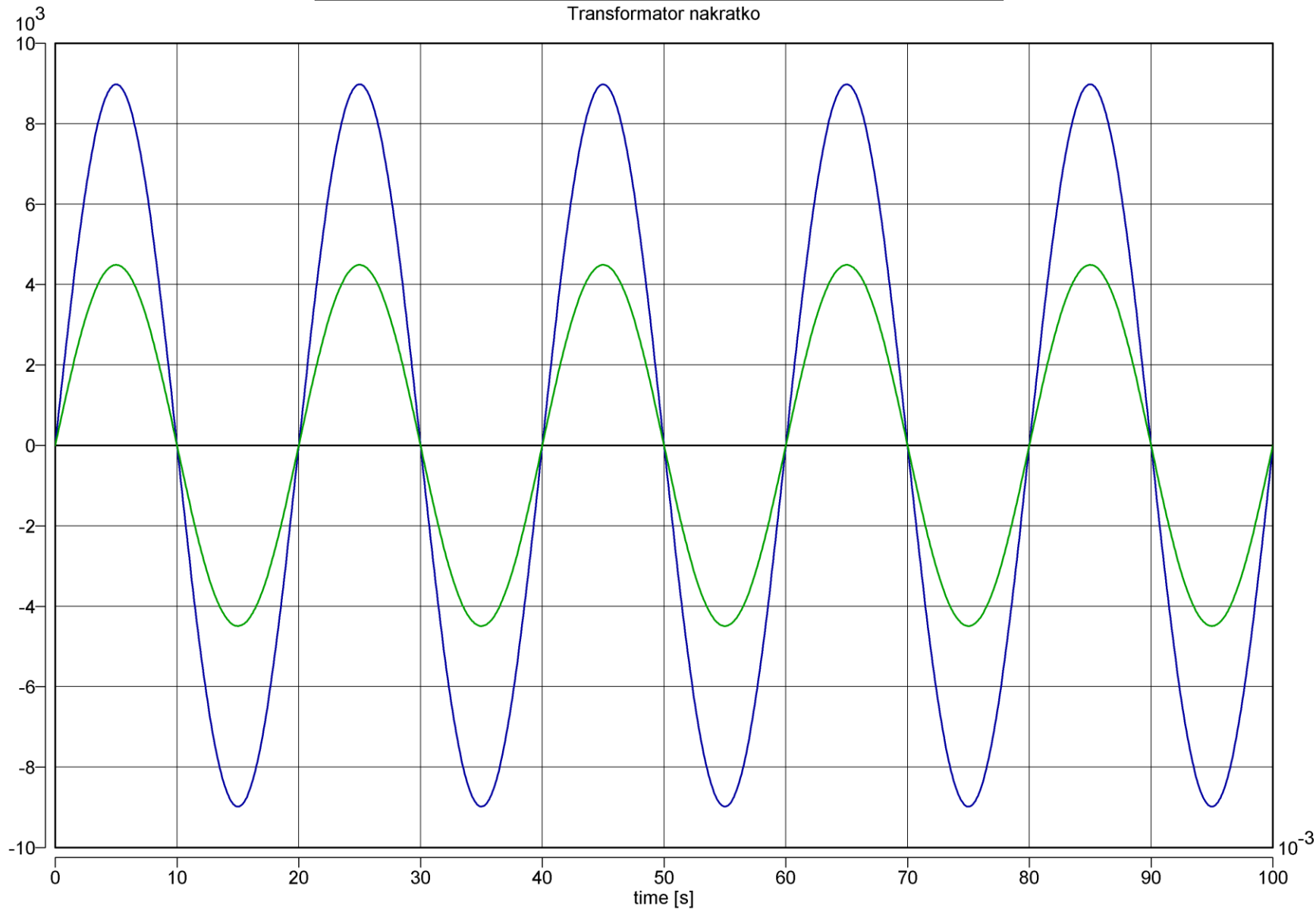
...

```
PRINT(1000) V.1, V.3, I.RK2_1, I.RK2_2;
```

...

Transformátor nakrátko

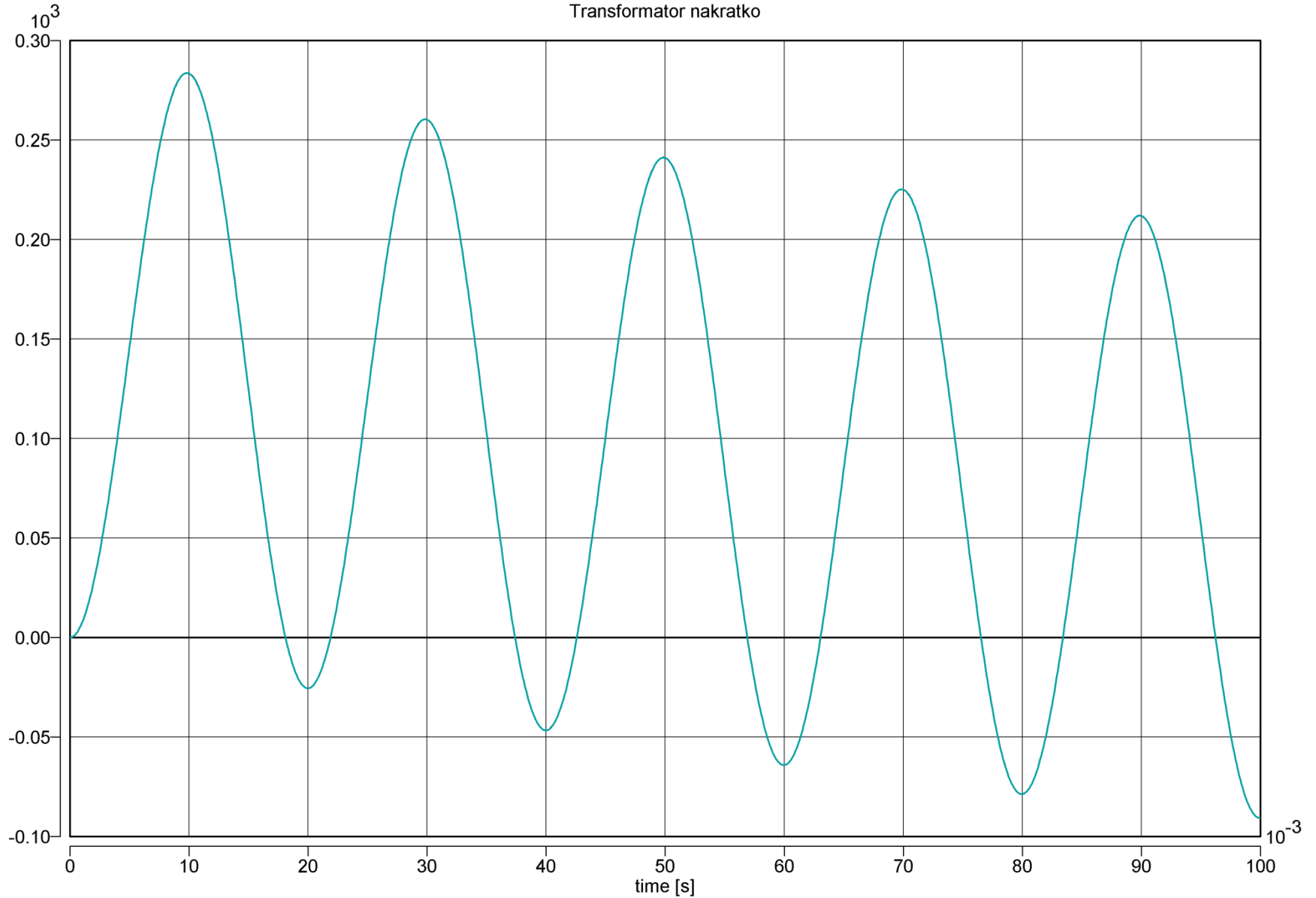
Transformator nakratko



■ V.1 ■ V.3

Transformátor nakrátko

Transformator nakratko



I.RK2_1 I.RK2_2

Transformátor nakrátko

Odhad rozdílu okamžitých hodnot proudů v jednom a druhém vinutí v horní části grafu:

$$\frac{i_0[\%]}{100} \cdot I_N \frac{U_k[\%]}{100} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot 2$$

$$I_0/100 \cdot I_N \cdot U_k/100/2 \cdot \text{sqrt}(2) \cdot 2$$

Protože:

- Rozdíl je tvořen proudem naprázdno.
- Ovšem napájený jen napětím nakrátko.
- Napětí je ale redukováno v místě náhrady příčné impedance na polovinu postupným úbytkem k nulovému napětí.
- V horní části grafu se ukáže rozdíl v dvojnásobku amplitudy, protože v dolní se grafy překrývají.

Chod transformátoru s připojeným vedením naprázdno

Parametry vedení:

$$R_{1F} / km = 0.125 \Omega / km$$

$$X_p / km = 0.4 \Omega / km$$

$$B_p / km = 2.8 \mu S / km$$

$$délka = 50 km$$

$$R_v = delka * R_{1f}$$

$$X_{pv} = delka * X_p$$

$$L_{pv} = X_{pv} / \omega$$

$$B_{pv} = delka * B_p$$

$$C_{pv} = B_{pv} / \omega$$

$$R_v = 6.2500$$

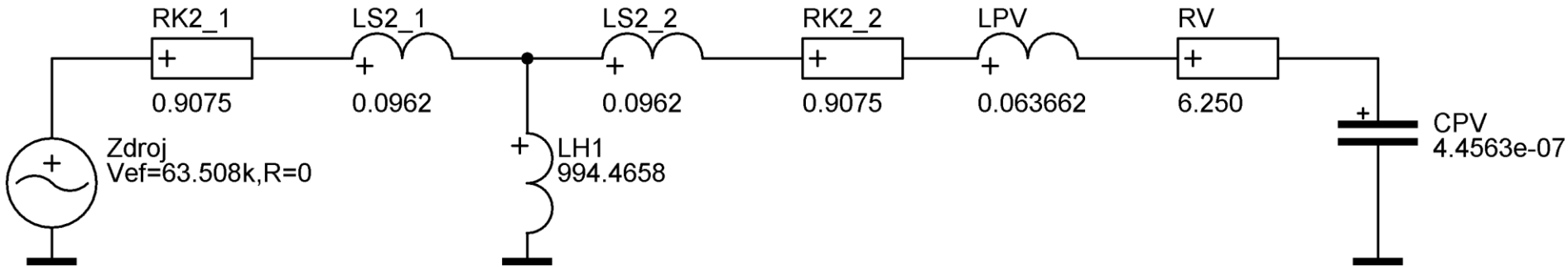
$$X_{pv} = 20.500$$

$$L_{pv} = 0.063662$$

$$B_{pv} = 0.00014000$$

$$C_{pv} = 4.4563e-07$$

Chod transformátoru s připojeným vedením naprázdno



*: Transformator a vedeni naprazdno

*SYSTEM;

RK2_1 1-2 = 0.9075;

LH1 3 = 994.4658;

LS2_1 2-3 = 0.0962;

LS2_2 3-4 = 0.0962;

RK2_2 4-5 = 0.9075;

LPV 5-6 = 0.063662;

RV 6-7 = 6.250;

CPV 7 = 4.4563e-07;

Zdroj > @mains 1,0 / Vef=63.508k,R=0;

*TR;

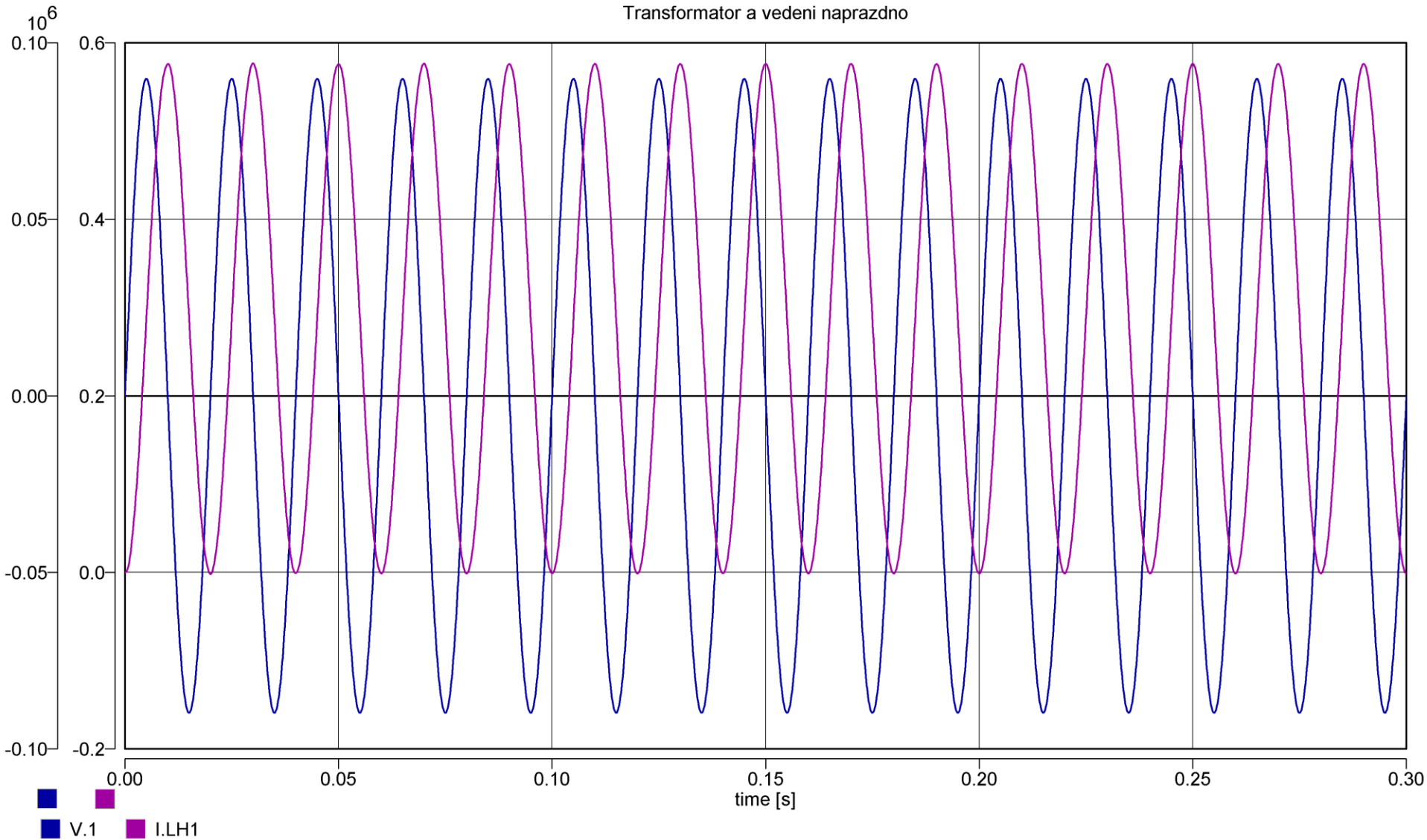
TR 0 0.3;

PRINT(3000) V.1, V.7,
I.RK2_1, I.RK2_2, I.LH1;

RUN;

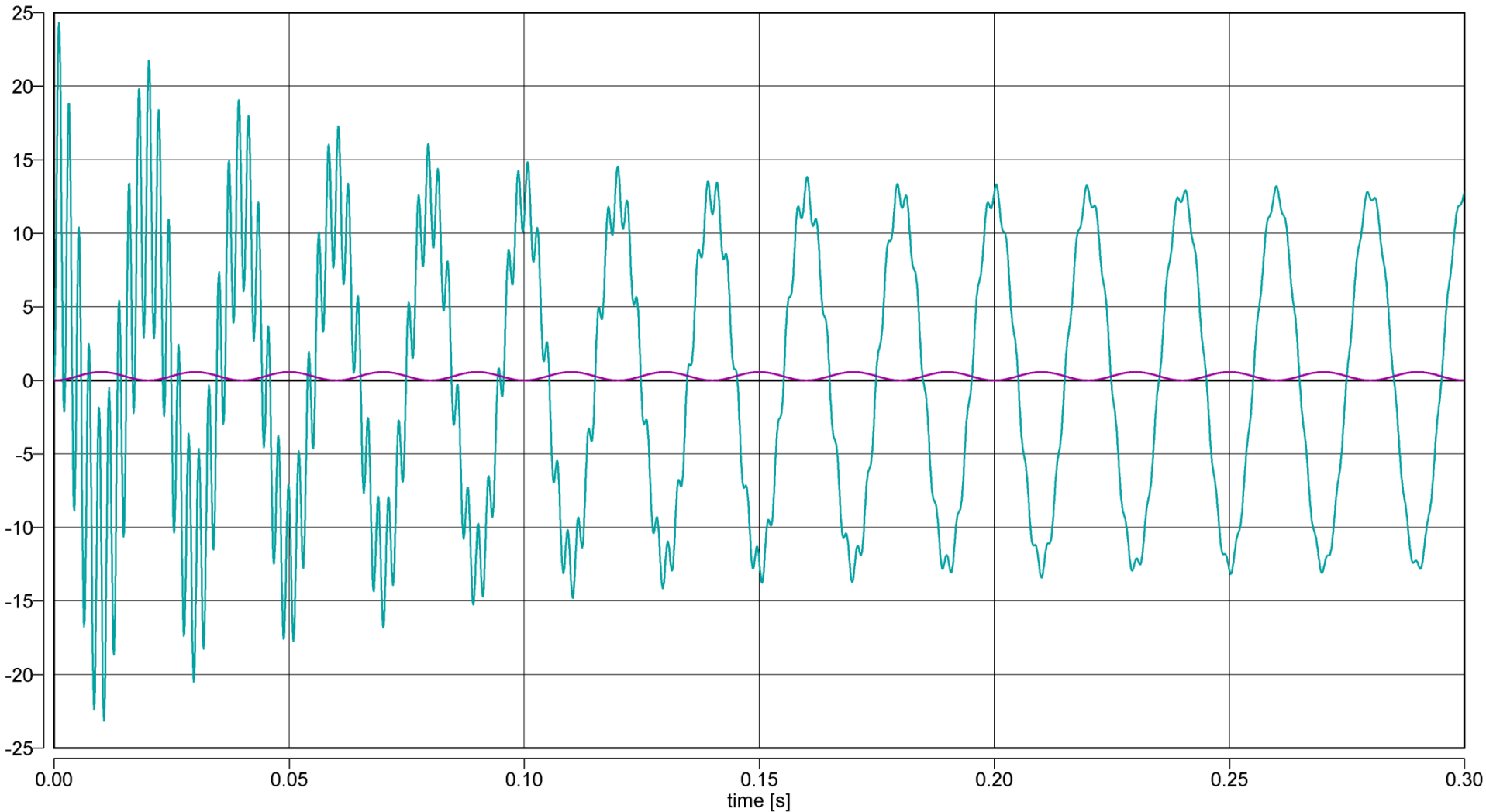
*END;

Chod transformátoru s připojeným vedením naprázdno



Chod transformátoru s připojeným vedením naprázdno

Transformator a vedeni naprazdno



I.RK2_2 I.LH1

Chod transformátoru s připojeným vedením naprázdno

Proud vedení naprázdno, resp. jeho amplituda ve výstupu musí být maximálně:

$$\sqrt{2} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} B_{PV} = U_{mf} B_{PV} = 12.574 \text{ A}$$

Transformátor nakrátko

Zásadní rozdíly proti modelování
jednoduchým náhradním schématem:

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \quad B = \mu \cdot H \quad \int H dl = I$$



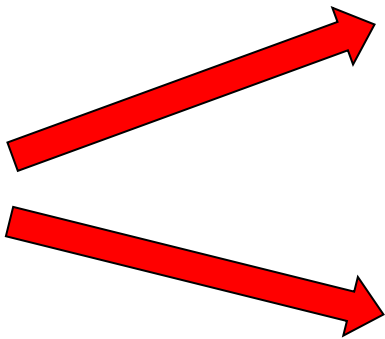
$$H = \frac{I}{l}$$

$$\Phi = N \cdot (\mu \cdot H) \cdot S = N \cdot \left(\mu \cdot \frac{I}{l} \right) \cdot S = \frac{N \cdot I}{\left(\frac{l}{\mu \cdot S} \right)} = \frac{U_{MAG}}{R_{MAG}}$$

Transformátor nakrátko

Zásadní rozdíly proti modelování jednoduchým náhradním schématem:

$$\Phi = \frac{U_{MAG}}{R_{MAG}} = \frac{N_1 \cdot I_{Ui1} + N_2 \cdot I_{Ui2}}{R_{MAG}}$$

$$U_i = N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$U_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$
$$U_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Transformátor nakrátko

Zásadní rozdíly proti modelování
jednoduchým náhradním schématem:


$$U_i = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\left(\frac{U_{MAG}}{R_{MAG}}\right)}{dt} = N \frac{d\left(\frac{N \cdot I}{R_{MAG}}\right)}{dt} \longleftrightarrow U_i = L_\mu \frac{dI}{dt}$$

$$N \frac{d\left(\frac{N \cdot I}{R_{MAG}}\right)}{dt} = L_\mu \frac{dI}{dt} \longrightarrow \frac{N \cdot N}{R_{MAG}} = L_\mu \longrightarrow R_{MAG} = \frac{N^2}{L_\mu}$$

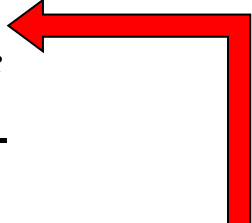
Transformátor nakrátko

Zásadní rozdíly proti modelování
jednoduchým náhradním schématem:

```
sysvar Fi;  
N1= 22000;  
N2=110000;  
PRE=N1/N2;  
KV_PRE=PRE*PRE;  
Lh = 994.4658;  
RM=N2*N2/Lh;
```


$$R_{MAG} = \frac{N^2}{L_{\mu}}$$

```
:Pricna cast  
:Nahrada Lh rizenymi  
zdroji napeti  
EH1 3 = N1*VD.Fi;  
EH2 4 = N2*VD.Fi;  
0=FI*RM-N1*I.EH1-  
N2*I.EH2;
```



$$U_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$U_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$


Transformátor nakrátko

Zásadní rozdíly proti modelování
jednoduchým náhradním schématem:

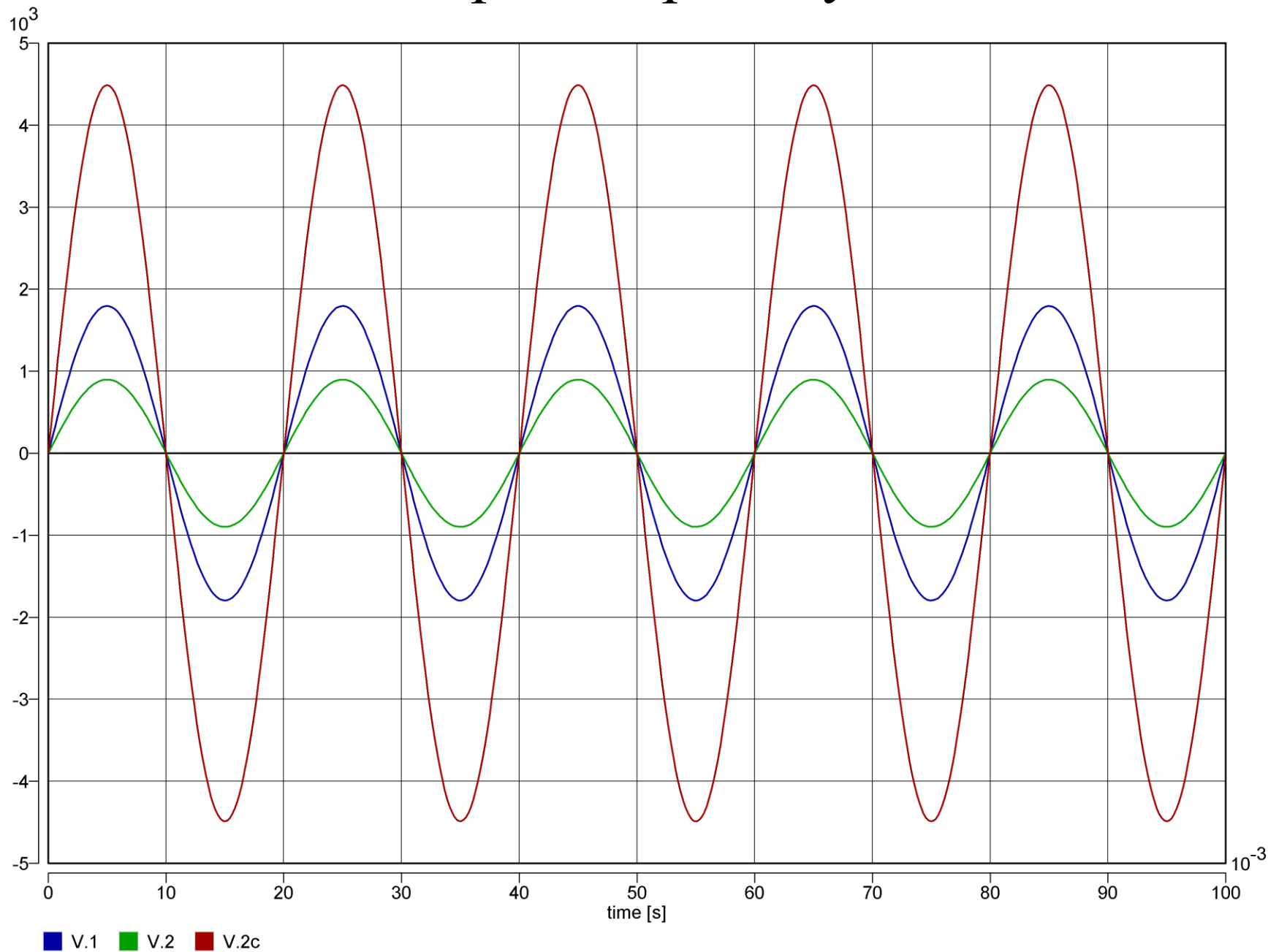
```
sysvar Fi;  
N1= 22000;  
N2=110000;  
PRE=N1/N2;  
KV_PRE=PRE*PRE;  
Lh = 994.4658;  
RM=N2*N2/Lh;
```


$$R_{MAG} = \frac{N^2}{L_{\mu}}$$

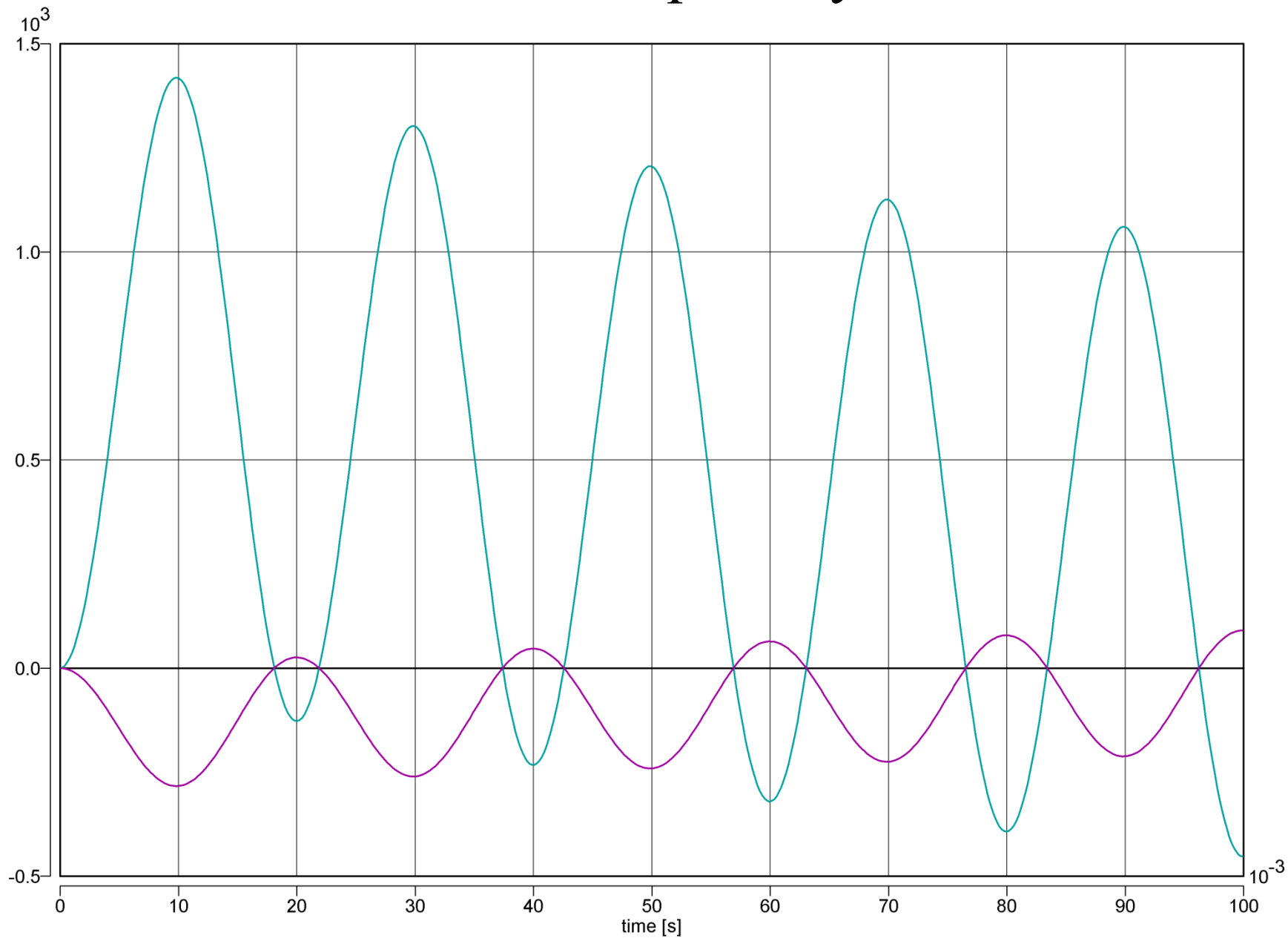
```
:Pricna cast  
:Nahrada Lh rizenymi  
zdroji napeti  
EH1 3 = N1*VD.Fi;  
EH2 4 = N2*VD.Fi;  
0=FI*RM-N1*I.EH1-  
N2*I.EH2;
```


$$\Phi = \frac{U_{MAG}}{R_{MAG}} = \frac{N_1 \cdot I_{Ui1} + N_2 \cdot I_{Ui2}}{R_{MAG}}$$

Napět'ové poměry:



Proudové poměry:



■ I.EH1 ■ I.EH2

Proud nakrátko, resp. dvojnásobek jeho amplitudy ve výstupu musí být:

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_N \frac{N_2}{N_1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \frac{N_2}{N_1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} \frac{110000}{22000} =$$
$$= 296.91 \cdot \frac{110}{22} = 1484.5 \text{ A}$$

Transformátor naprázdno

Rozdíly proti stavu nakrátko:

...

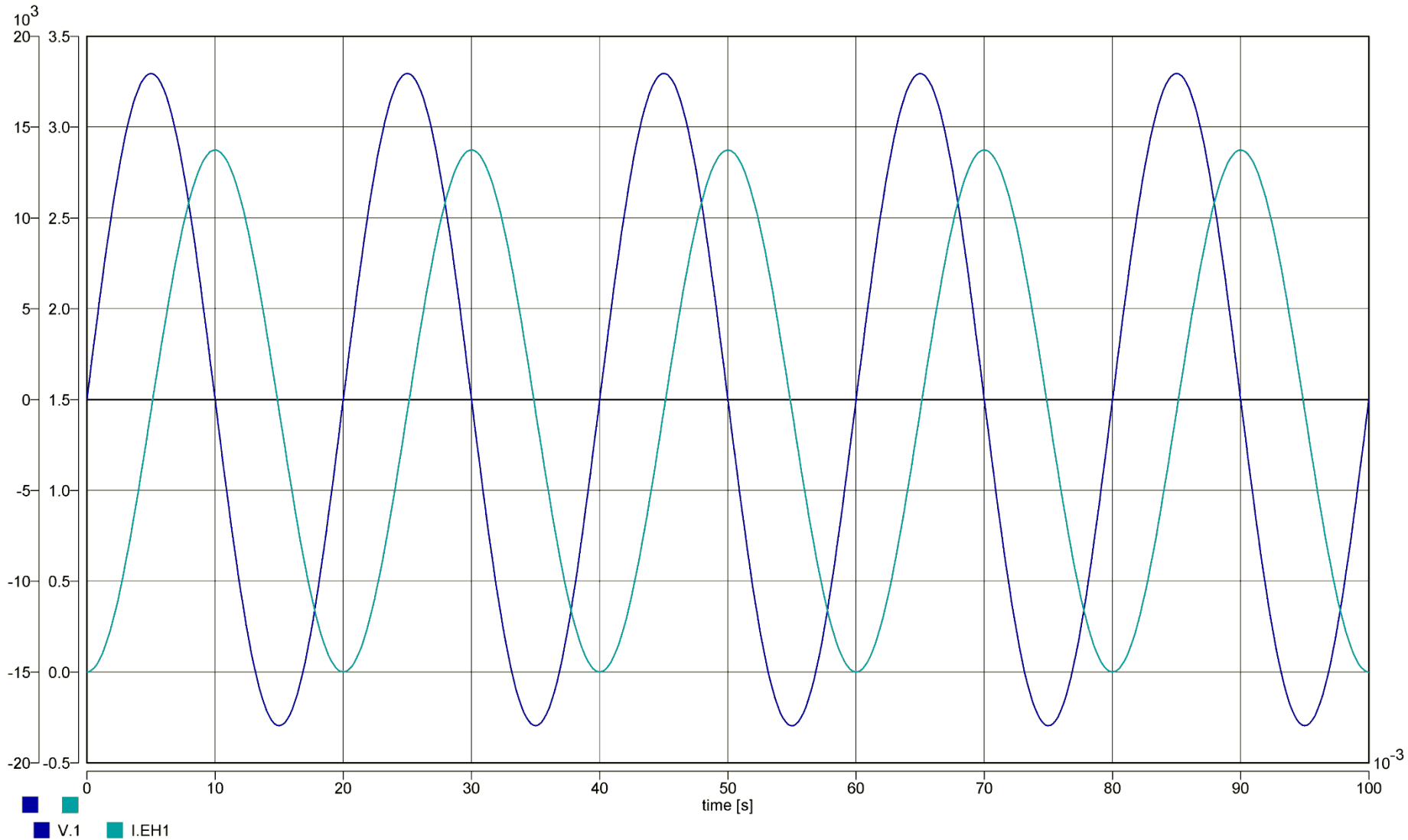
```
E1 1=PRE*89.815e3*sin(100Pi*TIME)*PRE;
```

...

Zrušeno:

```
RZKRAT 3=1E-6;
```

Napětí a proud napájeného vinutí:

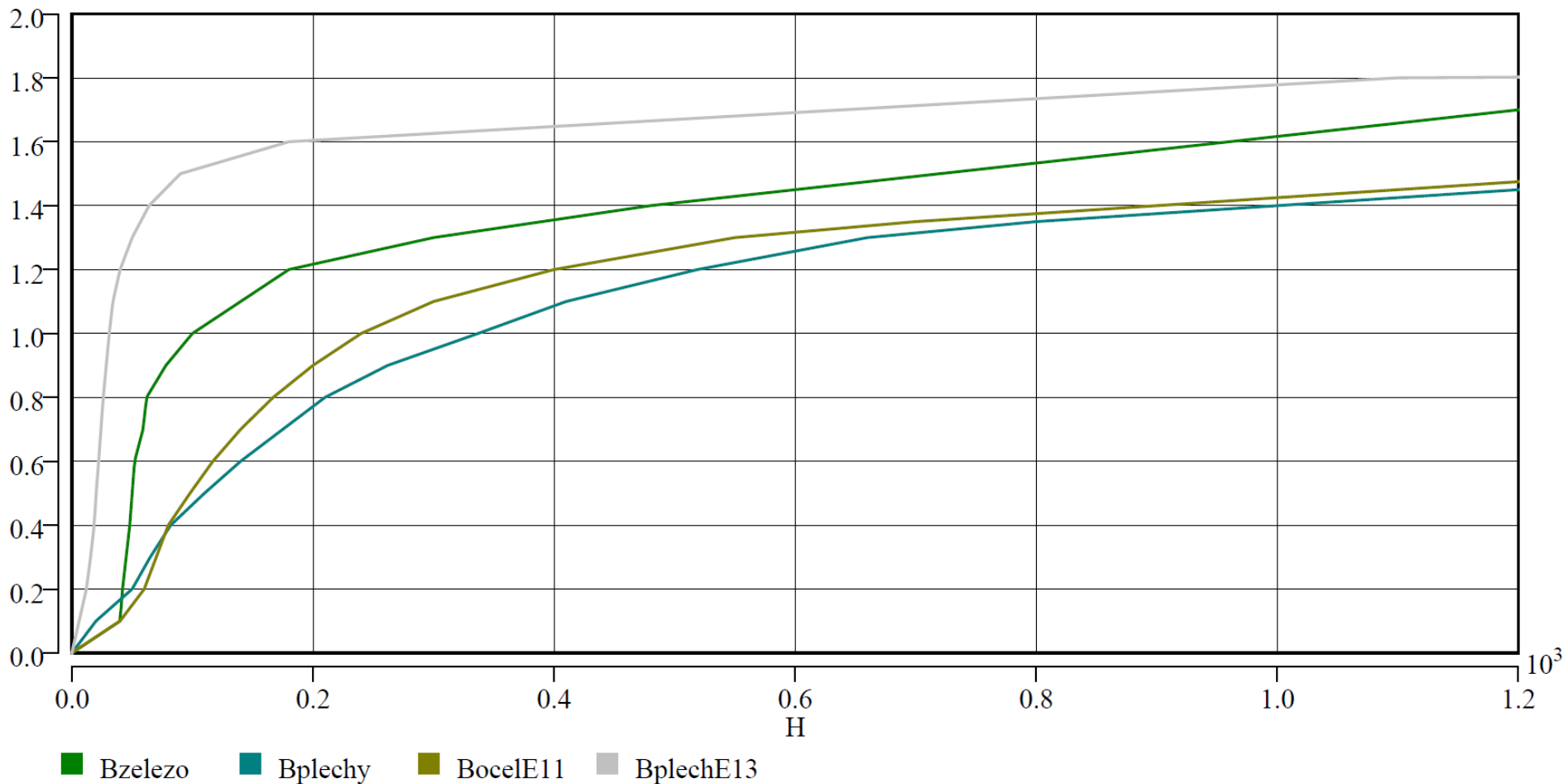


Proud naprázdno, resp. dvojnásobek jeho amplitudy ve výstupu musí být:

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_0 \frac{N_2}{N_1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i_0 \cdot I_N \frac{N_2}{N_1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i_0 \cdot \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \frac{N_2}{N_1} =$$
$$= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.002 \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} \frac{110000}{22000} = 2.97 \text{ A}$$

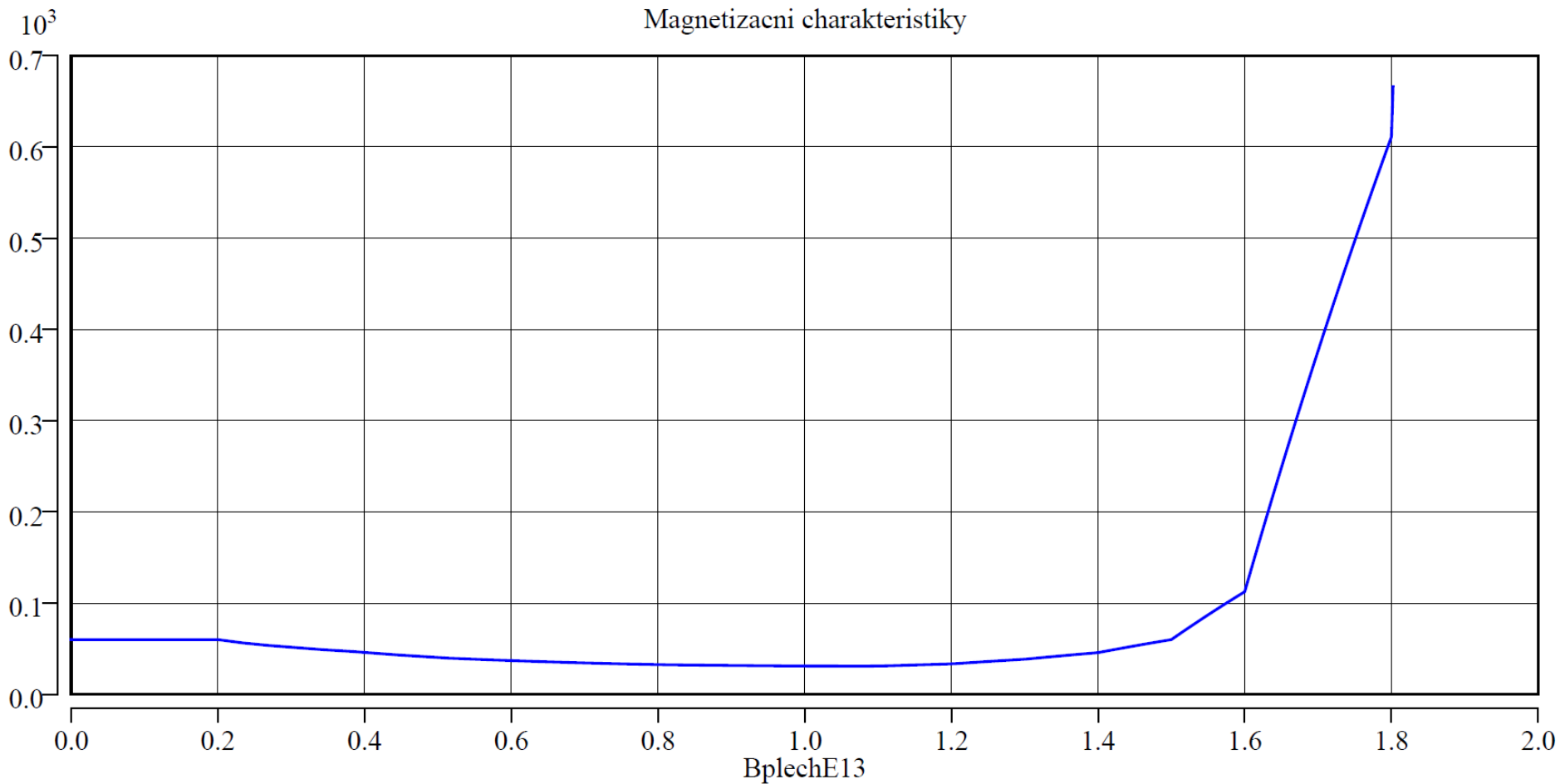
Transformátor naprázdno se sycením daným tabulkou

Magnetizační charakteristiky



Transformátor naprázdno se sycením daným tabulkou

Magnetizační charakteristiky



■ RplechE13

Transformátor naprázdno se sycením daným tabulkou

Rozdíly proti stavu modelu bez sycení:

...

:Lh = 994.4658 H

:Rm = N2*N2/Lh = 1.2167e+007

:Nahrada magnetickeho odporu tabulkou

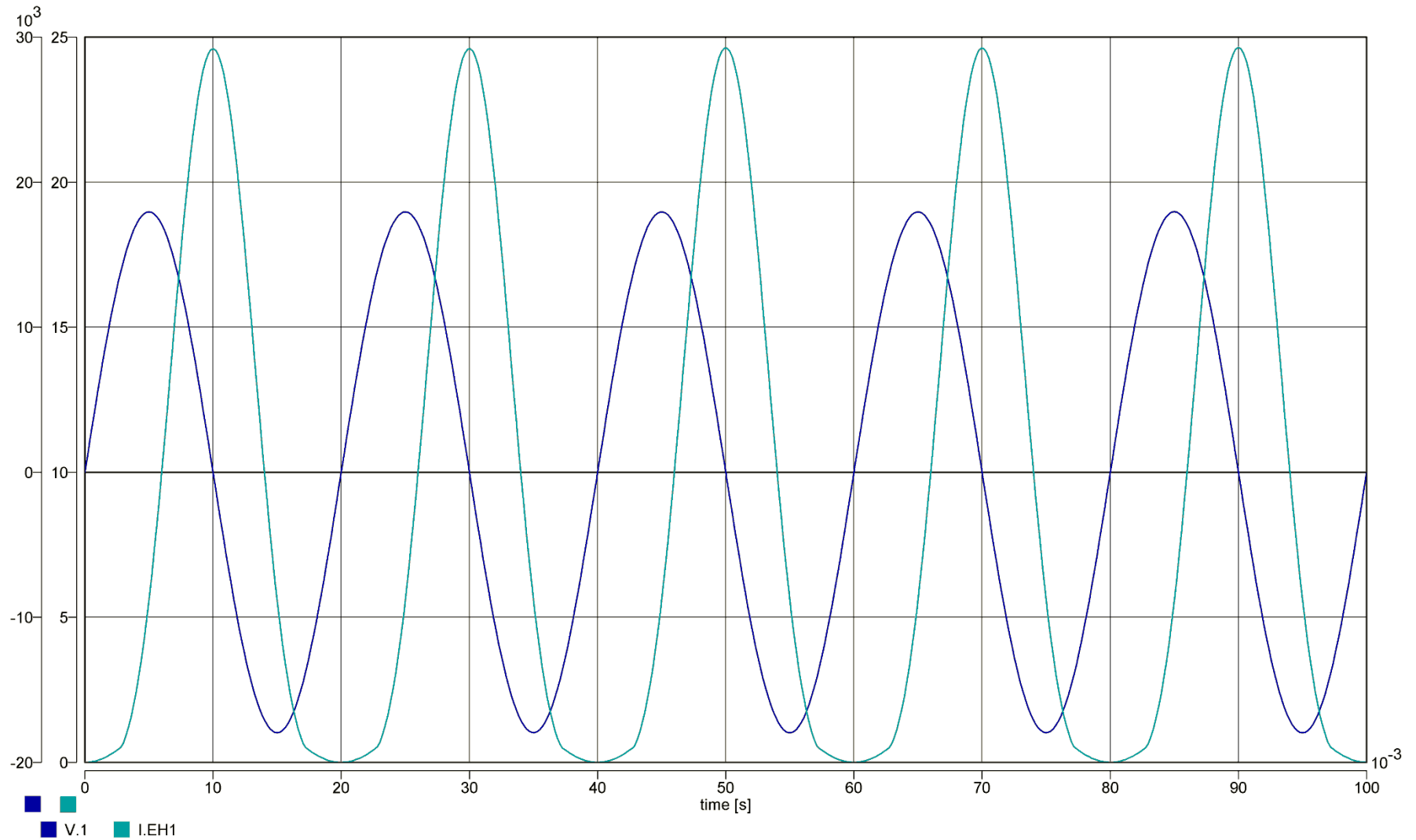
ODPOR /TAB/	0,	1.2167e+007,
	0.001,	1.2167e+007,
	0.005,	1e8;...

...

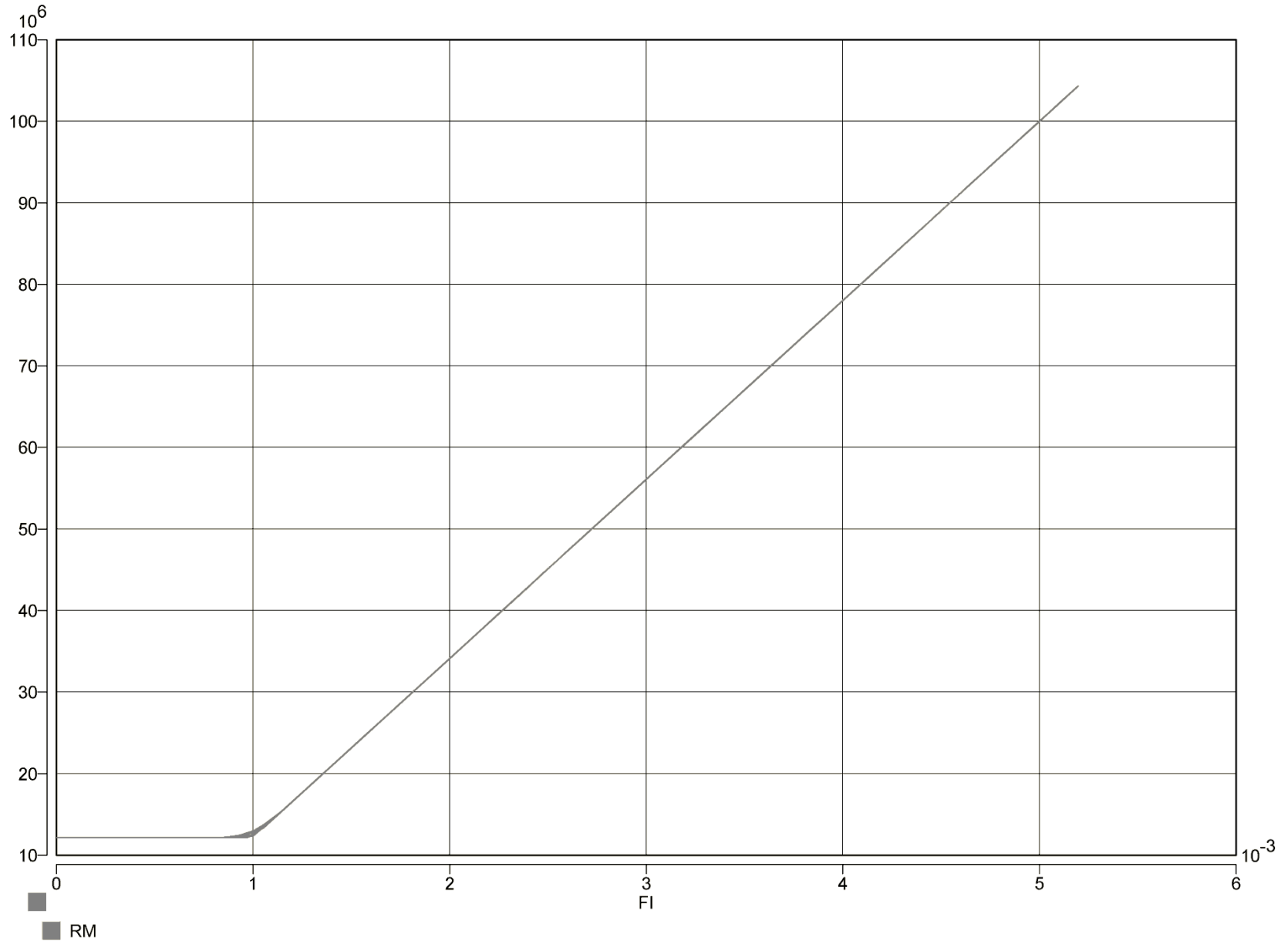
RM=ODPOR (ABS (FI)) ;

...

Napětí a proud napájeného vinutí:



Závislost magnetického odporu na toku:



Transformátor naprázdno se sycením daným exponenciální aproximací Rozdíly proti stavu modelu bez sycení:

...

$$:Lh = 994.4658 \text{ H}$$

$$:Rm = N2*N2/Lh = 1.2167e+007$$

$$:Rm = N2*N2/Lh*Exp(400*Fi) ;$$

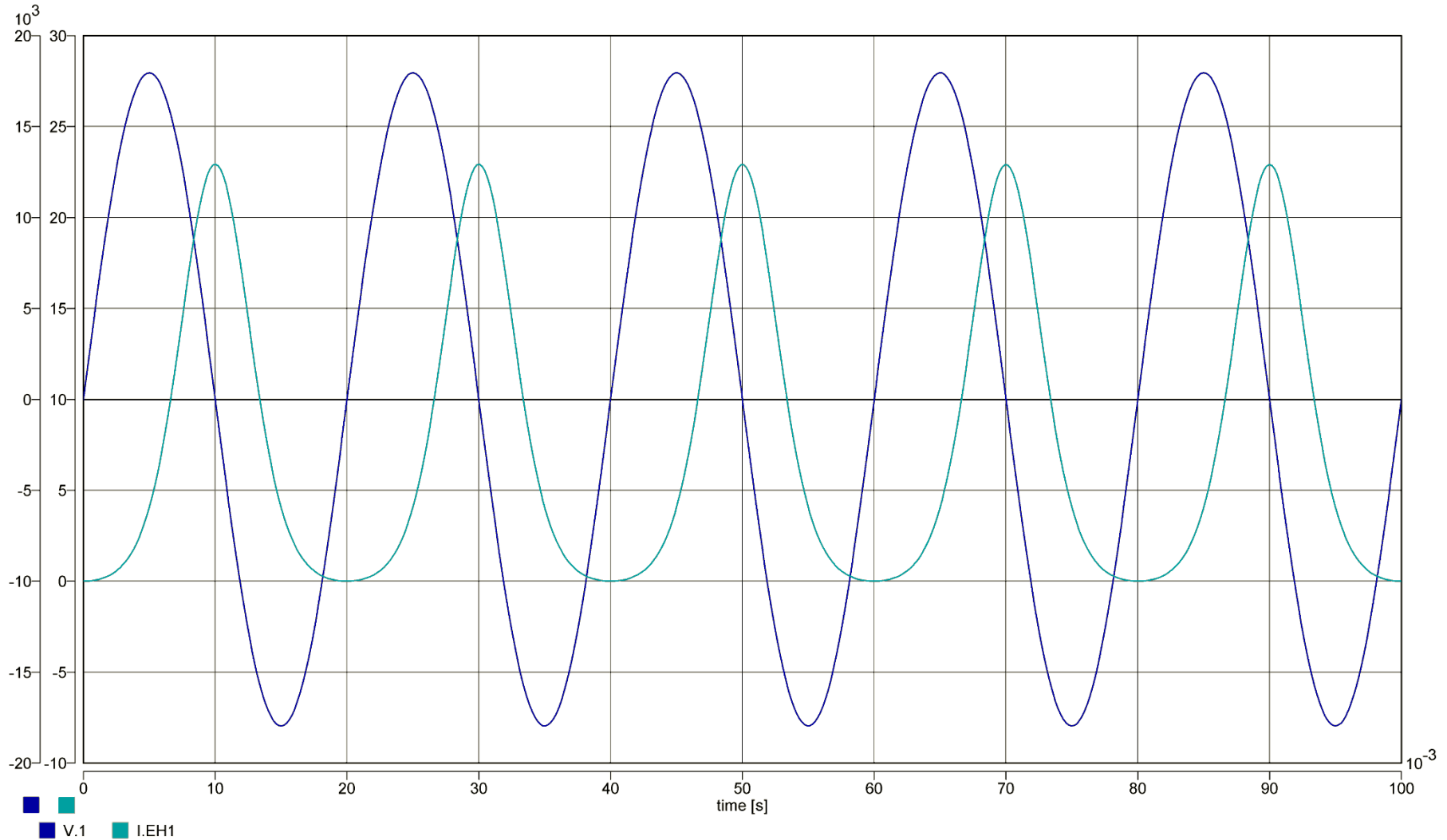
$$ODPOR /EXP/ B=1.2167e+007, C = 400 ;$$

...

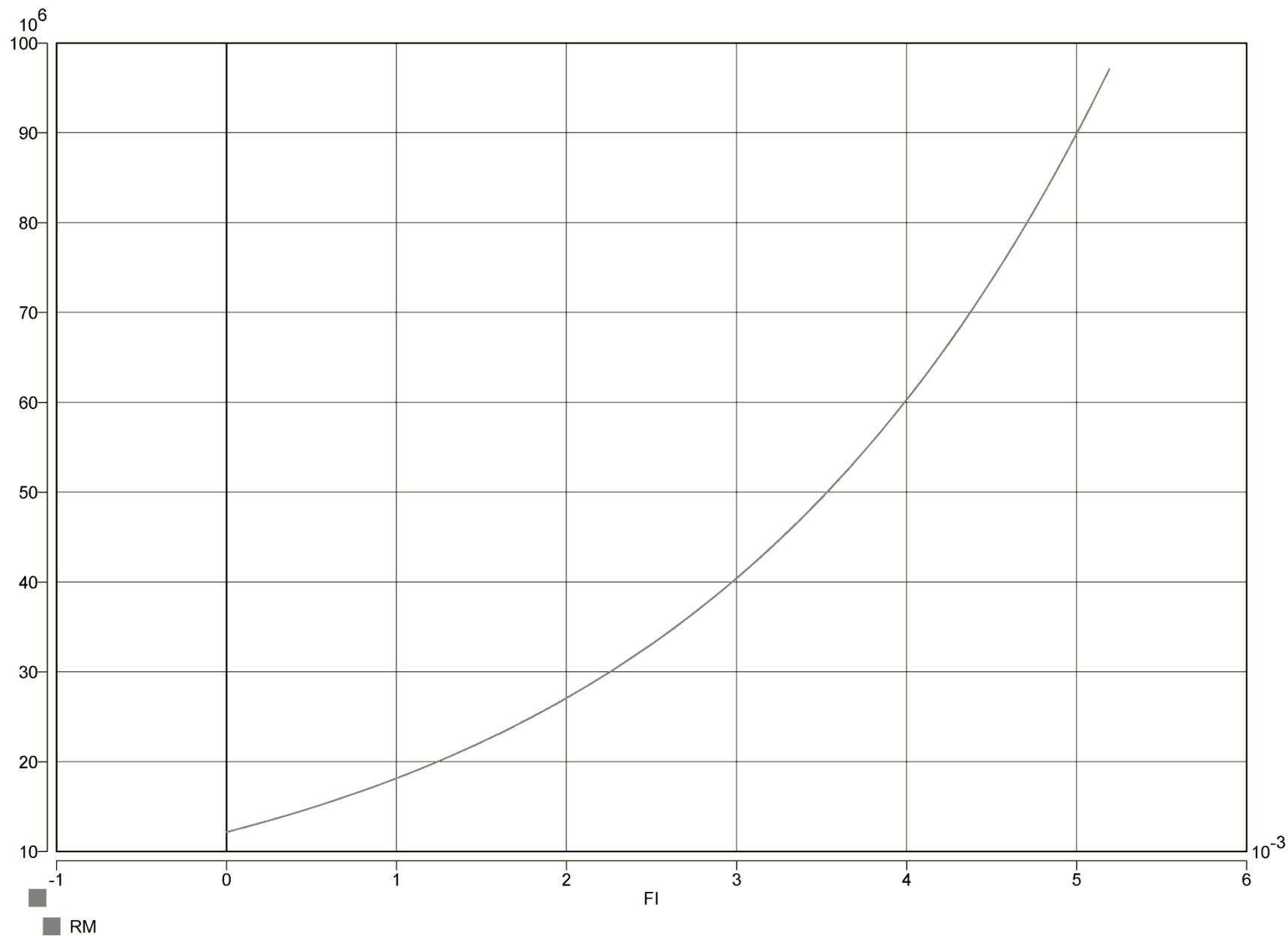
$$RM=ODPOR (ABS (FI)) ;$$

...

Napětí a proud napájeného vinutí:



Závislost magnetického odporu na toku:



Transformátor se sycením daným exponenciální aproximací zatížený vedením naprázdno

Rozdíly proti předchozímu modelu:

...

: Vedeni

:Rv = 6.250 ohm

RIV1 3-4=6.250 ;

:Lpv = 0.063662 H

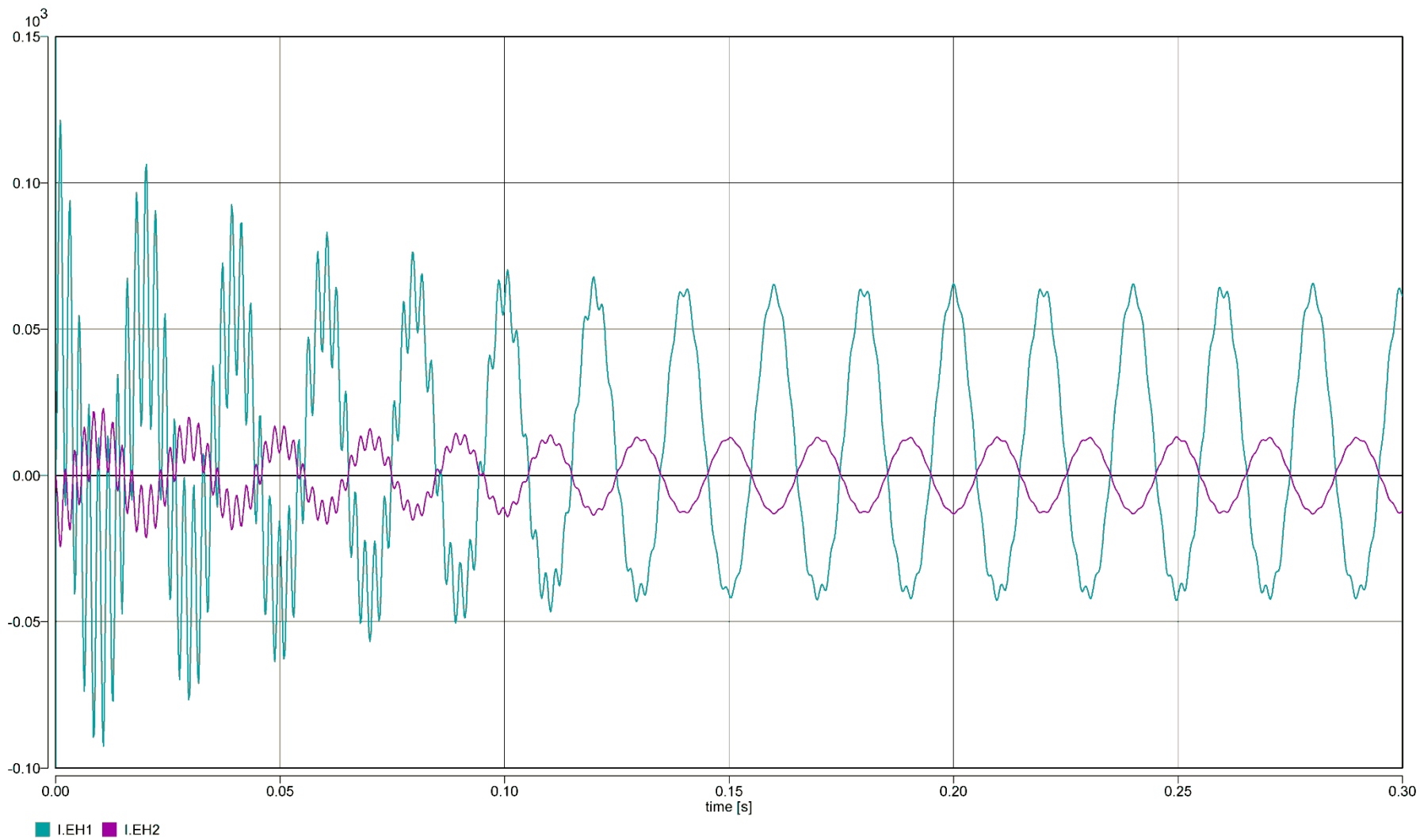
LPV1 -RIV1=0.063662 ;

:Cpv = 4.4563e-07

CPV1 4=4.4563e-07 ;

...

Proudové poměry:



**Transformátor se sycením daným exponenciální
aproximací zatížený vedením naprázdno, posléze
zkrat mezi transformátorem a vedením a
následné vypnutí u zdroje**

Rozdíly proti předchozímu modelu:

...

: Vypnutí zkratu

```
RIVYP 1-1c=1E-6+1E6*(TIME>0.11);
```

...

:Rk/2 = 0.0605 ohm

```
RI1 1c-2=0.0605*KV_PRE;
```

...

:Zkrat na druhem vinuti

```
RZKRAT 3=1E-6+1E6*(TIME<0.06);
```

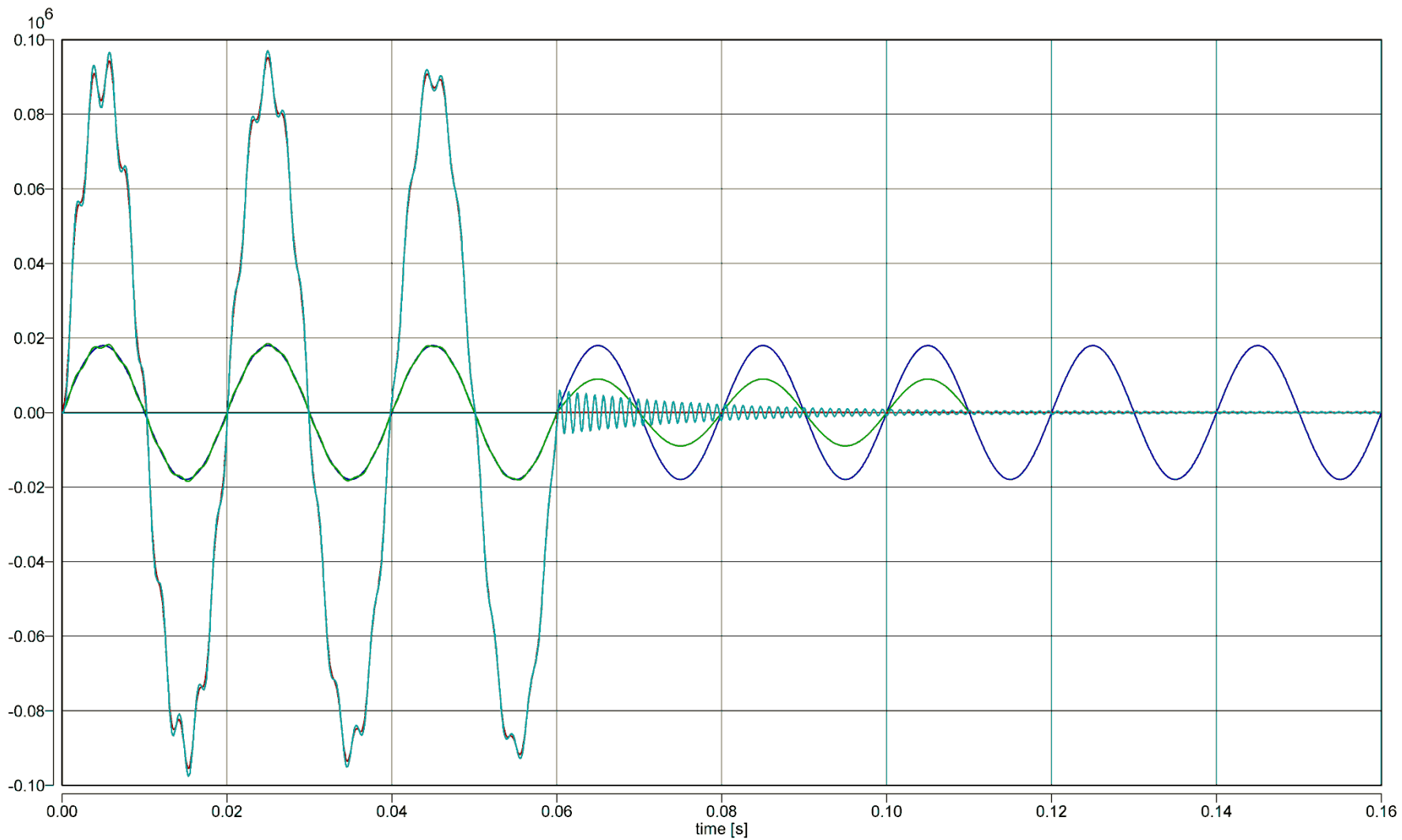
...

```
tr 0 0.16;
```

```
print (1600) V.1,V.2,V.3,V.4,I.RI1,I.RI2,I.CPV1;
```

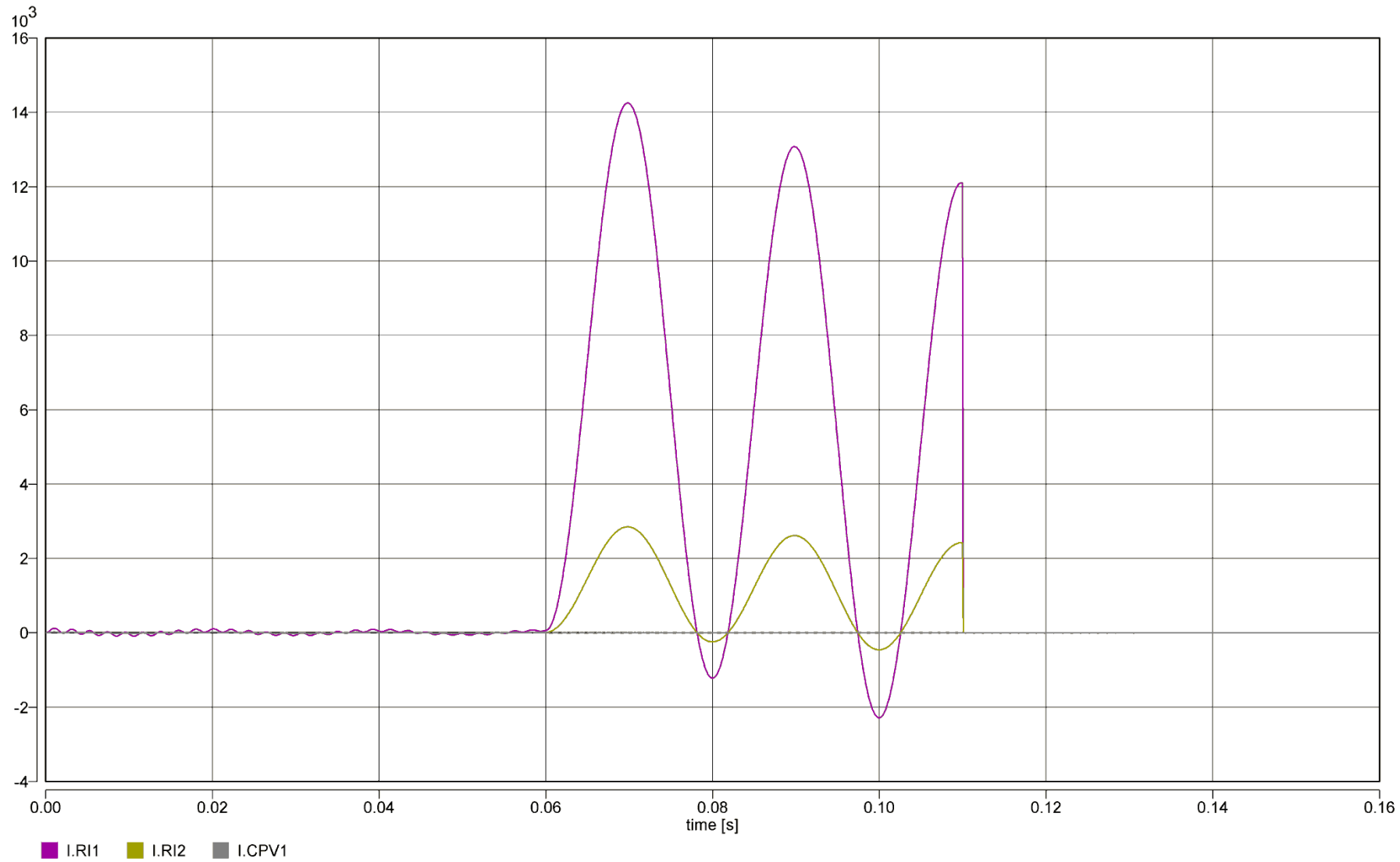
...

Napět'ové poměry:



■ V.1 ■ V.2 ■ V.3 ■ V.4

Proudové poměry:



Maximální zkratový proud, resp. dvojnásobek jeho amplitudy ve výstupu musí být:

$$2 \cdot \frac{U_m}{\sqrt{R_k^2 + (\omega \cdot L_s)^2}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_N \cdot \frac{100}{u_k [\%]} = 2969.1 \text{ A}$$

Na straně 22 kV:

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_N \cdot \frac{100}{u_k [\%]} \frac{N_2}{N_1} = 14.845 \text{ kA}$$

Transformátor se syčením daným exponenciální aproximací zatížený vedením naprázdno, posléze zkrat na konci vedení a následné vypnutí u zdroje

Rozdíly proti předchozímu modelu:

...

:Cpv = 4.4563e-07

CPV1 3=4.4563e-07 ;...

:Zkrat na konci vedeni

RZKRAT 4=1E-6+1E6*(TIME<0.06) ;...

...

Zrušit:

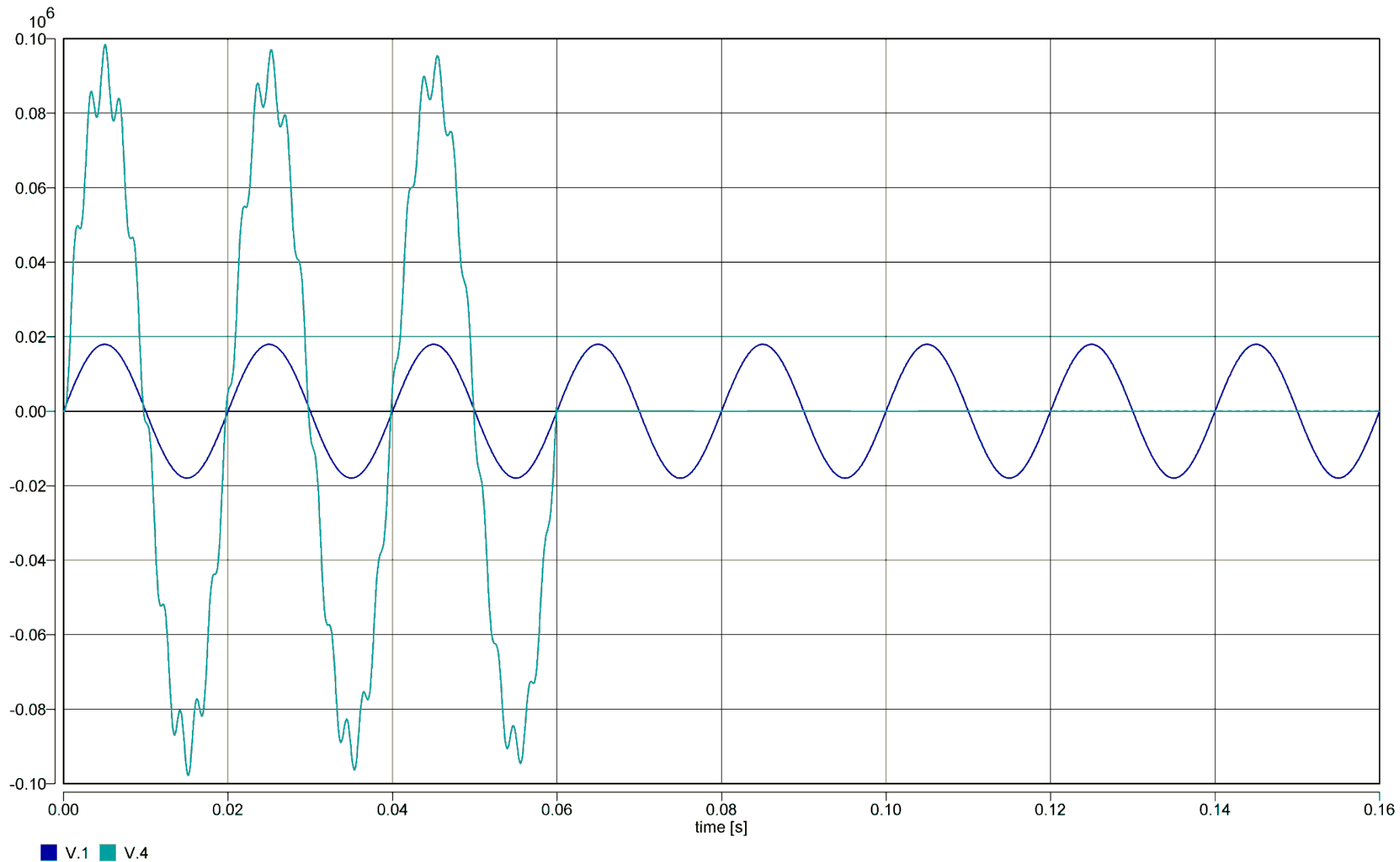
...

:Zkrat na druhem vinuti

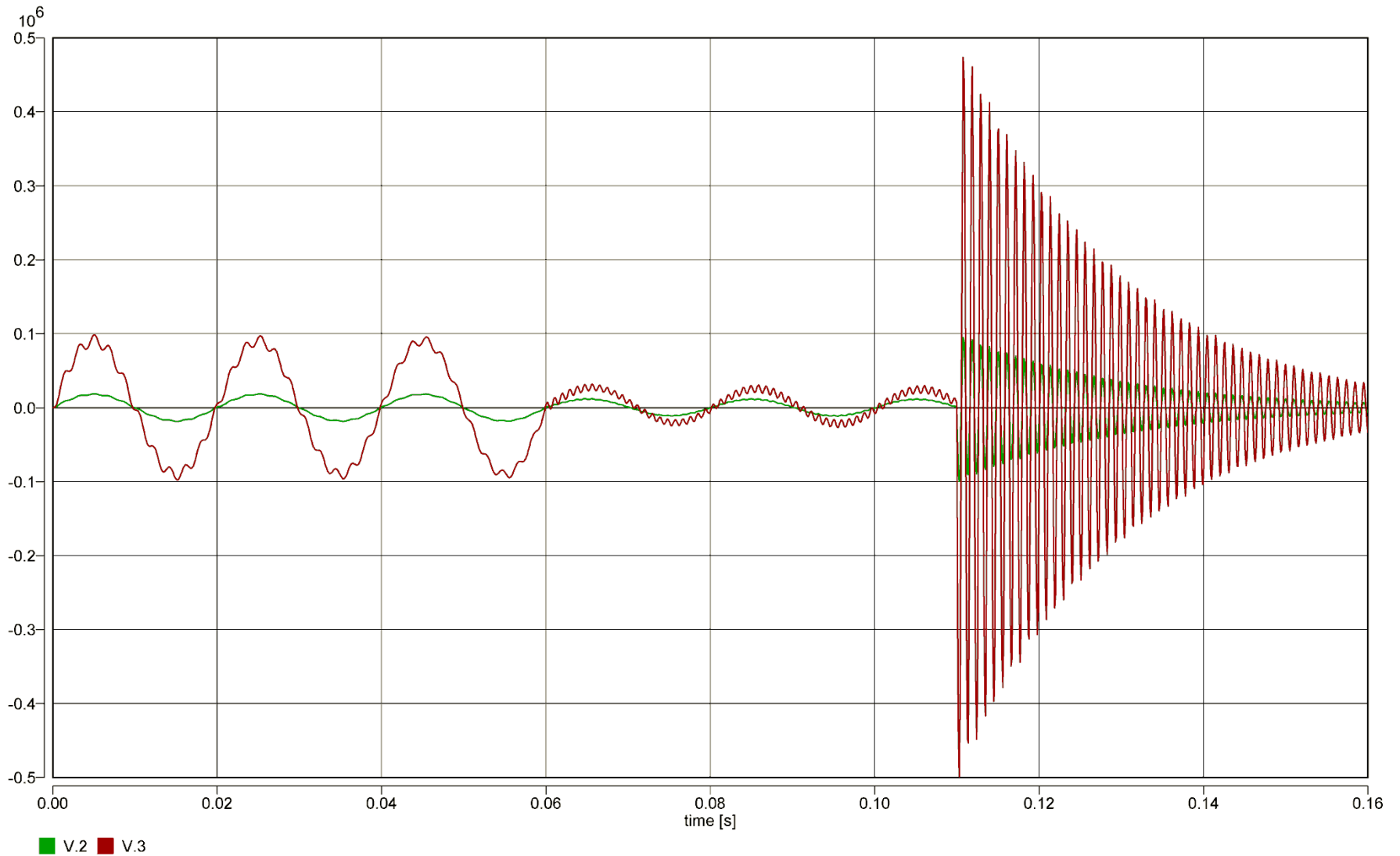
RZKRAT 3=1E-6+1E6*(TIME<0.06) ;

...

Napět'ové poměry:



Napět'ové poměry:



Proudové poměry:

