

STUDIUL PROCESELOR TRANZITORII DIN APARATELE ELECTRICE DE COMUTAȚIE

1. Noțiuni teoretice

Aparatele de comutație reprezintă cea mai importantă clasă de aparate electrice, care au rol de a închide (conecta) și deschide (deconecta) circuitele electrice.

La conectarea și deconectarea circuitelor electrice, cu ajutorul aparatelor electrice de comutație apar tensiuni și curenți care diferă de tensiunile și curenții din regimurile staționare sau cvasistaționare permanente, care creează condiții aspre de solicitare a aparatelor electrice. Aceste solicitări sunt în general de scurtă durată și unilaterale; curenții foarte mari sunt însoțiți de tensiuni mici și invers.

În tratarea acestor procese tranzitorii din aparatele de comutație se vor considera numai cazurile reprezentative și schematizate întâlnite în tehnica curenților tari cu următoarele ipoteze:

- nu se ține seama de apariția arcului electric la conectarea sau deconectarea aparatelor electrice;
- stabilirea contactului și întreruperea lui se consideră instantanee;
- elementele schemei se consideră concentrate.

Aceste ipoteze simplificatoare servesc mai ales la înțelegerea noțiunilor de tensiune de restabilire și curent de scurtcircuit necesare stabilirii solicitărilor la care este supus un aparat electric de comutație.

Tensiunea tranzitorie de restabilire apare ca o oscilație a tensiunii între contacte având amplitudini și frecvențe ridicate care conduc la reaprinderea arcului electric de deconectare.

Acest fenomen poate să fie:

- periculos pentru aparatul de comutație (la deconectarea defectului kilometric);
- indiferent pentru aparatul de comutație (la deconectarea curenților mici inductivi);
- indiferent pentru aparatul de comutație (la deconectarea curenților mici capacitivi).

Regimul tranzitoriu corespunde duratei de timp în care tensiunea oscilanta de restabilire (U_r) devine egală cu tensiunea sursei sau a circuitului (U_s), valoarea stabilizată a lui U_r fiind tocmai U_s .

Alura tensiunii tranzitorii de restabilire depinde în cea mai mare măsură de parametrii circuitului în care este montat aparatul de comutație, iar în parte și de parametrii dispozitivului de stingere al acestui aparat.

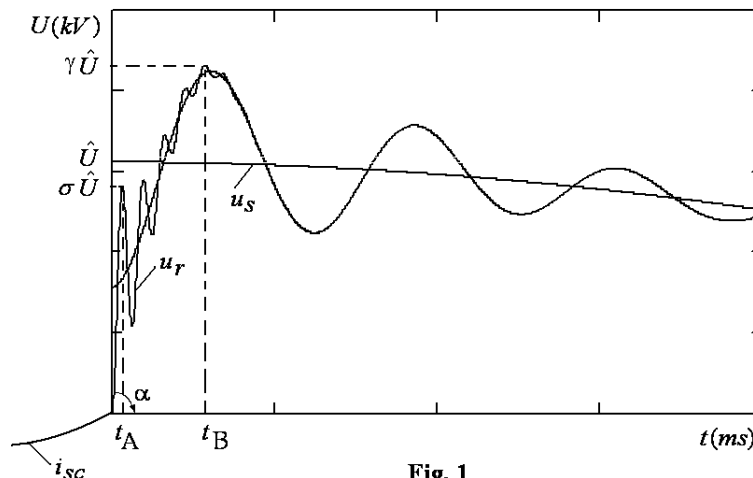


Fig. 1

Parametrii tensiunii tranzitorii de restabilire

Pentru cazul general al curbei tensiunii de restabilire se pot defini următoarele valori caracteristice principale:

- 1) valoarea de vârf $\hat{U}_r = \gamma \hat{U}$ unde γ = factorul de oscilație sau de supraoscilație, \hat{U} rezultă din $u_s(t) = \hat{U} \sin \omega t$;
- 2) valoarea primului vârf $U_1 = \sigma \hat{U}$, unde σ = factorul de suboscilație;
- 3) panta (sau viteza de creștere a) curbei la origine: $tg(\alpha) = \left. \frac{\partial U}{\partial t} \right|_{t=0}$ măsurată în [kV/μs];
- 4) frecvența proprie de oscilație: $f_0 = \frac{1}{T_0}$.

Scurtcircuitul în rețele electrice

Deoarece curentul în regim normal este neglijabil în raport cu cel de scurtcircuit, fenomenul de scurtcircuit poate fi asimilat cu o conectare. Astfel, scurtcircuitul dintr-o rețea electrică se poate asimila cu conectarea unui circuit R-L la o tensiune alternativă, aproximație posibilă având în vedere valorile neglijabile ale capacităților. Expresia curentului de scurtcircuit este:

$$i_{sc} = i_p + i_a$$

- i_p reprezintă componenta periodică a curentului de scurtcircuit, care rămâne constantă ca amplitudine (pentru U_m constant) și constituie curentul stabilizat al noului regim;
- i_a reprezintă componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit care scade treptat către zero în funcție de reortul $\tau_L = L/R$. Pentru $L \rightarrow 0$ componenta nu apare iar pentru $R \rightarrow 0$ aceasta nu se amortizează.

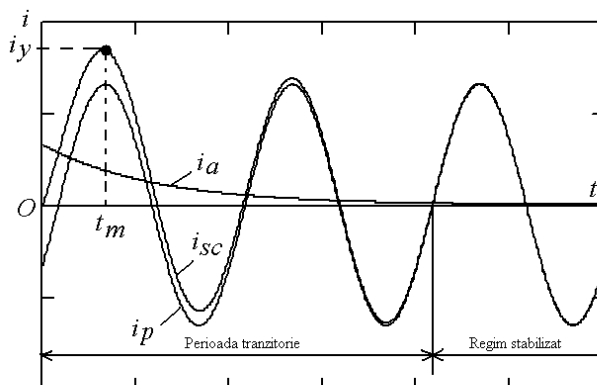


Fig. 2

Valoarea maximă a curentului de scurtcircuit în perioada tranzitorie se numește curent de șoc și se ia în considerare în calculul stabilității dinamice a aparatelor electrice și a barelor rigide. Valoarea curentului de scurtcircuit corespunzătoare regimului stabilizat servește pentru calculul stabilității termice a aparatelor electrice și a căilor de curent (cabluri, bare rigide, conductoare flexibile):

$$i_{soc} = k_{soc} \sqrt{2} i_p, \quad 1 < k_{soc} < 2,$$

În majoritatea cazurilor $k_{soc} \approx 1.8$, deci $i_{soc} = 1.8 \sqrt{2} i_p$, $i_{soc} = 2.55 i_p$.

OBS: se mai întâlnesc notațiile: $i_{soc} = i_y$, $k_{soc} = k_y$.

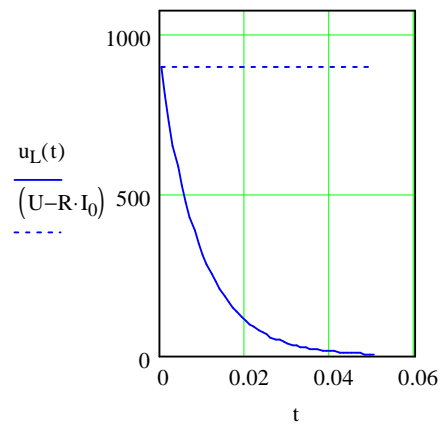
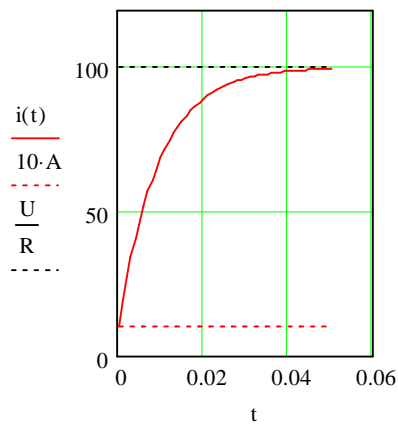
Conectarea circuitelor

Utilizând programul MATHCAD, se va analiza regimul tranzitoriu de comutație la circuitele serie R-L, R-C, R-L-C cu parametri concentrați.

Conectarea unui circuit R-L serie la tensiune continuă

$$U := 1000 \text{ V} \quad R := 10 \cdot \Omega \quad L := 95 \cdot \text{mH} \quad I_0 := 10 \cdot \text{A} \quad \tau_L := \frac{L}{R}$$

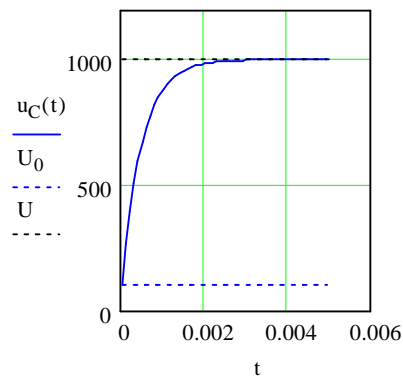
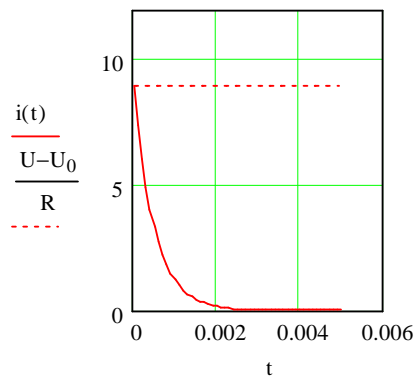
$$i(t) := \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right) + I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad u_L(t) := (U - R \cdot I_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad t := 0 \cdot \text{s}, 0.001 \cdot \text{s} .. 0.05 \cdot \text{s}$$



Conectarea unui circuit R-C serie la tensiune continuă

$$U := 1000 \text{ V} \quad R := 100 \cdot \Omega \quad C := 5 \cdot \mu\text{F} \quad U_0 := 100 \cdot \text{V} \quad \tau_C := R \cdot C$$

$$i(t) := \frac{U - U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_C}} \quad u_C(t) := U_0 + (U - U_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_C}} \right) \quad t := 0 \cdot \text{s}, 0.0001 \cdot \text{s} .. 0.005 \cdot \text{s}$$



Conectarea unui circuit R-C serie la tensiune continuă

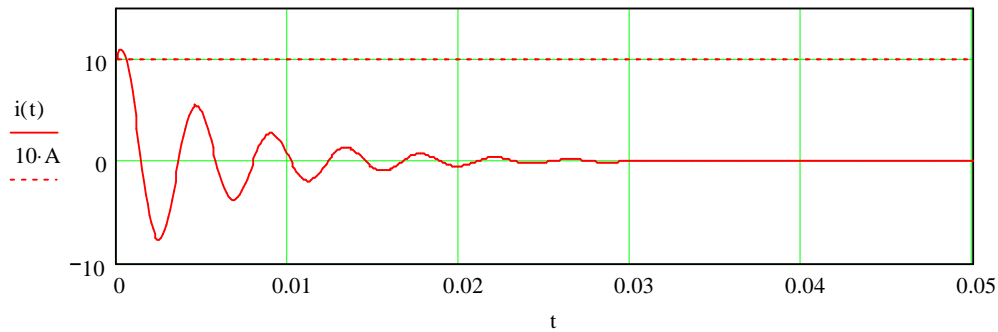
$$R := 30\ \Omega \quad L := 95\ \text{mH} \quad C := 5\ \mu\text{F} \quad U := 1000\ \text{V} \quad U_0 := 100\ \text{V} \quad I_0 := 10\ \text{A}$$

$$\delta := \frac{R}{2 \cdot L} \quad \omega_0 := \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \omega_1 := \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$U_1 := \sqrt{(U - U_0 - \delta \cdot L \cdot I_0)^2 + (\omega_1 \cdot L \cdot I_0)^2}$$

$$\Psi := \text{atan}\left(\frac{\omega_1 \cdot L \cdot I_0}{U - U_0 - \delta \cdot L \cdot I_0}\right) \quad I_1 := \frac{U_1}{\omega_1 \cdot L}$$

$$i(t) := I_1 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \Psi) \quad t := 0\ \text{s}, 0.0001\ \text{s} \dots 0.05\ \text{s}$$



Conectarea unui circuit R-L serie la tensiune alternativă. Studiul curentului de scurtcircuit trifazat.

$$\text{ms} \equiv 10^{-3} \cdot \text{sec}$$

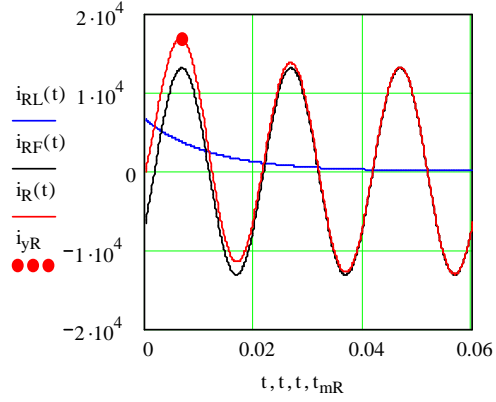
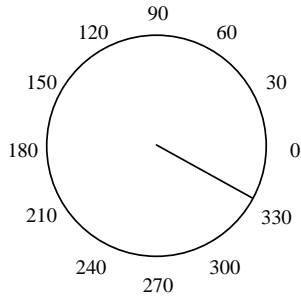
$$I_m := 13.1\ \text{kA} \quad f := 50\ \text{Hz} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad T := \frac{1}{f}$$

$$\Delta t := 4.163\ \text{ms} \quad \phi := \omega \cdot \Delta t \quad \psi_R := \omega \cdot \frac{T}{8} - \frac{\pi}{2} \quad \alpha_R := \phi + \psi_R \quad \tau_L := \frac{\tan(\phi)}{\omega}$$

$$\text{sgn}(x) := \text{if}(x \geq 0, 1, -1)$$

$$i_R(t) := I_m \cdot \left(\sin(\omega \cdot t - \alpha_R) + \sin(\alpha_R) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right) \quad i_{RL}(t) := I_m \cdot \sin(\alpha_R) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad i_{RF}(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha_R)$$

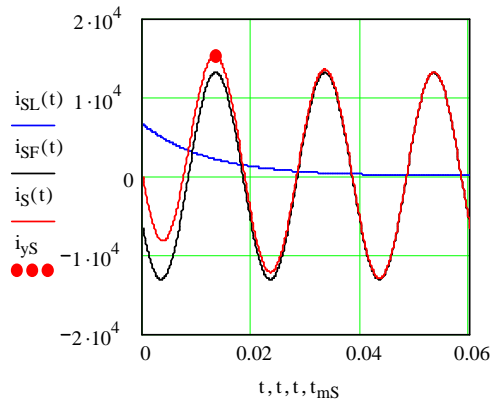
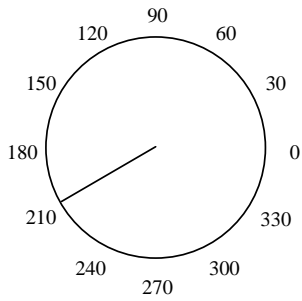
$$t := 0\ \text{s}, 0.0001\ \text{s} \dots 0.06\ \text{s} \quad t_{mR} := \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \text{sgn}(\pi - \alpha_R) + \alpha_R}{\omega} \quad i_{yR} := I_m \cdot \left(\text{sgn}(\pi - \alpha_R) + \sin(\alpha_R) \cdot e^{-\frac{t_{mR}}{\tau_L}} \right)$$



$$\alpha_S := \alpha_R + 2 \cdot \frac{\pi}{3}$$

$$i_S(t) := I_m \cdot \left(\sin(\omega \cdot t - \alpha_S) + \sin(\alpha_S) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right) \quad i_{SL}(t) := I_m \cdot \sin(\alpha_S) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad i_{SF}(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha_S)$$

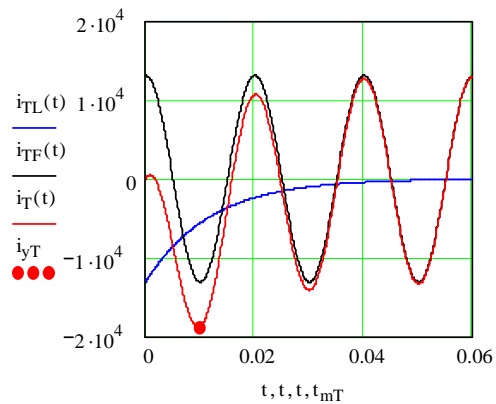
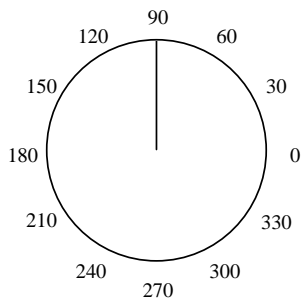
$$t_{mS} := \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \text{sgn}(\pi - \alpha_S) + \alpha_S}{\omega} \quad i_{yS} := I_m \cdot \left(\text{sgn}(\pi - \alpha_S) + \sin(\alpha_S) \cdot e^{-\frac{t_{mS}}{\tau_L}} \right)$$

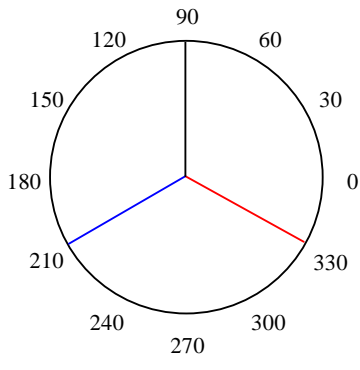


$$\alpha_T := \alpha_R + 4 \cdot \frac{\pi}{3}$$

$$i_T(t) := I_m \cdot \left(\sin(\omega \cdot t - \alpha_T) + \sin(\alpha_T) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right) \quad i_{TL}(t) := I_m \cdot \sin(\alpha_T) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad i_{TF}(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha_T)$$

$$t_{mT} := \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \text{sgn}(\pi - \alpha_T) + \alpha_T}{\omega} \quad i_{yT} := I_m \cdot \left(\text{sgn}(\pi - \alpha_T) + \sin(\alpha_T) \cdot e^{-\frac{t_{mT}}{\tau_L}} \right)$$

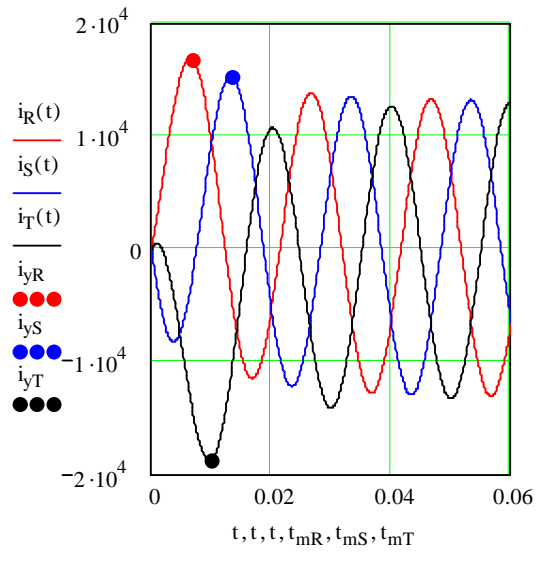




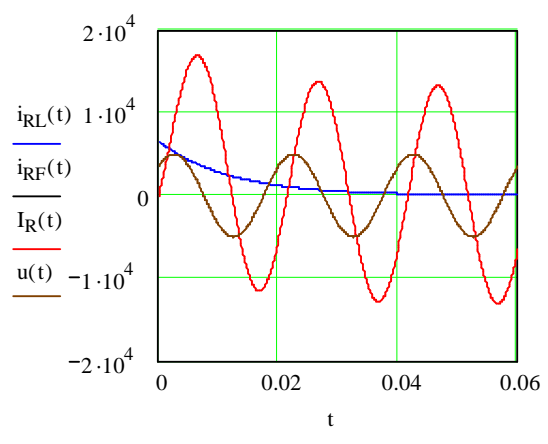
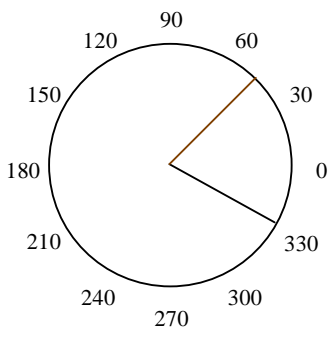
$$I_m := 13.1 \cdot 10^3$$

$$U_m := 5000$$

$$u(t) := U_m \cdot \sin(\omega t - \psi_R)$$



$$I_R(t) := \text{if}(t < 0, 0, i_R(t))$$



Deconectarea scurtcircuitului

Tensiunea tranzitorie de restabilire - formă generală

$$U := 1000 \text{ V} \quad R := 15 \cdot \Omega \quad L := 300 \text{ mH} \quad C := 1 \cdot \mu\text{F} \quad \Psi := -90 \text{ deg}$$

$$\phi_{sc} := \text{atan}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

$$I_{sc} := \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}$$

$$\phi_1 := -\text{atan}\left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right)$$

$$I_1 := \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$$

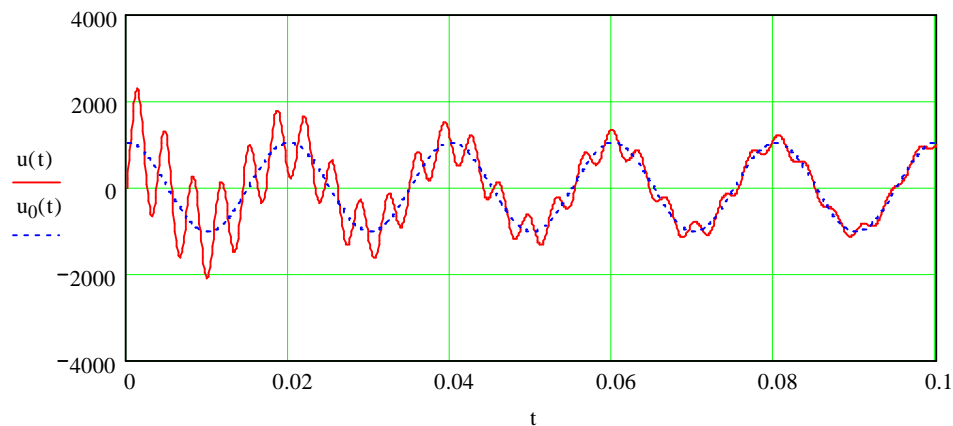
$$\delta := \frac{R}{2 \cdot L} \quad \omega_0 := \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \omega_1 := \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad \alpha_{sc} := \Psi + \phi_{sc} \quad \alpha_1 := \Psi + \phi_1$$

$$\theta_1 := \text{atan}\left[\frac{\omega}{\omega_1} \cdot \left(\tan(\alpha_1) - \frac{I_{sc}}{I_1} \cdot \frac{\sin(\alpha_{sc})}{\cos(\alpha_1)}\right) + \frac{\delta}{\omega_1}\right] \quad U_1 := \frac{I_1}{\omega \cdot C}$$

$$u(t) := U_1 \cdot \left(-\cos(\omega \cdot t - \alpha_1) + e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \frac{\cos(\omega_1 \cdot t - \theta_1)}{\cos(\theta_1)}\right)$$

$$u_0(t) := U_1 \cdot (-\cos(\omega \cdot t - \alpha_1))$$

$$u_L(t) := U_1 \cdot \left(e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \frac{\cos(\omega_1 \cdot t - \theta_1)}{\cos(\theta_1)}\right) \quad t := 0 \cdot \text{s}, 0.0001 \text{ s} .. 0.1 \cdot \text{s}$$



Tensiunea tranzitorie de restabilire – forma simplificată

$$U_r := 380 \text{ V} \quad R := 400 \Omega \quad X := 30 \Omega \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad L := \frac{X}{\omega} \quad L = 95.493 \text{ mH} \quad C := 20000 \text{ pF}$$

$$\delta := \frac{R}{2 \cdot L} \quad \omega_0 := \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \omega_1 := \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad U_{rm} := U_r \cdot \sqrt{2}$$

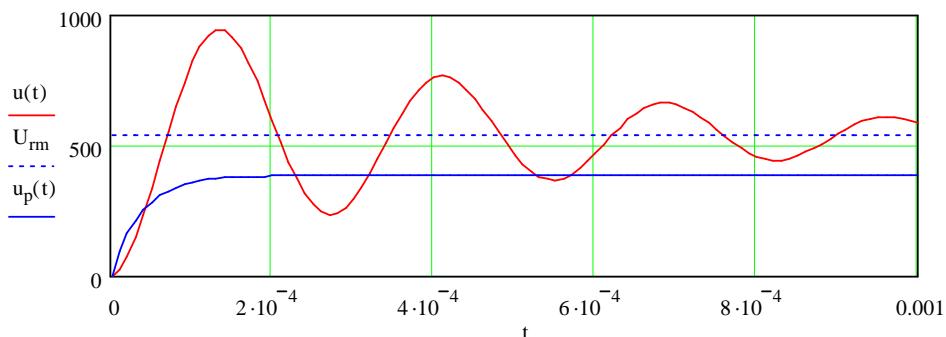
$$r := 1000 \Omega \quad \delta_p := \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{r \cdot C} \right) \quad \omega_{0p} := \sqrt{\frac{R+r}{r \cdot L \cdot C}} \quad \omega_{1p} := \sqrt{\omega_{0p}^2 - \delta_p^2}$$

$$R_{cr} := 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad R_{cr} = 4.37019 \times 10^3 \Omega$$

$$u(t) := U_{rm} \cdot \left(1 - e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) \right)$$

$$u_p(t) := \frac{U_{rm}}{1 + \frac{R}{r}} \cdot \left(1 - e^{-\delta_p \cdot t} \cdot \cos(\omega_{1p} \cdot t) \right)$$

$$t := 0 \text{ s}, 0.00001 \text{ s}.. 0.001 \text{ s}$$



2. Chestiuni de studiat

Se vor implementa în programul MATHCAD expresiile tensiunilor și curenților corespunzătoare diverselor regimuri tranzitorii prezentate la punctele 1.1.1 – 1.1.4, 1.2.1 – 1.2.2.

3. Întrebări

- Ce ipoteze simplificatoare se fac în tratarea proceselor tranzitorii studiate în această lucrare?
- Ce se înțelege prin tensiune tranzitorie de restabilire (TTR)?
- Care sunt parametrii TTR?
- Ce este rezistența critică de șuntare?
- De ce scurtcircuitul într-o rețea electrică poate fi asimilat cu o conectare?
- Ce este curentul de șoc și care este expresia acestuia?