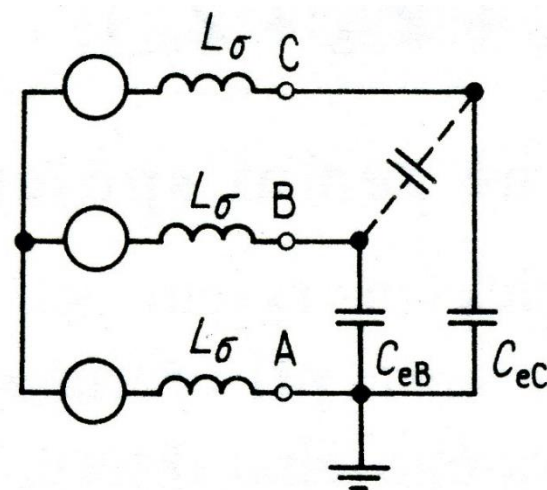
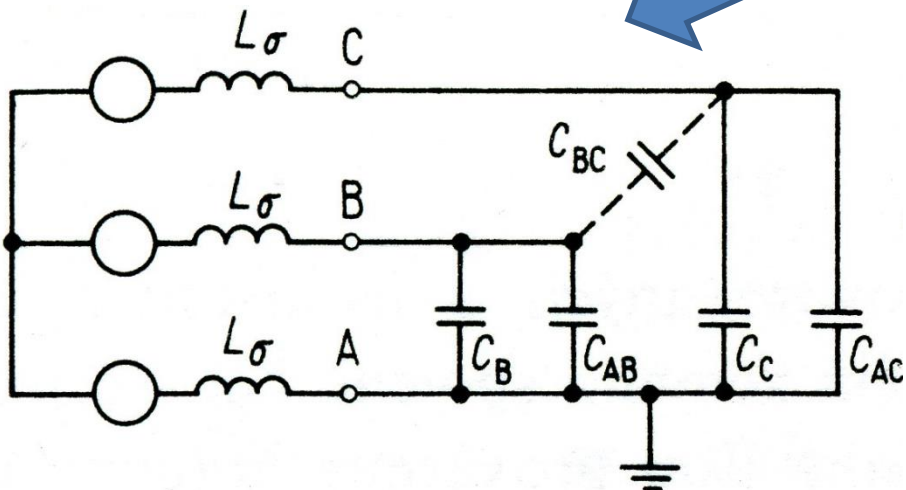
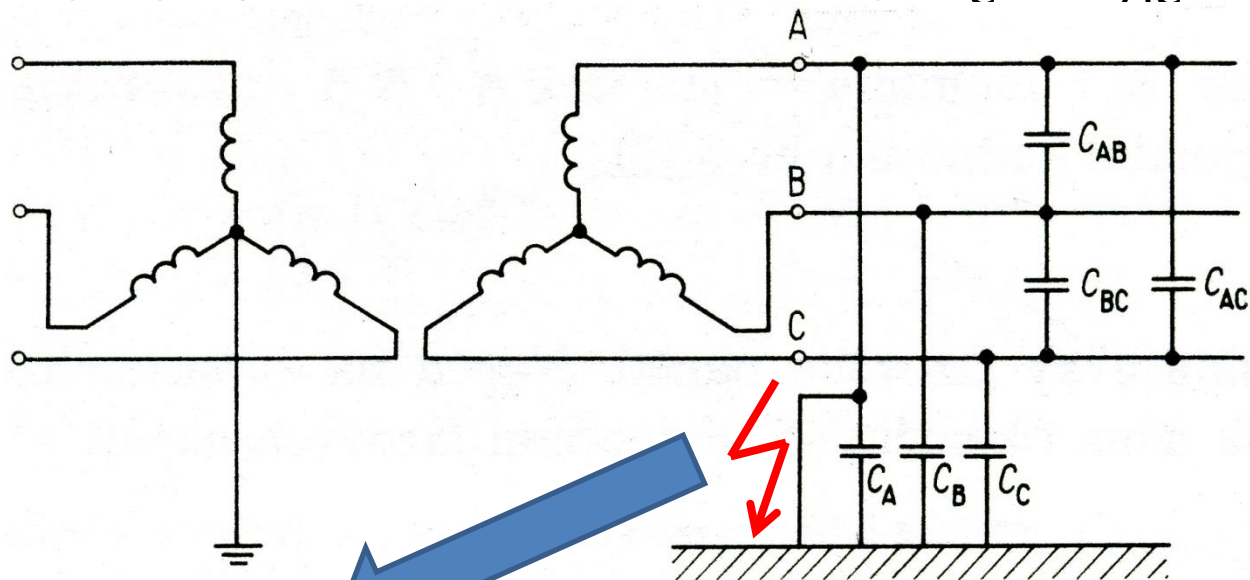
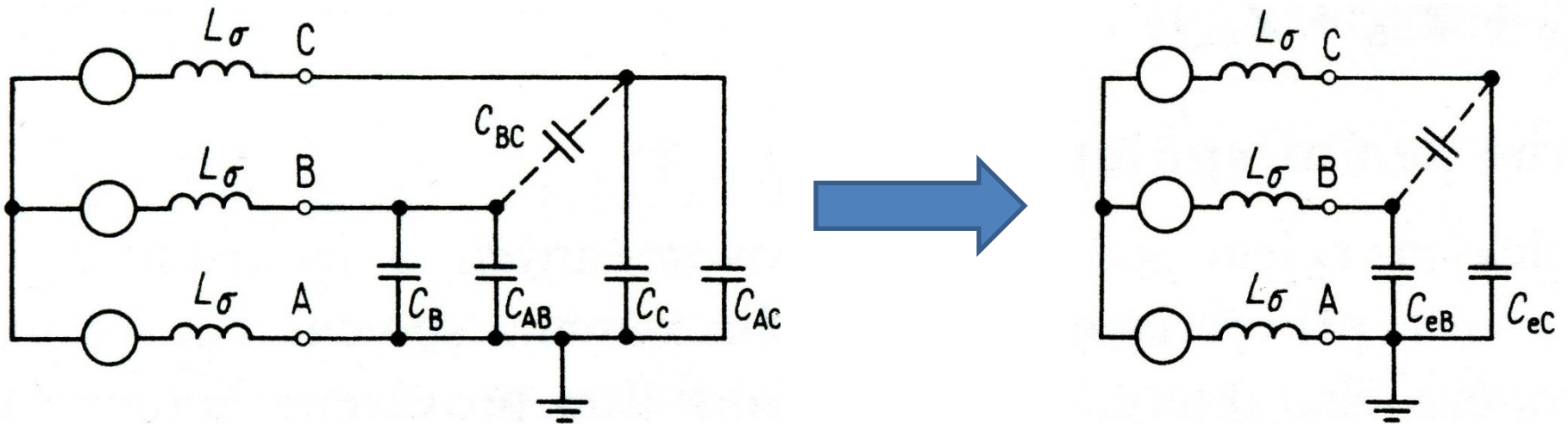


Přerušované zemní spojení v síti
s izolovaným nulovým bodem

Po vzniku zemního spojení ve fázi „A“ jsou kapacity C_B a C_{AB} spojeny paralelně, podobně kapacity spojené s fází „C“, tedy C_C a C_{AC} .

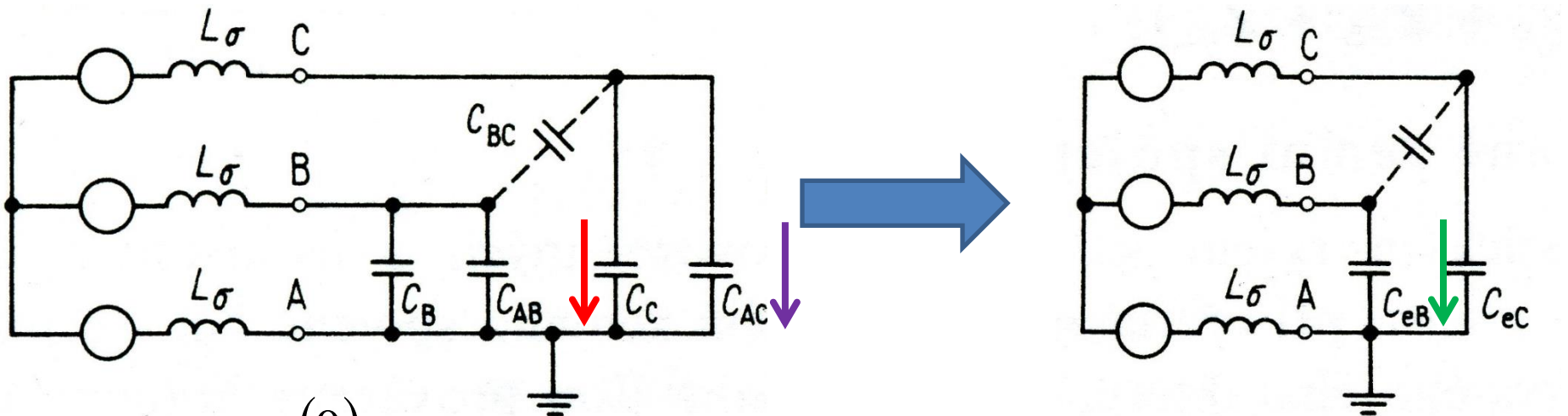


Po vzniku zemního spojení ve fázi „A“ jsou kapacity C_B a C_{AB} spojeny paralelně, podobně kapacity spojené s fází „C“, tedy C_C a C_{AC} .



$$C_{ekv} = C_{eB} = C_B + C_{AB} = C_{eC} = C_C + C_{AC}$$

Pokud došlo k zemnímu spojení v okamžiku maximální okamžité hodnoty fáze „A“, potom:

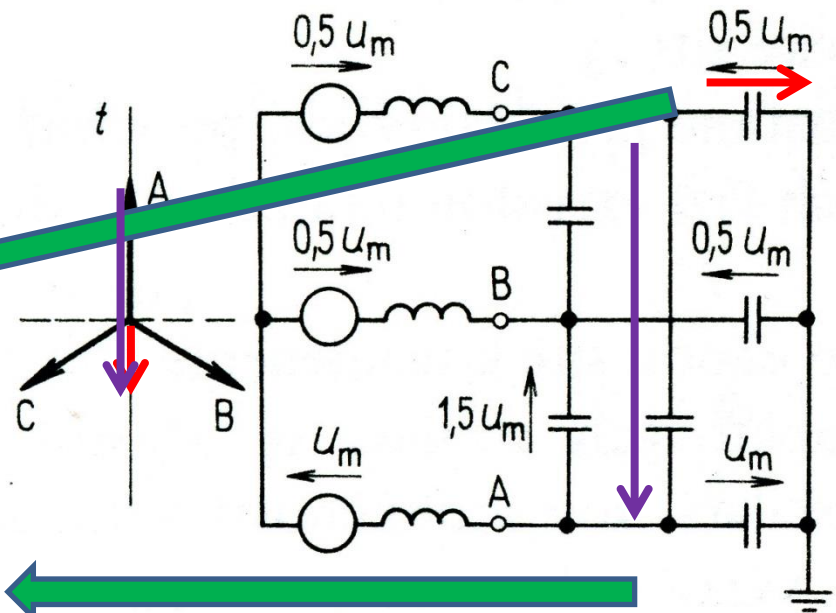


$$u_A(0) = u_m$$

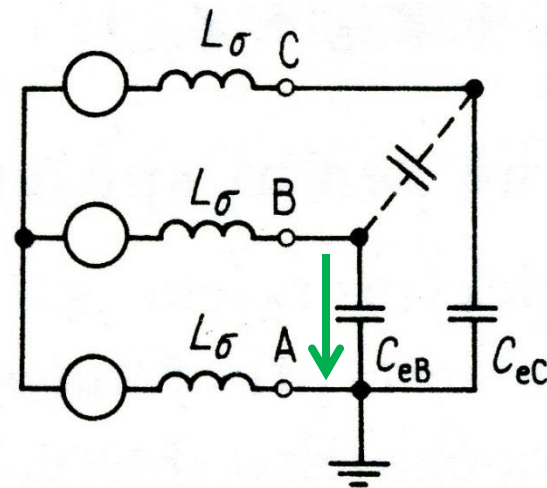
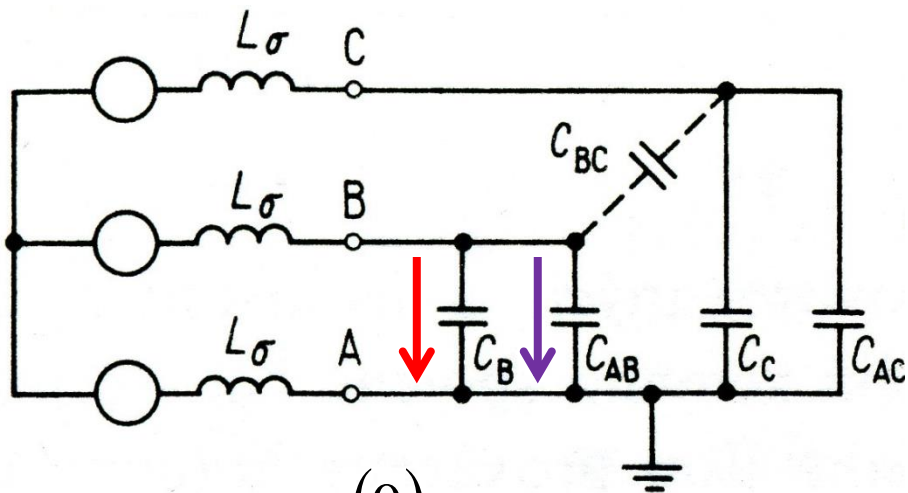
$$u_B(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_C(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_{BA}(0) = u_{CA}(0) = -\frac{u_m}{2} - u_m = -1.5u_m$$



Pokud došlo k zemnímu spojení v okamžiku maximální okamžité hodnoty fáze „A“, potom:

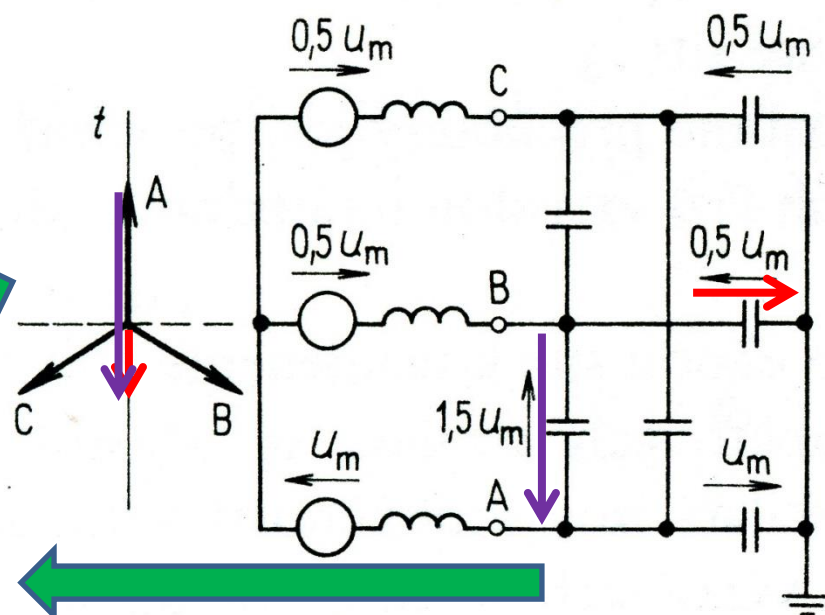


$$u_A(0) = u_m$$

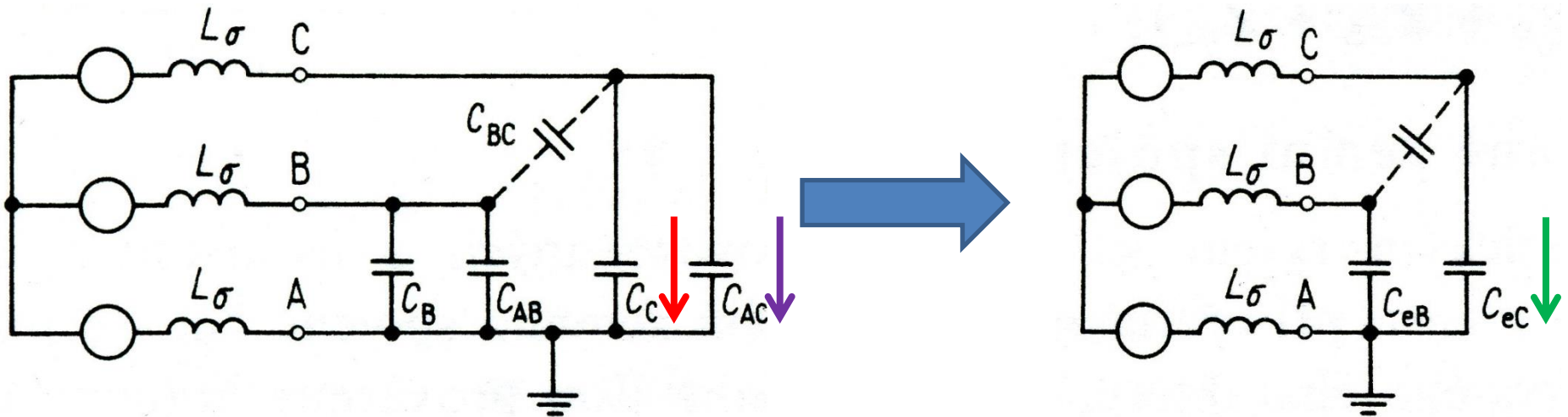
$$u_B(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_C(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_{BA}(0) = u_{CA}(0) = -\frac{u_m}{2} - u_m = -1.5u_m$$



Po paralelním spojení kapacit je výsledné napětí dáno celkovým nábojem původních kapacit vztaheným na kapacitu ekvivalentní:

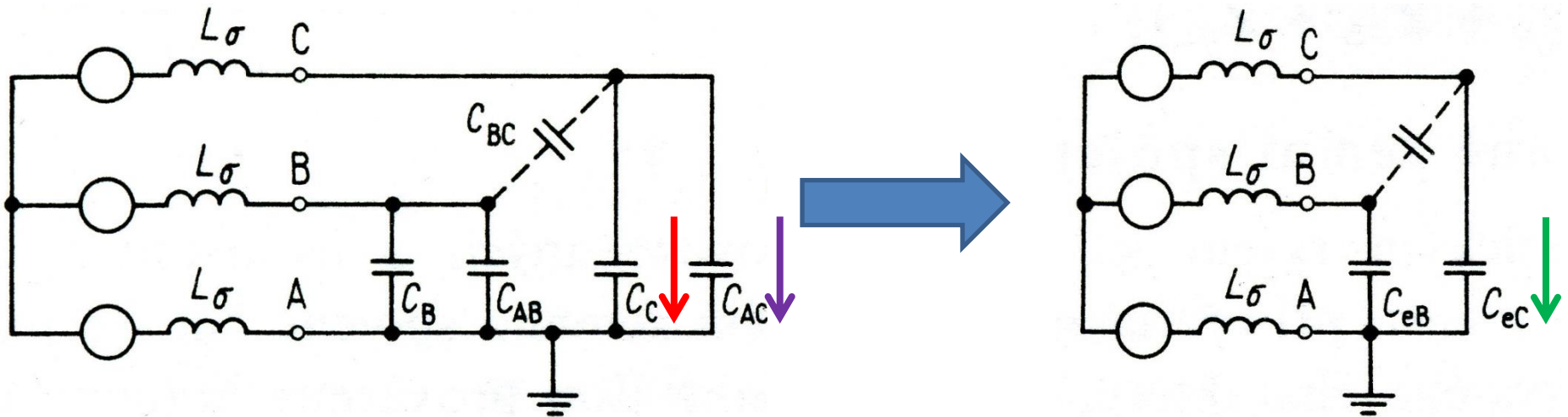


$$u_C(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_{CA}(0) = -1.5u_m$$

$$u_{ekvC}(0) = \frac{Q_{ekv}}{C_{ekv}} = \frac{Q_C(0) + Q_{AC}(0)}{C_C + C_{AC}} = \frac{-0.5u_m C_C - 1.5u_m C_{AC}}{C_C + C_{AC}} = -\frac{C_C + 3C_{AC}}{2(C_C + C_{AC})} u_m$$

Po paralelním spojení kapacit je výsledné napětí dáno celkovým nábojem původních kapacit vztaženým na kapacitu ekvivalentní:



$$u_C(0) = -\frac{u_m}{2}$$

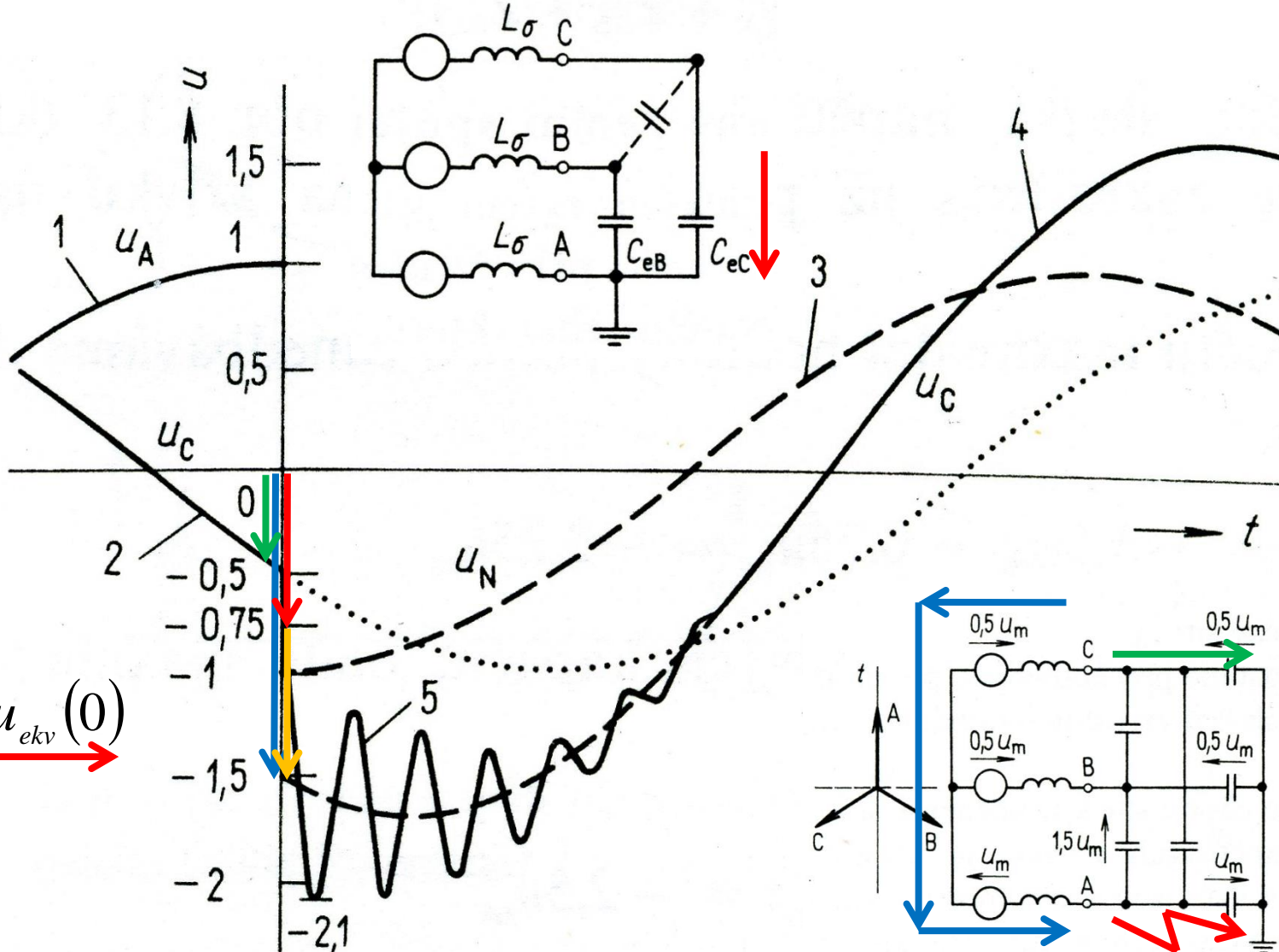
$$u_{CA}(0) = -1.5u_m$$

Poměr C_B/C_{AB} resp. C_C/C_{AC} bývá mezi 3 a 4.

Pokud zvolíme obvyklou hodnotu 3:

$$u_{ekvC}(0) = -\frac{C_C + 3C_{AC}}{2(C_C + C_{AC})} u_m = -\frac{3C_{AC} + 3C_{AC}}{2(3C_{AC} + C_{AC})} u_m = -\frac{3+3}{2(3+1)} u_m = -0.75u_m$$

Napětí, které je ale na C_{ekv} přikládáno $u_{CA}(0)=-1.5$ je v okamžiku vzniku zemního spojení větší, dojde tedy k přechodnému přebíjecímu ději s odpovídající odchylkou:



$$u_v(0) = u_u(0) - u_{ekv}(0)$$

→ → →

Velikost počáteční amplitudy přechodné „volné“ složky je dána rozdílem původní a nové hodnoty napětí, tedy:

$$u_V(0) = u_u(0) - u_{ekv}(0) = -1.5u_m - (-0.75u_m) = -0.75u_m$$

Maximální hodnota okamžité hodnoty napětí je tedy:

$$u_{MAX} = u_u(0) + 0.8 \cdot u_V(0) = -1.5u_m + 0.8 \cdot (-0.75u_m) \approx -2.1u_m$$

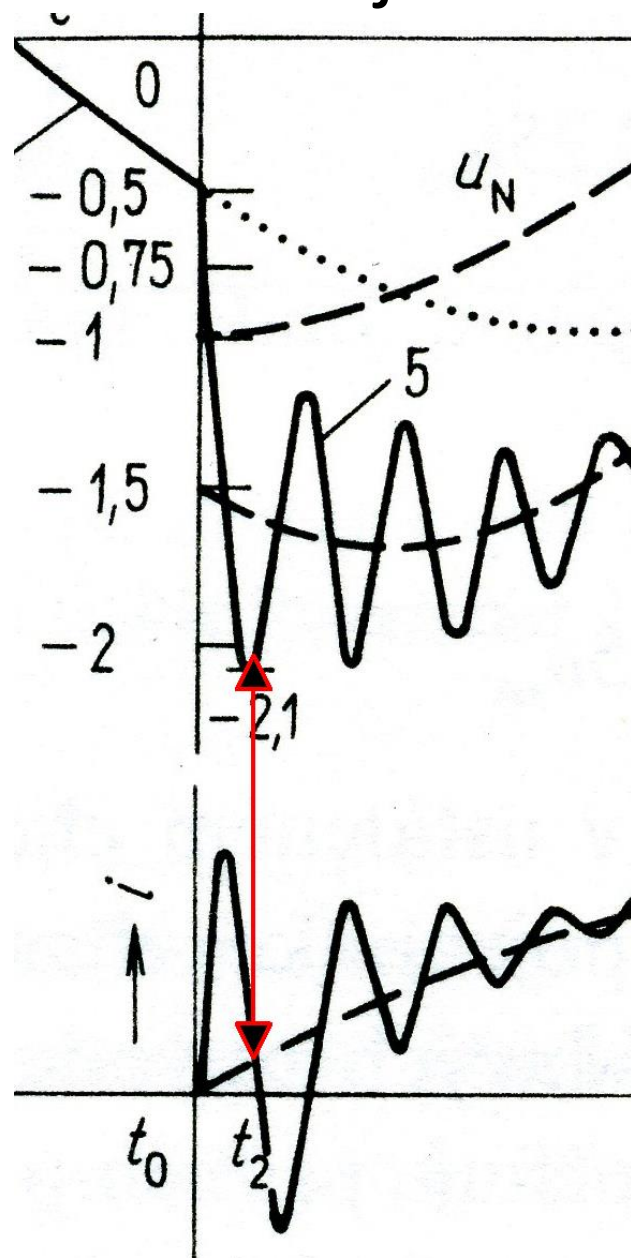
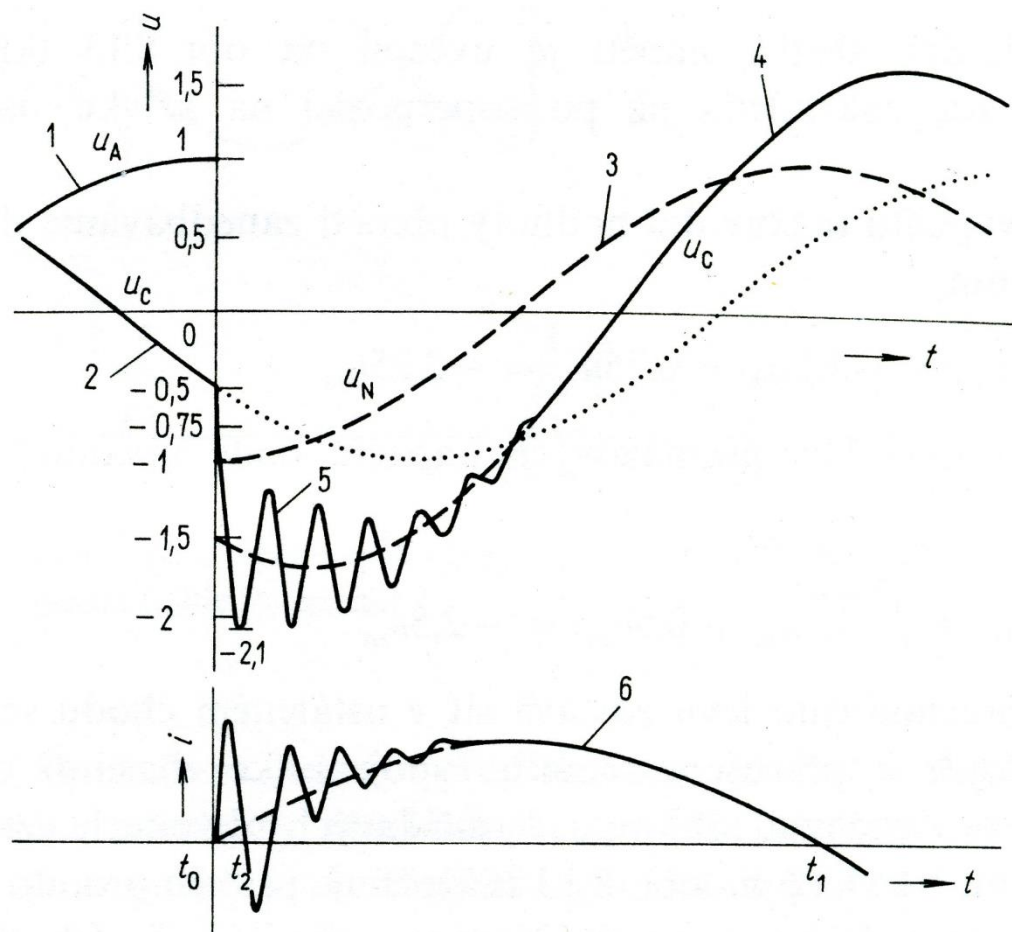
Pokud bychom zanedbali tlumení přechodné složky, potom:

$$u_{MAX} = u_u(0) + u_V(0) = -1.5u_m + (-0.75u_m) \approx -2.25u_m$$

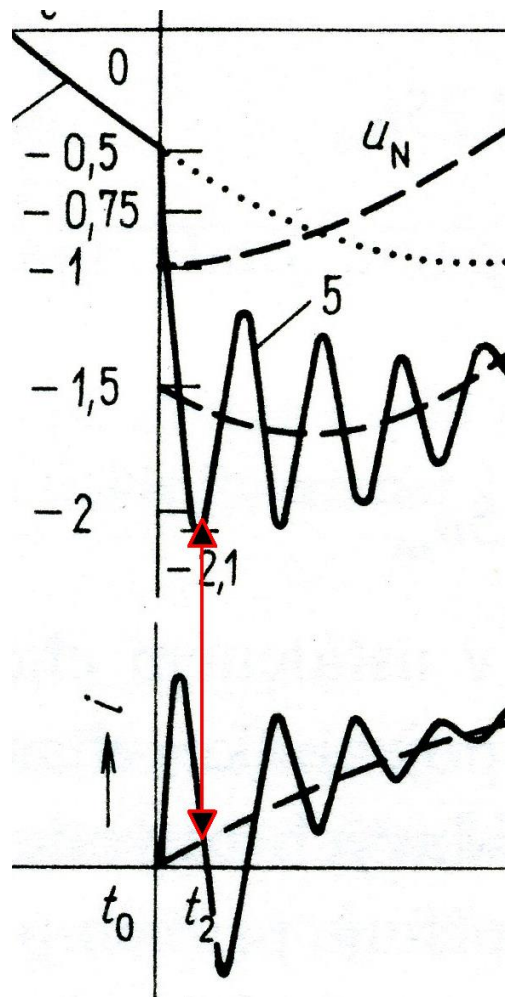
Pokud bychom neuvažovali ani vliv paralelního připojení mezifázových kapacit:

$$\begin{aligned} u_{MAX} &= u_u(0) + (u_u(0) - u(0)) = \\ &= -1.5u_m + (-1.5u_m - (-0.5u_m)) \approx -2.5u_m \end{aligned}$$

Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2 dle teorie Petersena:



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2 dle teorie Petersena:



V čase t_2 má fázové napětí velikost:

$$u_{MAX} = u_u(0) + 0.8 \cdot u_V(0) \approx -2.1u_m$$

Po přerušení zemního spojení zůstane na kapacitách zdravých fází náboj (platí pro fázi B i C):

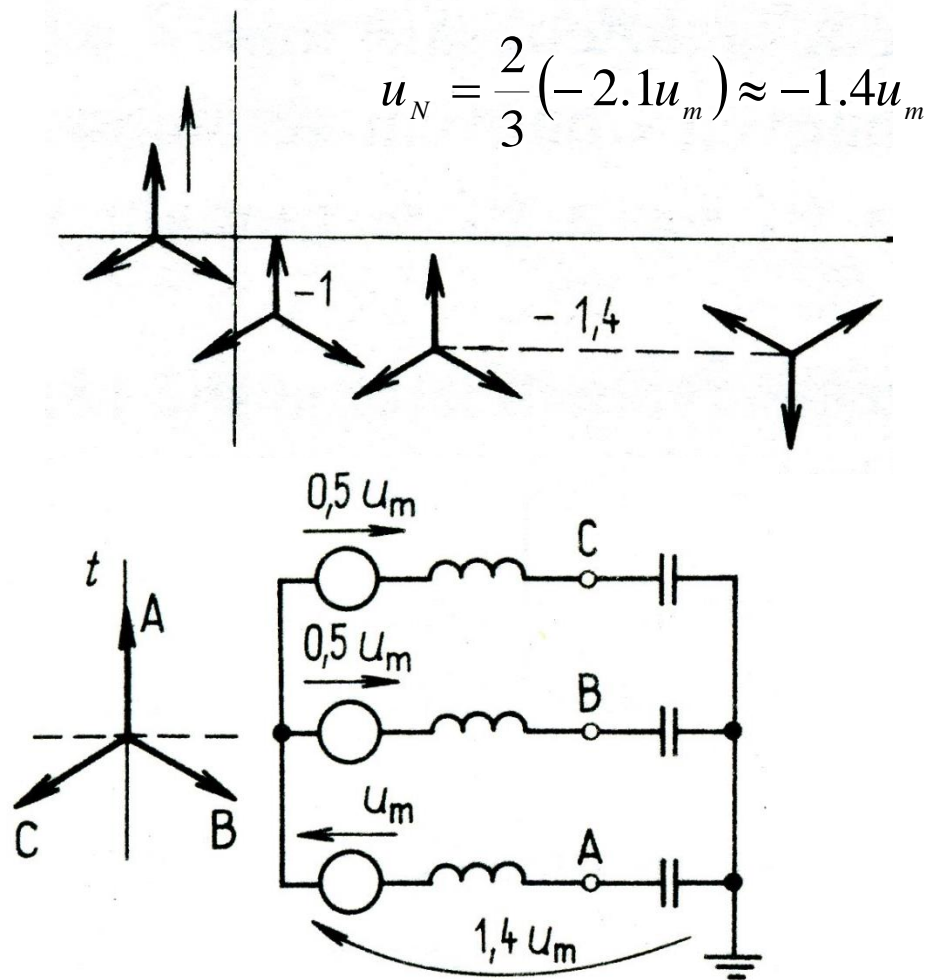
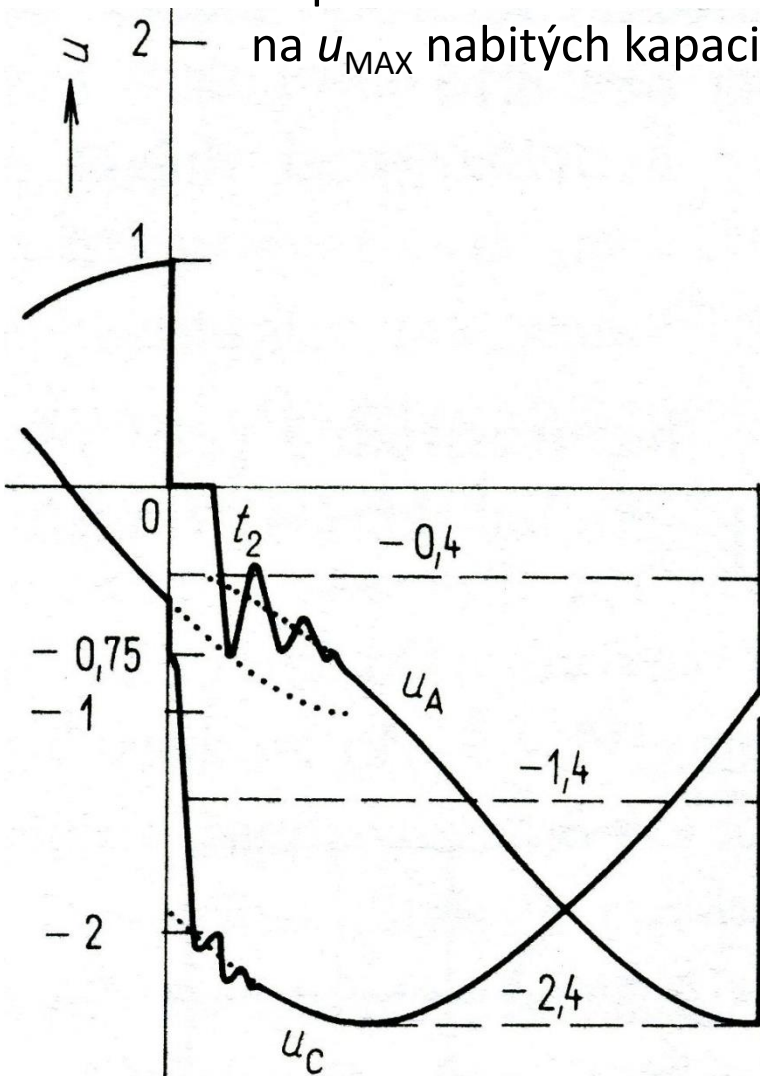
$$Q_C = Q_B = C \cdot u_{MAX} \quad Q_A = C \cdot u_A = C \cdot 0 = 0$$

Součtový dvojnásobný náboj se rozdělí rovnoměrně na kapacity všech tří fází, tedy uzel transformátoru bude mít nové napětí:

$$u_N = \frac{Q_A + Q_B + Q_C}{C + C + C} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2Q_C}{C} = \frac{2}{3} u_{MAX} = \frac{2}{3} (-2.1u_m) \approx -1.4u_m$$

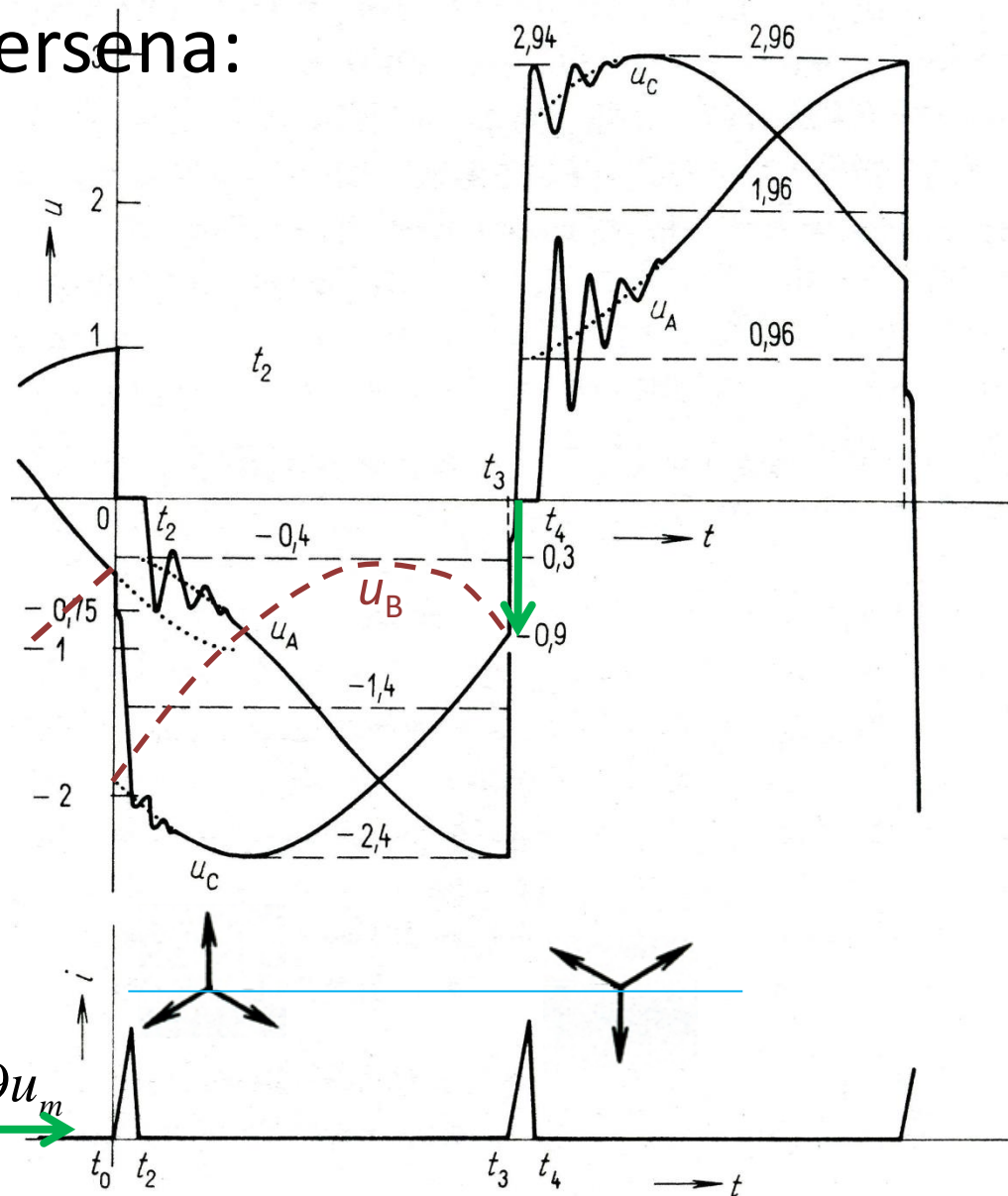
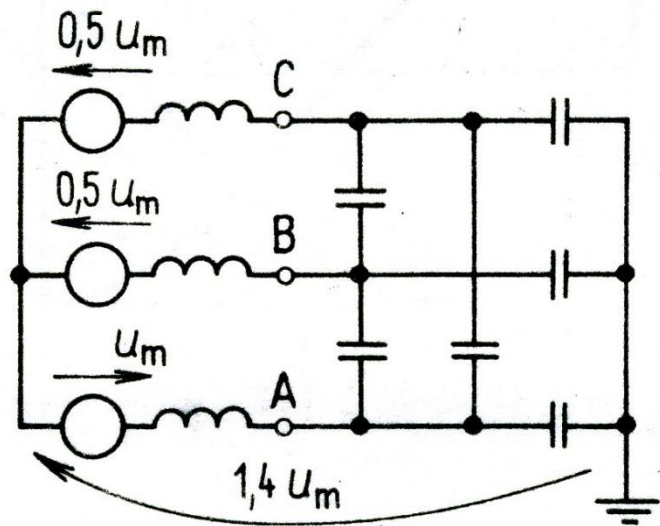
Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2 dle teorie Petersena:

Napětí nulového bodu uzlu transformátoru (rozdělení náboje dvou na u_{MAX} nabitých kapacit C na tři fáze):



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2, t_4, \dots dle teorie Petersena:

Další možný průraz je pravděpodobný v čase t_3 , kdy je velikost okamžitého napětí fáze A největší:



$$u_A(t_3) = -u_m - 1.4u_m = -2.4u_m$$

$$u_B(t_3) = u_C(t_3) = 0.5u_m - 1.4u_m = -0.9u_m$$

$$u_{BA}(t_3) = u_{CA}(t_3) = 0.5u_m + u_m = 1.5u_m$$

Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2, t_4, \dots dle teorie Petersena:

$$u_{ekvB}(t_3) = u_{ekvC}(t_2) = \frac{-0.9u_m C_B + 1.5u_m C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \approx \frac{-0.9 \cdot 3 + 1.5}{3 + 1} u_m = -0.3u_m \quad \rightarrow$$

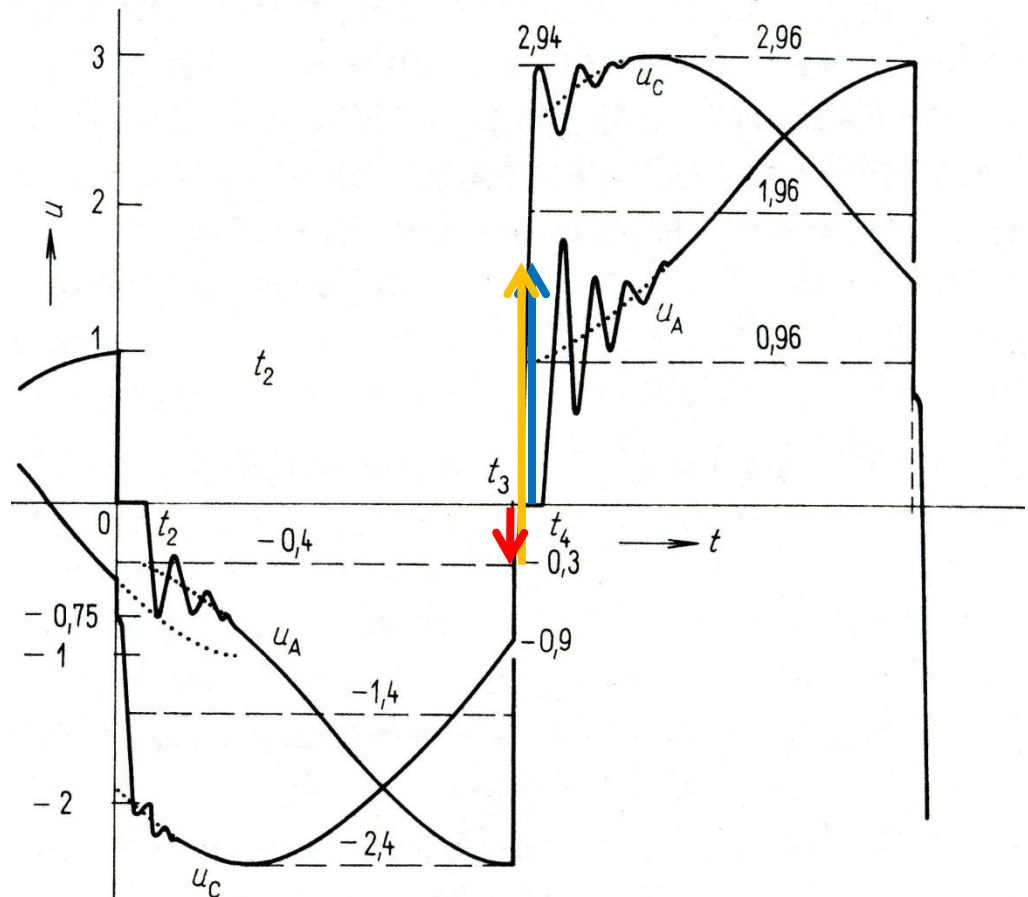
je napětí na ekvivalentní kapacitě.

Okamžitá hodnota nového ustáleného stavu je (jako vždy až na znaménko):

$$u_u(t_3) = 1.5u_m \quad \rightarrow$$

tedy velikost volného přechodného napětí je:

$$u_V(t_3) = u_u(t_3) - u_{ekv}(t_3) = 1.5u_m - (-0.3u_m) = 1.8u_m \quad \rightarrow$$

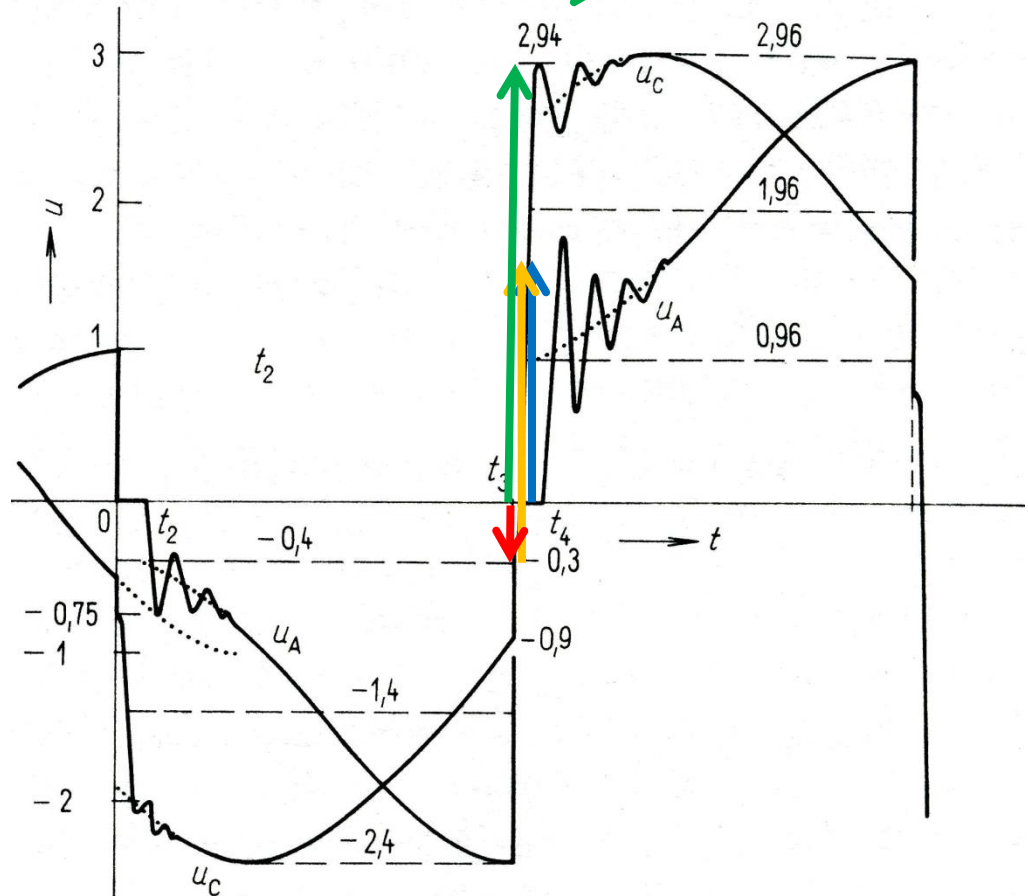


Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_2, t_4, \dots dle teorie Petersena:

Maximální okamžitá hodnota napětí vzniklého přechodného děje:

$$u_{MAX} = u_u(t_3) + 0.8 \cdot u_V(t_3) = 1.5u_m + 0.8 \cdot (1.8u_m) \approx 2.94u_m$$

$$u_{ekvC}(t_3) = -0.3u_m$$



Zobecnění vztahů pro přerušované zemní spojení

Napětí nulového bodu uzlu transformátoru (rozdělení náboje dvou na u_{MAX} nabitých kapacit na tři fáze):

$$u_N(t_{ZS} -) = \frac{1}{3} \cdot \frac{2Q_C}{C} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2(C \cdot u_{MAX})}{C} = \frac{2}{3} u_{MAX} \quad (K)$$

Napětí na fázích a mezifázové těsně pře vznikem zemního spojení určeno napětími zdroje:

$$u_B(t_{ZS} -) = u_C(t_{ZS} -) = u_N(t_{ZS} -) \pm 0.5u_m \qquad u_{BA}(t_{ZS} -) = u_{CA}(t_{ZS} -) = \pm 1.5u_m$$

Ekvivalentní napětí na paralelně spojených kapacitách:

$$u_{ekvB}(t_{ZS} -) = u_{ekvC}(t_{ZS} -) = \frac{u_B(t_{ZS} -) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS} -) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}}$$

Zobecnění vztahů pro přerušované zemní spojení

Okamžitá hodnota nového ustáleného stavu $u_u(t_{ZS})$ pro obě zdravé fáze a volná složka napětí $u_V(t_{ZS})$ jsou:

$$u_u(t_{ZS}) = \pm 1.5u_m$$

$$u_V(t_{ZS}) = u_u(t_{ZS}) - u_{ekv}(t_{ZS})$$

Nové maximální napětí potom:

$$u_{MAX}^{(K+1)} = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_{ZS})$$

Po dosažení:

$$\begin{aligned} u_{MAX}^{(K+1)} &= u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_{ZS}) = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot (u_u(t_{ZS}) - u_{ekv}(t_{ZS})) \\ &= u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot \left(u_u(t_{ZS}) - \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \right) = \end{aligned}$$

Zobecnění vztahů pro přerušované zemní spojení

Po dosazení:

$$\begin{aligned} u_{MAX}^{(K+1)} &= u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_{ZS}) = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot (u_u(t_{ZS}) - u_{ekv}(t_{ZS})) \\ &= u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot \left(u_u(t_{ZS}) - \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \right) = \end{aligned}$$

$$\pm 1.5u_m + K_{TLUM} \cdot \left(\pm 1.5u_m - \frac{\left(\frac{2}{3}u_{MAX}^{(K)} \pm 0.5u_m \right) \cdot C_B \pm 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \right) =$$

$$u_{MAX}^{(K+1)} = \pm \left(1.5 + \frac{K_{TLUM} \cdot C_B}{C_B + C_{AB}} \right) u_m - \frac{2K_{TLUM} \cdot C_B}{3(C_B + C_{AB})} \cdot u_{MAX}^{(K)}$$

Zobecnění vztahů pro přerušované zemní spojení

Po zavedení:

$$q = \frac{K_{TLUM} \cdot C_B}{C_B + C_{AB}}$$

$$u_{MAX}^{(K+1)} = \pm \left(1.5 + \frac{K_{TLUM} \cdot C_B}{C_B + C_{AB}} \right) u_m - \frac{2K_{TLUM} \cdot C_B}{3(C_B + C_{AB})} \cdot u_{MAX}^{(K)}$$

$$u_{MAX}^{(K+1)} = \pm (1.5 + q) u_m - \frac{2}{3} q \cdot u_{MAX}^{(K)}$$

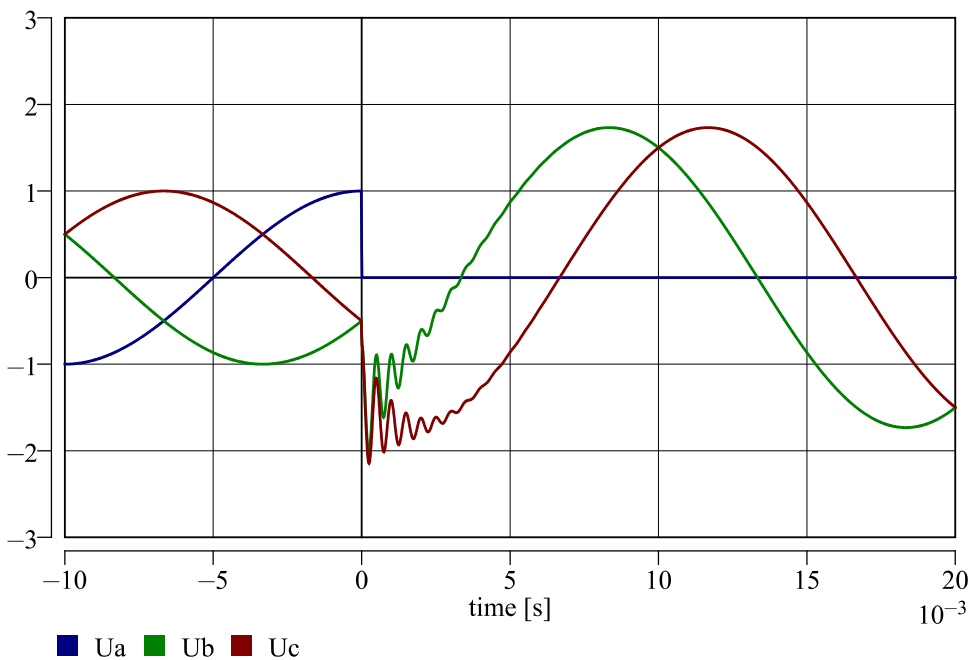
Po ustálení procesu navyšování přepětí budou $u_{MAX}^{(K+1)}$ a $u_{MAX}^{(K)}$ stejné, tedy:

$$u_{MAX}^{(N)} = (1.5 + q) u_m + \frac{2}{3} q \cdot u_{MAX}^{(N)} \qquad u_{MAX}^{(N)} = \frac{1.5 + q}{1 - \frac{2}{3} q} u_m$$

Po dosažení $K_{TLUM} = 0.8$, $C_B = 3C_{AB}$ je $q = 0.6$ a $u_{MAX}^{(N)} = 3.5u_m$.

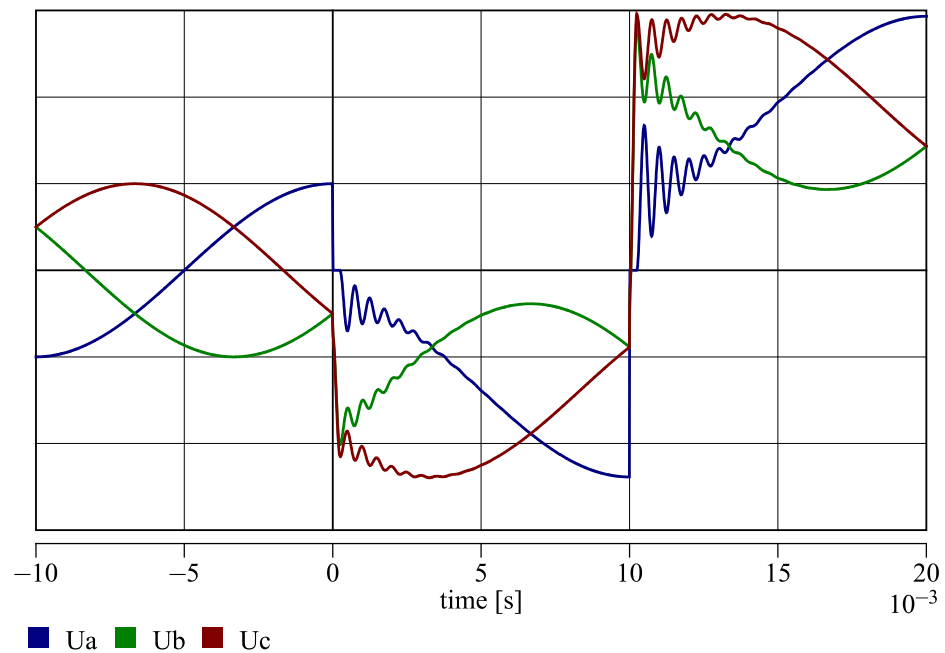
Při zanedbání mezifázových kapacit a tlumení přechodného proudu je $q = 1$ a $u_{MAX}^{(N)} = 7.5u_m$.

Porovnání velikosti přepětí při trvalém a přerušovaném zemní spojení



Trvalé zemní spojení:

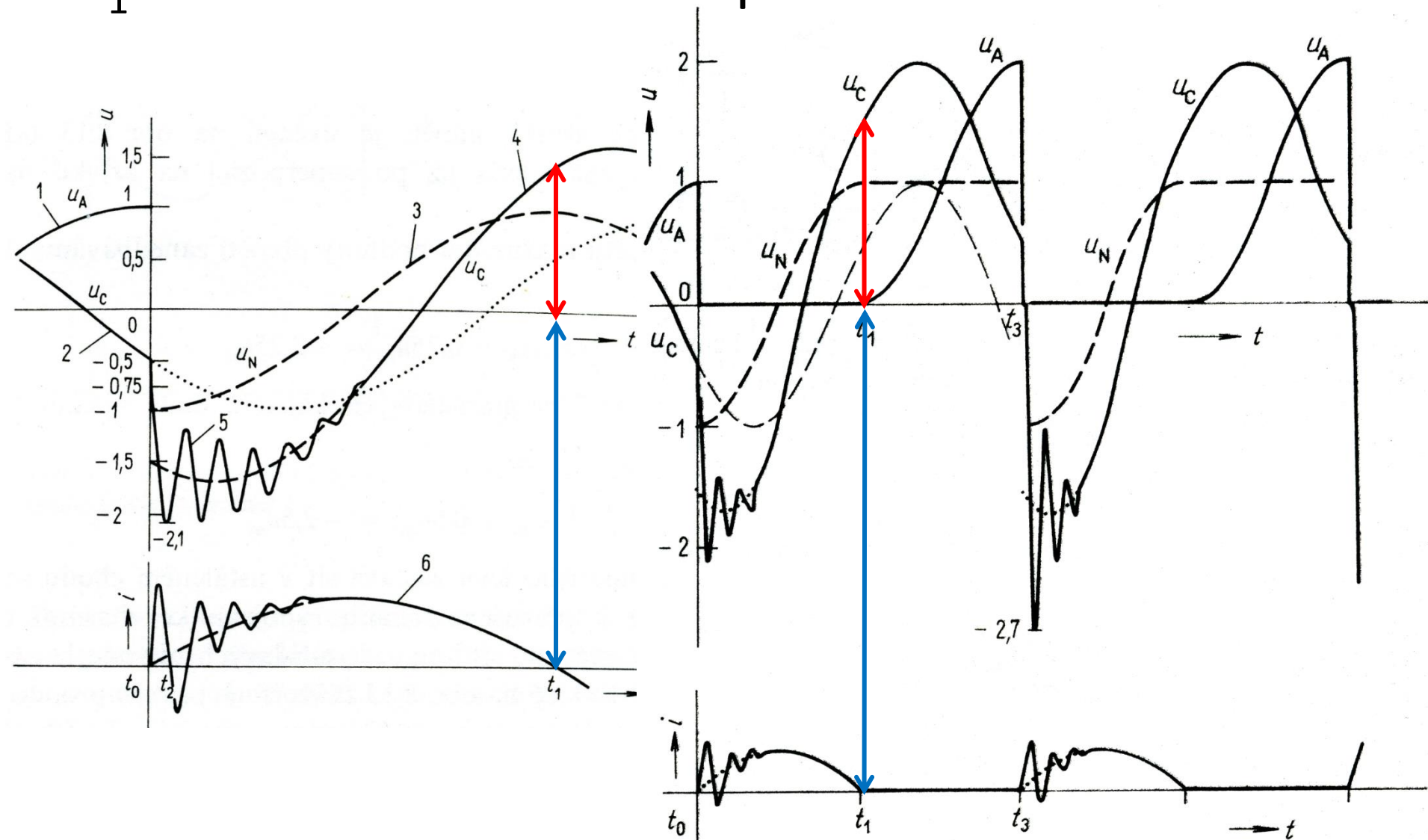
$$u_{MAX} = \sqrt{3} \cdot u_m$$



Přerušované zemní spojení:

$$u_{MAX}^N = 2.1, 2.94, \dots 3.5 u_m$$

Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:

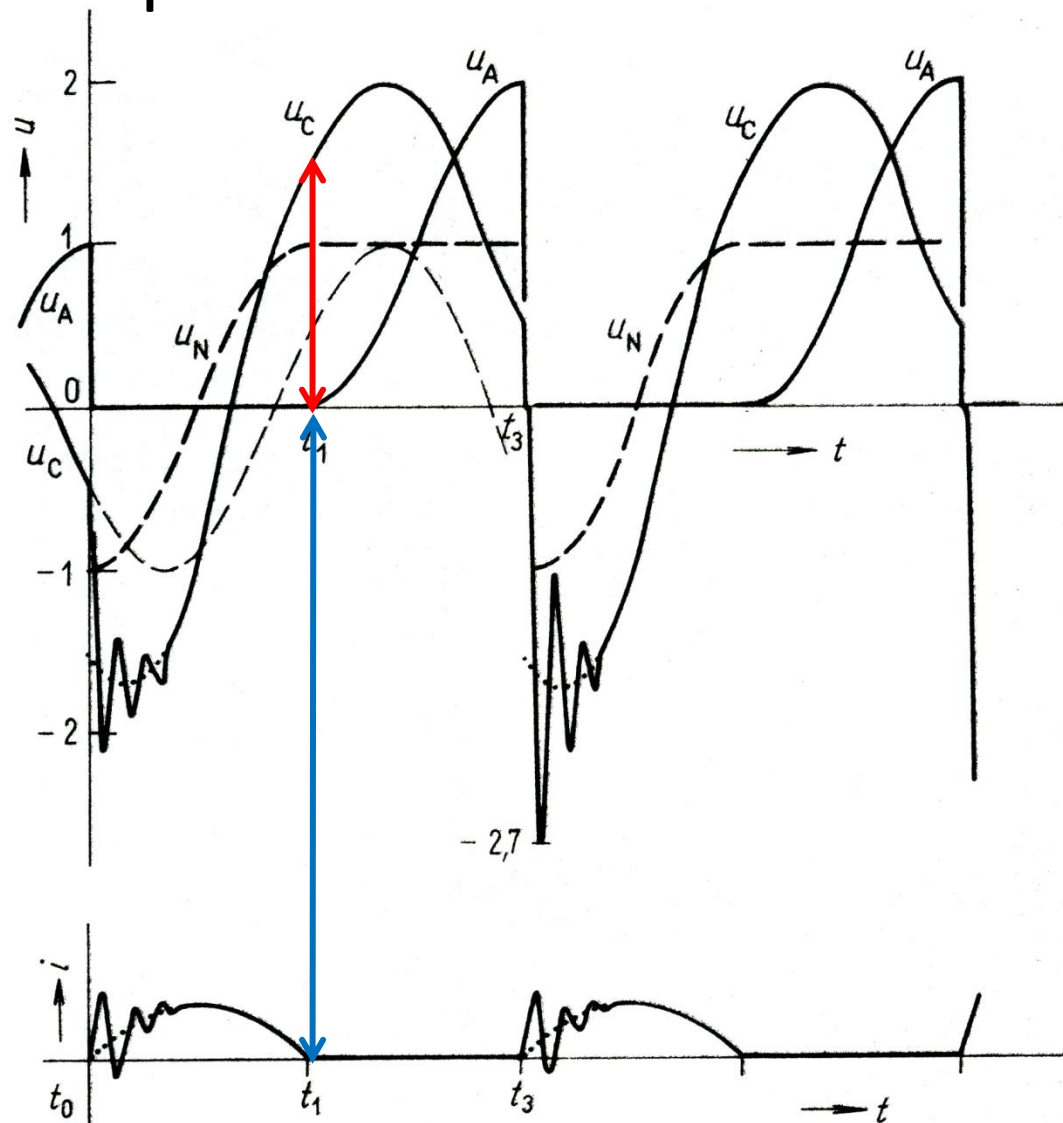
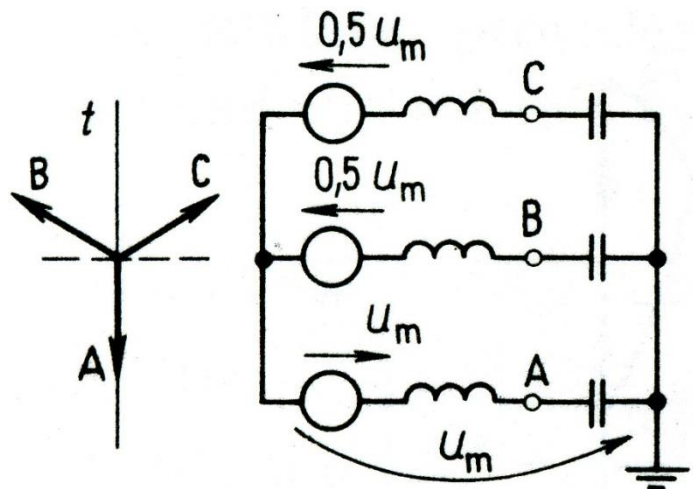
Zde platí stejná pravidla pro určení u_N , u_B a u_{BA} jako v předešlém případě:

$$u_N(t_1) = \frac{2}{3} u_{MAX}^{(K)} = \frac{2}{3} 1.5 u_m = u_m$$

$$u_A(t_1 -) = u_N(t_1) - u_m = 0$$

$$u_B(t_1 -) = u_C(t_1 -) = u_N(t_1) + 0.5 u_m = u_m + 0.5 u_m = 1.5 u_m$$

$$u_{BA}(t_1) = u_{CA}(t_1) = 1.5 u_m$$



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:

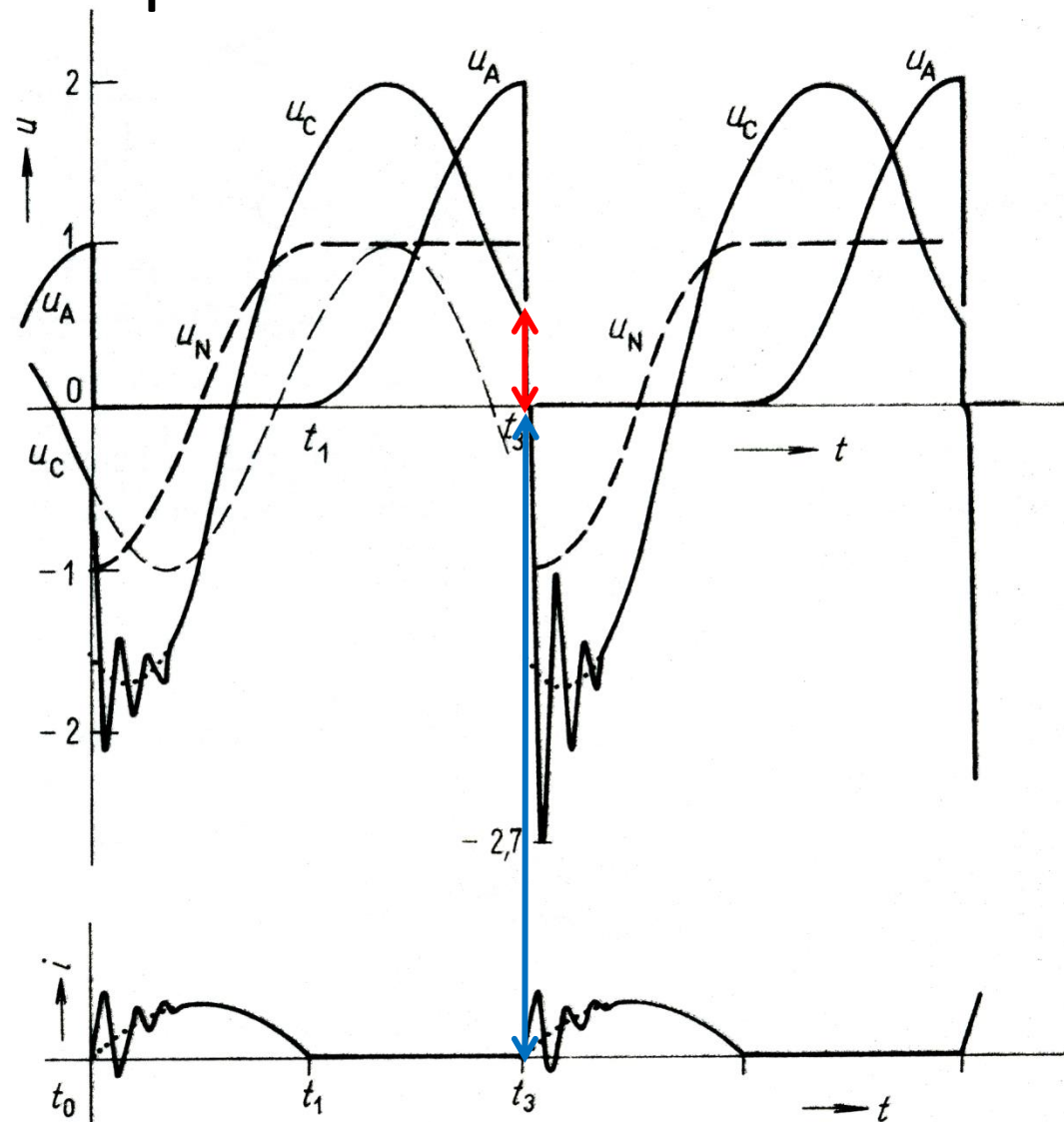
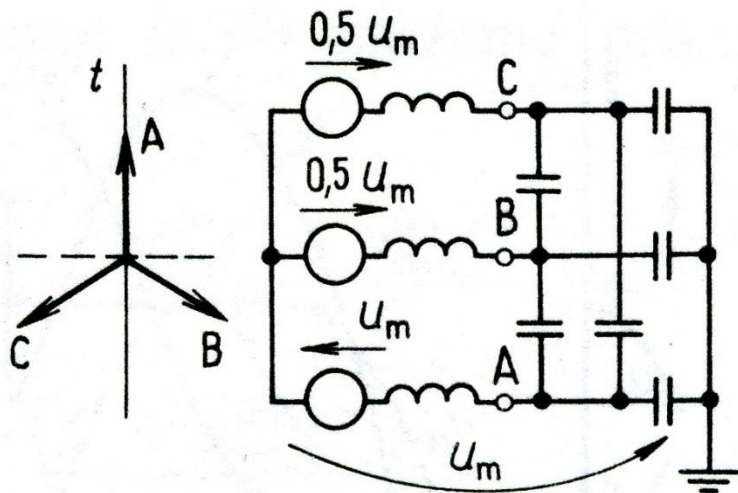
Zde platí stejná pravidla pro určení u_N , u_B a u_{BA} jako v předešlém případě:

$$u_N(t_3) \approx u_m$$

$$u_A(t_3 -) = u_N(t_3) + u_m = 2u_m$$

$$u_B(t_3 -) = u_C(t_3 -) = u_N(t_3) - 0.5u_m \\ = u_m - 0.5u_m = 0.5u_m$$

$$u_{BA}(t_3) = u_{CA}(t_3) = -1.5u_m$$



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:

$$u_B(t_3^-) = u_C(t_3^-) = u_N(t_3) - 0.5u_m$$

$$= u_m - 0.5u_m = 0.5u_m$$

$$u_{BA}(t_3) = u_{CA}(t_3) = -1.5u_m$$

$$u_{ekvB}(t_3) = \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}}$$

$$= \frac{0.5u_m \cdot C_B - 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}}$$

$$\approx \frac{0.5u_m \cdot 3 \cdot C_{AB} - 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = 0$$

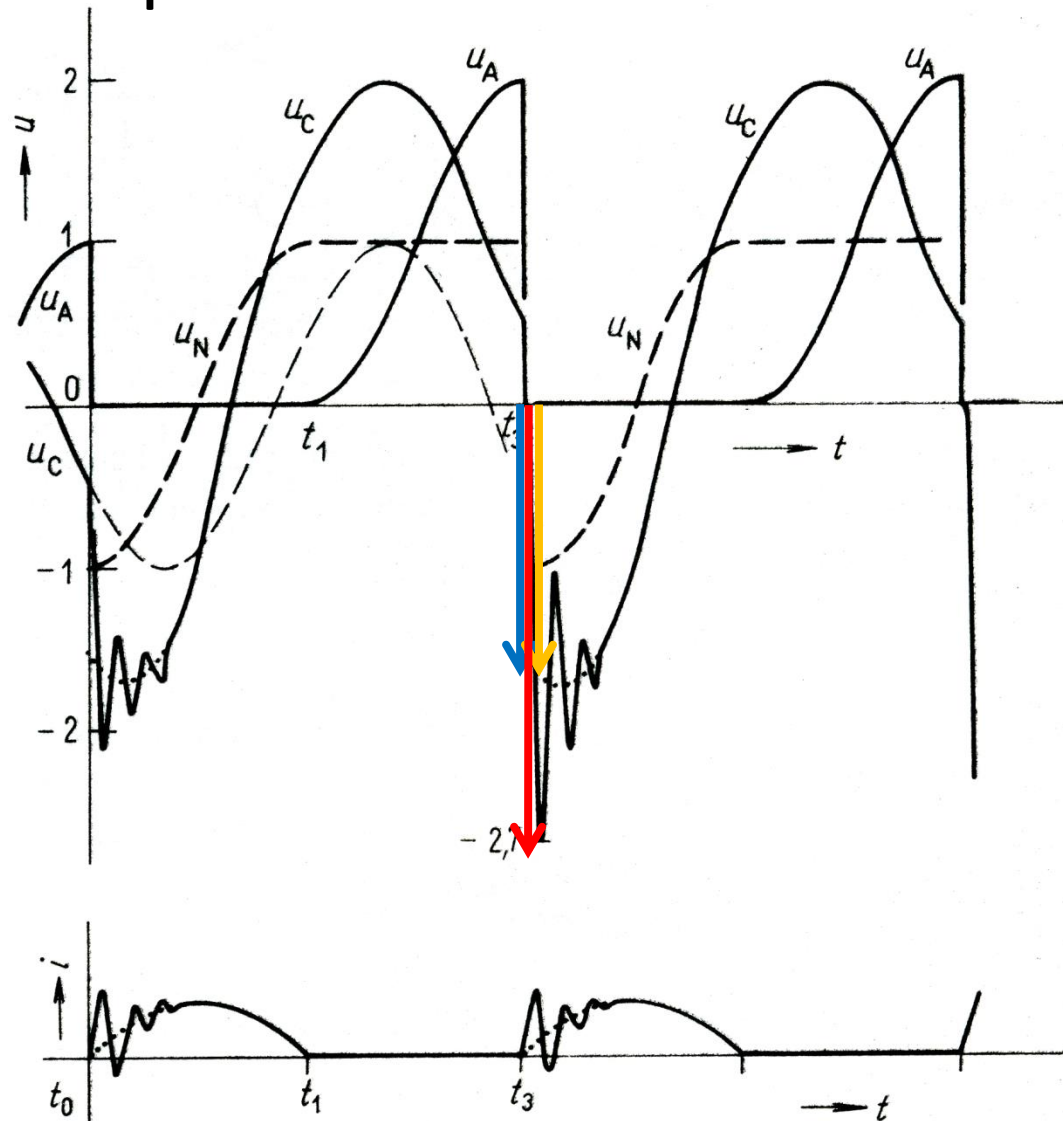
$$u_u(t_3) = \pm 1.5u_m = \underline{-1.5u_m}$$

$$u_V(t_3) = u_u(t_3) - u_{ekv}(t_3) =$$

$$-1.5u_m - 0 = \underline{-1.5u_m}$$

$$u_{MAX} = u_u(t_3) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_3) =$$

$$-1.5u_m + 0.8 \cdot (-1.5u_m) = \underline{-2.7u_m}$$



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:

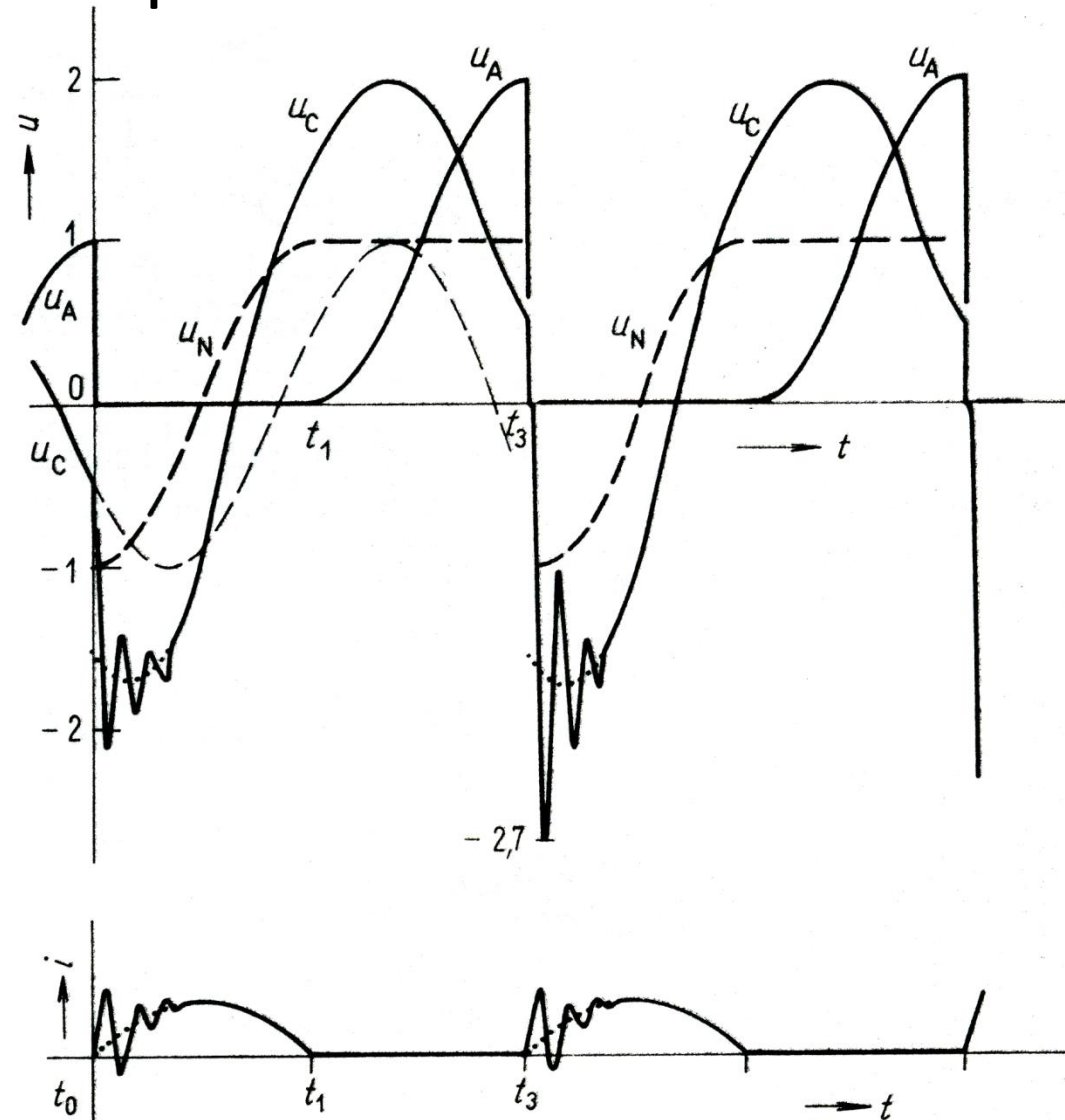
Protože je další cyklus téměř shodný s předcházejícím, přepětí se nadále nenavyšuje.

Při zanedbání mezifázových kapacit a tlumení přechodného proudu je velikost volné složky:

$$\begin{aligned} u_v(t_3) &= u_u(t_3) - u_c(t_3) \\ &= -1.5u_m - 0.5u_m = -2u_m \end{aligned}$$

A příslušné přepětí porovnatelné s předchozím případem:

$$\begin{aligned} u_{MAX} &= u_u(t_3) + u_v(t_3) = \\ &= -1.5u_m + (-2u_m) = -3.5u_m \end{aligned}$$



Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase t_1 dle teorie Peterse a Slepiana:

Pro rozsáhlé sítě s velkou kapacitou se ovšem uzel transformátoru provozuje jako kompenzovaný, což pozitivně snižuje vznikající přepětí.

