

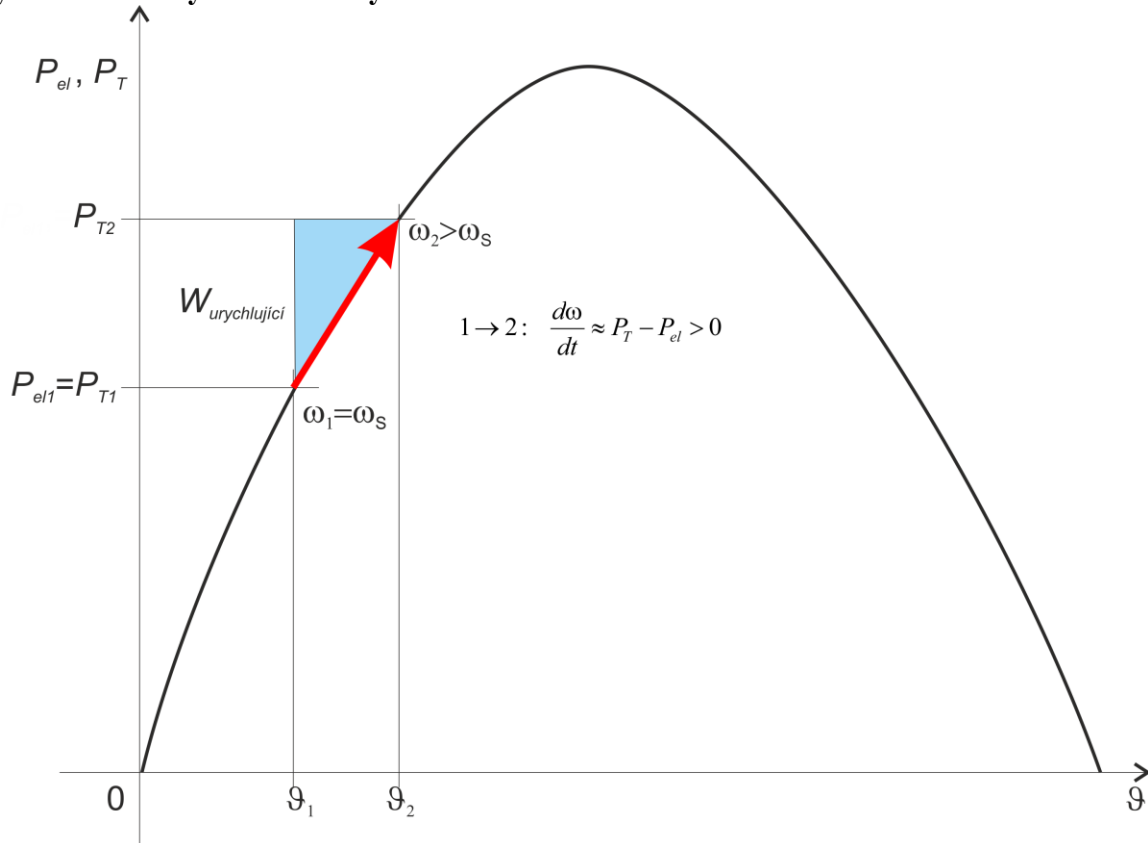
# PJS – Přednáška číslo 10

## Elektromechanické přechodné děje v ES

### Dynamická stabilita přenosu výkonu mezi alternátorem a tvrdou sítí

Dynamická stabilita alternátoru pracujícího do pevné sítě je schopnost systému nalézt při ději, během kterého se určitým způsobem mění zátěžný úhel, výkon turbíny, parametry přenosu elektrického činného výkonu, nebo jiné veličiny, které tyto parametry ovlivňují, nový staticky stabilní stav s konstantním zátěžným úhlem, čili synchronní stav.

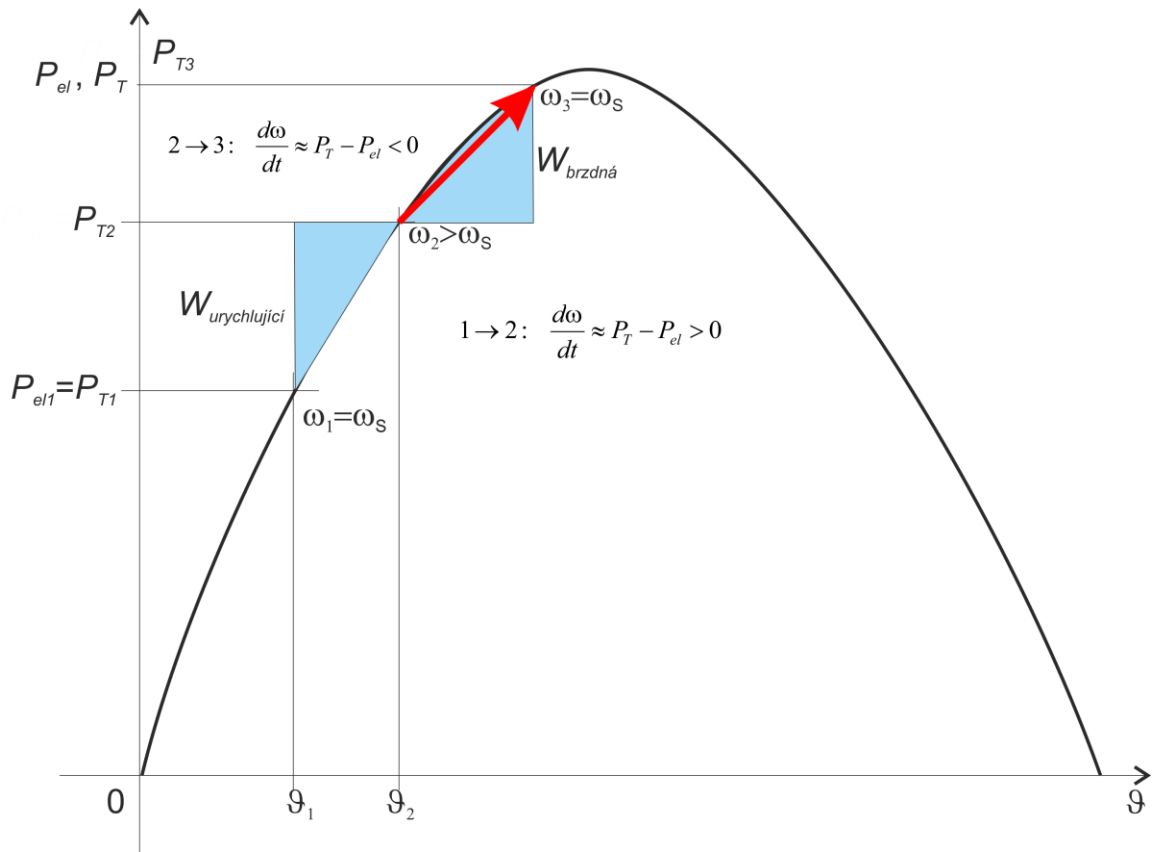
#### Rychlá změna výkonu turbíny



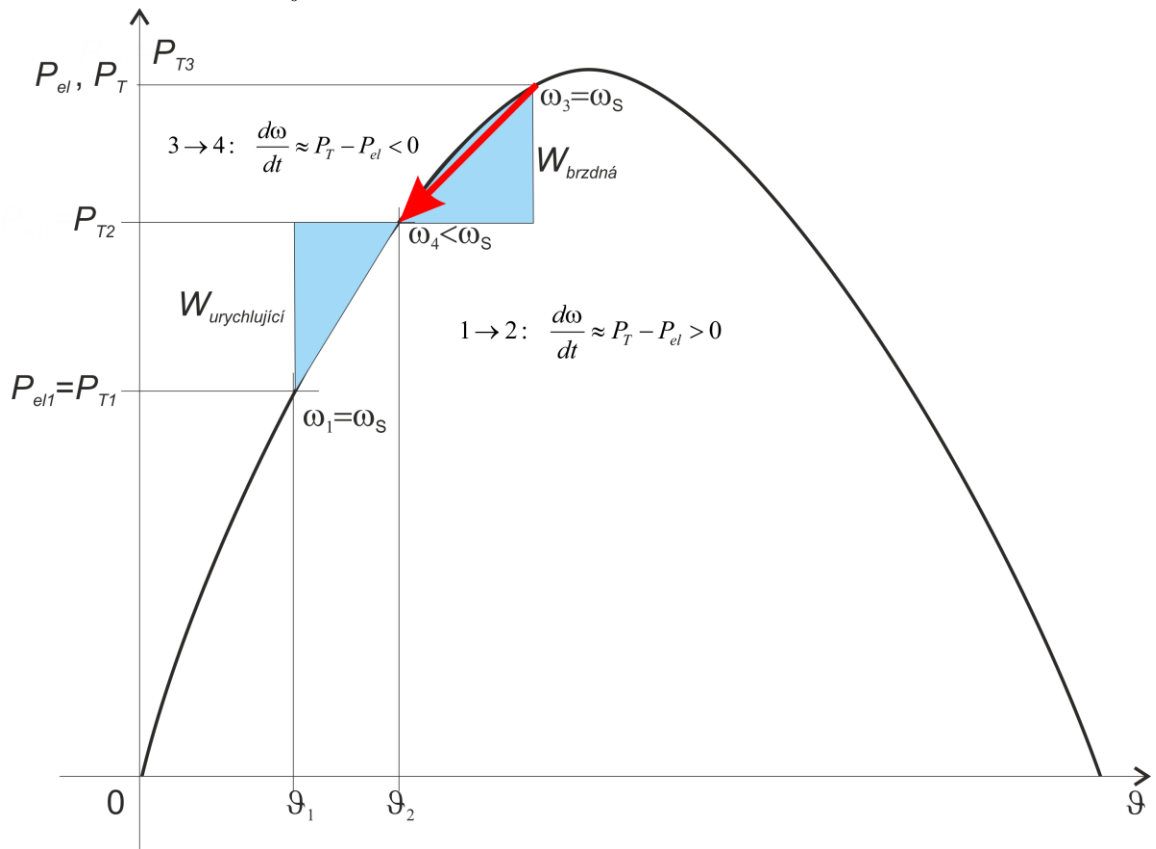
$$P_{el} = \frac{E \cdot U_s}{X_{12}} \sin \vartheta$$

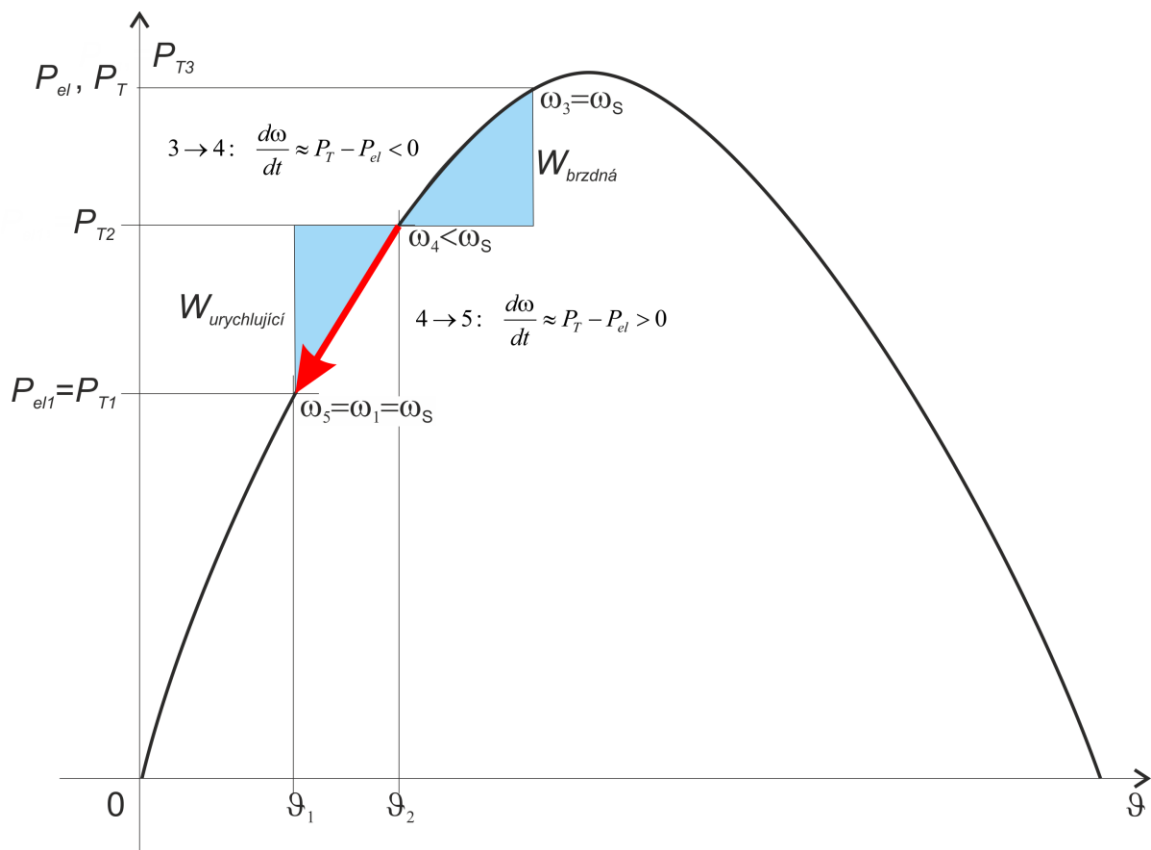
$$W = \int_0^t P_T - P_{el} dt$$

$$W = \int_0^{\vartheta} \Delta M d\vartheta \approx \int_0^{\vartheta} \frac{\Delta P}{\omega_s} d\vartheta$$



$$W = W_{urýchľujúci} + W_{brzdňá} \approx \int_0^{\vartheta_2} \Delta P d\vartheta = 0$$





Podmínka splnění statické stability: Při ději bude mít systém k dispozici minimálně stejné množství brzděné energie jako je množství naakumulované urychlující energie, které systém během děje získá.

Existuje tedy čas  $t$ , pro který platí:

$$\Delta W_{mech} = \frac{1}{2} J (\Delta \omega_m)^2 < 0$$

$$\frac{d\Delta W_{mech}}{dt} = \Delta P \quad \Delta W_{mech} = \int_0^t \Delta P dt < 0, \text{ kde } \Delta P = P_T - P_{el} - P_Z \approx P_T - P_{el}$$

Vzhledem k tomu, že soustava je ze synchronního stavu vychýlena jen nepatrně, lze psát:

$$\omega_m \approx \omega_s \approx konst. \text{ a tedy současně } \Delta W_{mech} = \int_0^{\varrho} \Delta M d\varrho = \int_0^{\varrho} \frac{\Delta P}{\omega_m} d\varrho \approx \int_0^{\varrho} \frac{\Delta P}{\omega_s} d\varrho \approx \int_0^{\varrho} \Delta P d\varrho$$

Lze tudíž aplikovat tzv. „pravidlo ploch“ dynamické stability v rovině  $P \leftrightarrow \varrho$ , kde plocha vymezená  $P_T$  a  $P$ , nad křivkou úrovně  $P_T$  musí být během děje k dispozici minimálně stejně velká, jako plocha pod touto křivkou.

Nebo lze alternativně řešit diferenciální rovnicí:

$$\Delta M = J \frac{d\Delta \omega_m}{dt} \quad \frac{d\Delta \omega_m}{dt} = \frac{\Delta P}{\omega_s} \cdot \frac{1}{J}$$

$$\frac{d^2 \varrho}{dt^2} = \Delta P \frac{\omega_s}{T_m \cdot S_N} \quad T_m = \frac{J \cdot \omega_s^2}{S_N}$$

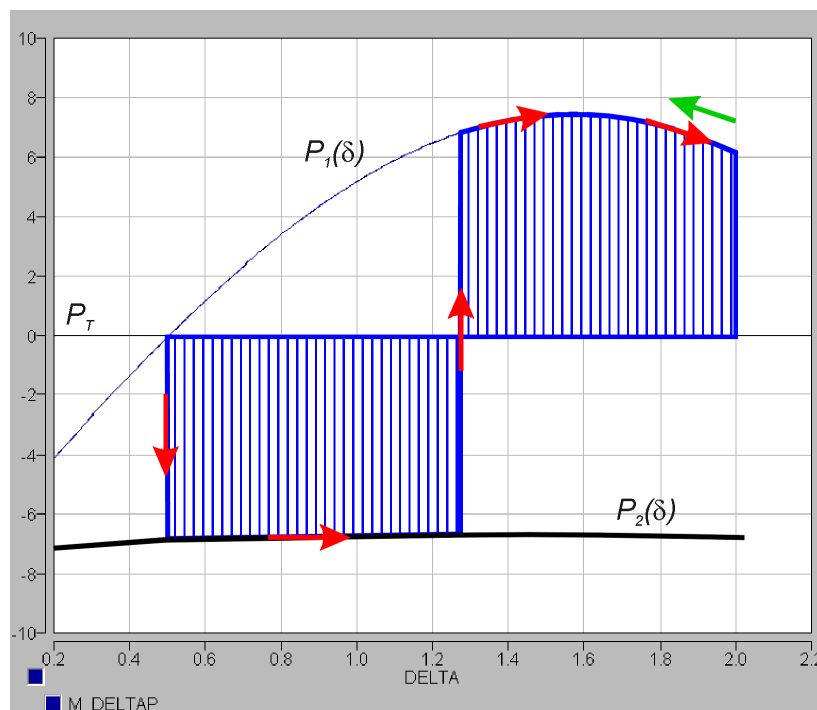
V postupném řešení závislosti  $\varrho$  hledat okamžik, kdy se změní nárůst na pokles, nebo otočí znaménko rychlosti  $\Delta \omega_m$ . V rovnici je  $T_m$  časová konstanta celého soustrojí a souvisí s potřebnou energií pro jeho uvedení na jmenovité otáčky. Měřit se nechá jako doba pro dosažení  $\omega_s$  při chodu naprázdno a jmenovitém hnacím momentu (výkonu):

$$\Delta M = M_N = \frac{S_N}{\omega_s} = J \frac{d\Delta\omega_m}{dt} \quad \omega_m = \int_0^t \frac{S_N}{J \cdot \omega_s} dt \quad \omega_s = \int_0^{T_m} \frac{S_N}{J \cdot \omega_s} dt = T_m \frac{S_N}{J \cdot \omega_s}$$

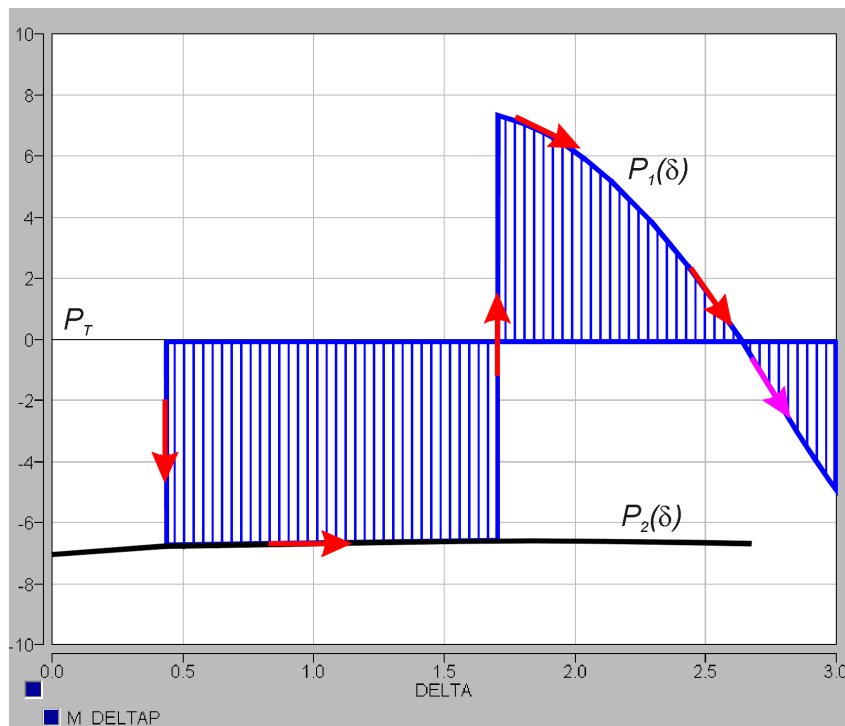
Druh soustrojí	$T_m$ [s]
Turboalternátor s kondenzační turbínou 1 500 min <sup>-1</sup>	15 až 24
Turboalternátor s kondenzační turbínou 3 000 min <sup>-1</sup>	7 až 18
Turboalternátor s protitlakovou turbínou 3 000 min <sup>-1</sup>	6 až 10
Hydroalternátory	3 až 9

### Přechodný děj způsobený ztrátou podstatné části přenášeného činného výkonu v době poruchy.

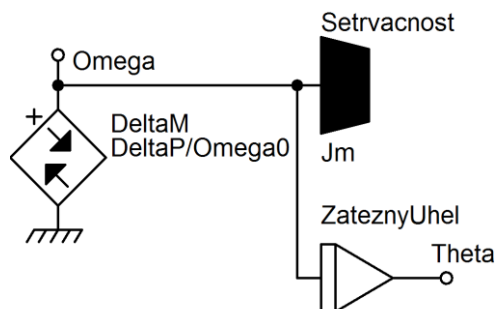
Obrázek ukazuje děj, kdy soustava byla vyvedena ze staticky stabilního stavu vznikem poruchy na vedení, došlo ke zmenšení vazební admitance mezi alternátorem a sítí a poklesu přenášeného elektrického výkonu, který je současně brzdným výkonem na hřídeli soustrojí, z původní křivky  $P_1(\vartheta)$  na  $P_2(\vartheta)$ .



Přibližně v době kdy zátěžný úhel dosáhl přibližně velikosti 1.3 rad byla porucha odstraněna a přenášený výkon se vrátil zpět na původní charakteristiku  $P_1(\vartheta)$ . Po dosažení zátěžného úhlu přibližně 2 rad dojde k naakumulování dostatečného množství brzdné energie k tomu, aby se zastavil další nárůst zátěžného úhlu a ten se v důsledku stálé převahy brzdného momentu nad urychlujícím začne zmenšovat (zelená šipka). Zobrazený děj je tedy dynamicky stabilní.



Obrázek ukazuje děj, kdy soustava byla vyvedena ze stejného staticky stabilního stavu stejnou poruchou. Tentokrát ale byla porucha odstraněna později, až když zátěžný úhel dosáhl přibližně hodnoty 1.7 rad. Po dosažení zátěžného úhlu přibližně 2.7 rad dojde obnovení převažujícího urychlujícího momentu nad brzdným a zátěžný úhel pokračuje se zvětšujícím zrychlováním ve svém nárůstu (fialová šipka). Zobrazený děj je tedy dynamicky nestabilní, neboť naakumulovaná brzdná energie mezi zátěžnými úhly 1.7 a 2.7 rad nestačila vykompenzovat urychlující energii získanou mezi úhly 0.4 a 1.7 rad.



$$\frac{d\vartheta(t)}{dt} = \Delta\omega_m \quad \rightarrow \quad \vartheta(t) = \int_0^t \Delta\omega_m dt$$

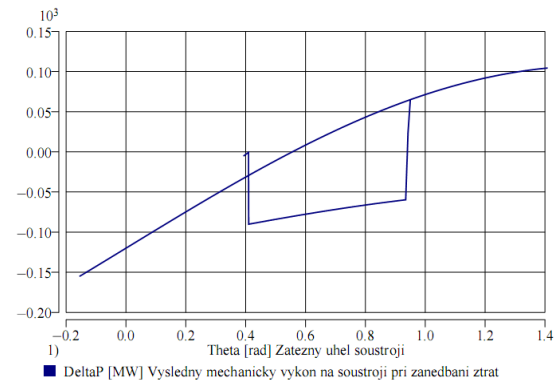
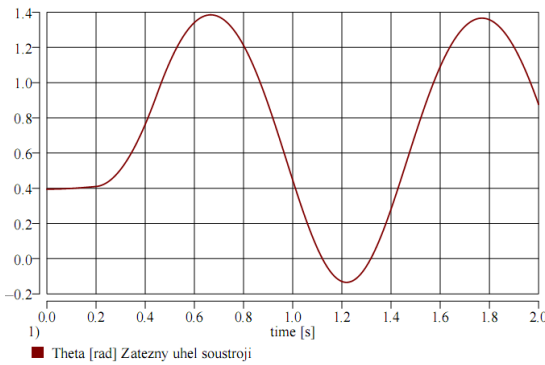
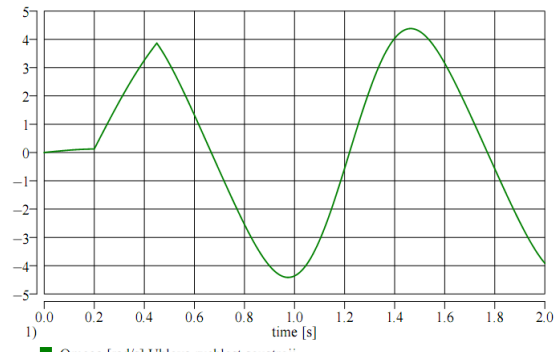
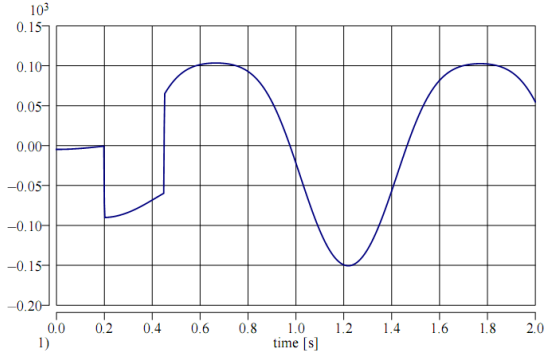
$$\Delta M = J_m \frac{d\Delta\omega_m}{dt} = \frac{\Delta P}{\omega_s} = \frac{P_T - P_{el}}{\omega_s}$$

$$T_m = \frac{J_m \cdot \omega_s^2}{S_N} \quad \rightarrow \quad J_m = \frac{T_m \cdot S_N}{\omega_s^2}$$

V tomto jednoduchém modelu stability alternátoru řešení vznik poruchy v čase 0.2 na vazebním dvojbranu a posléze její vypnutí v čase 0.45 sec. Přechodný děj analyzován do 1 sec. Za těchto podmínek byla dynamická stabilita systému zachována. Konečné rozhodnutí o výsledku je zřejmé v čase přibližně 0.65 sec.

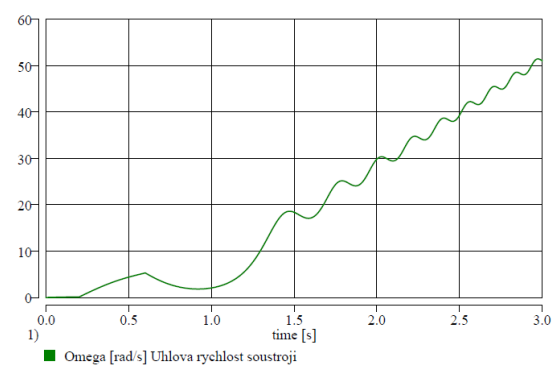
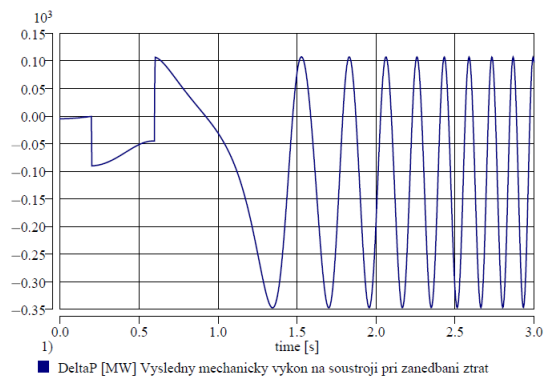
$P_{T0} = 120$	[MW]	Mechanický výkon turbíny [MW]
$P_{max1} = 299.69$	[MW]	Maximální el. výkon dodávaný alternátorem
$P_{max2} = 74.927$	[MW]	Maximální el. výkon dodávaný alternátorem
$P_{max3} = 227.40$	[MW]	Maximální el. výkon dodávaný alternátorem

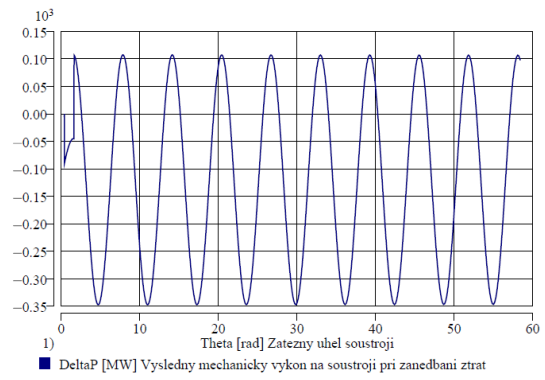
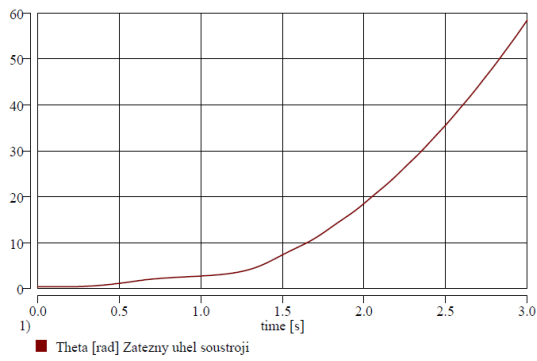
$T_{poruch} = 0.2$	[s]	Doba vzniku poruchy
$T_{vyppor} = 0.45$	[s]	Doba vypnutí poruchy
$T_f = 0.35$	[s]	Časová konstanta budicího obvodu
$I_b = 1$		
$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot 50$	[rad/s]	Úhlová synchronní rychlost soustrojí
$T_m = 7$	[s]	Mechanická časová konstanta
$S_{ng} = 235$	[MVA]	Jmenovitý výkon alternátoru



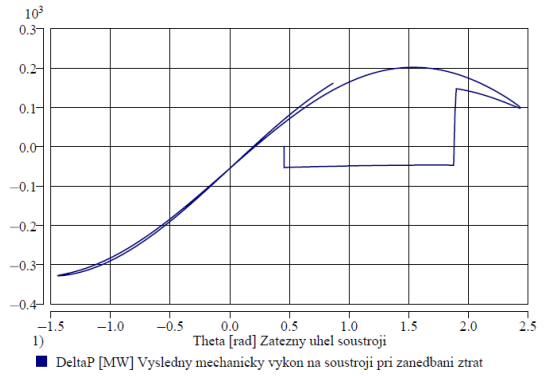
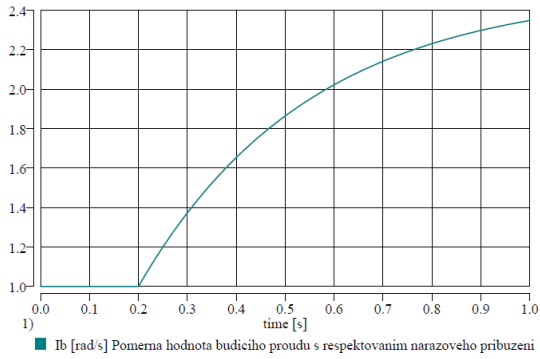
Následující varianta je identická až na dobu vypnutí, která je tentokrát v čase 0.60 sec. Přechodný děj analyzován do 3 sec. Za těchto podmínek nebyla dynamická stabilita systému zachována. Konečné rozhodnutí o výsledku je zřejmé v čase přibližně 1 sec.

$$T_{vyppor} = 0.60 \quad [s] \quad \text{Doba vypnutí poruchy}$$

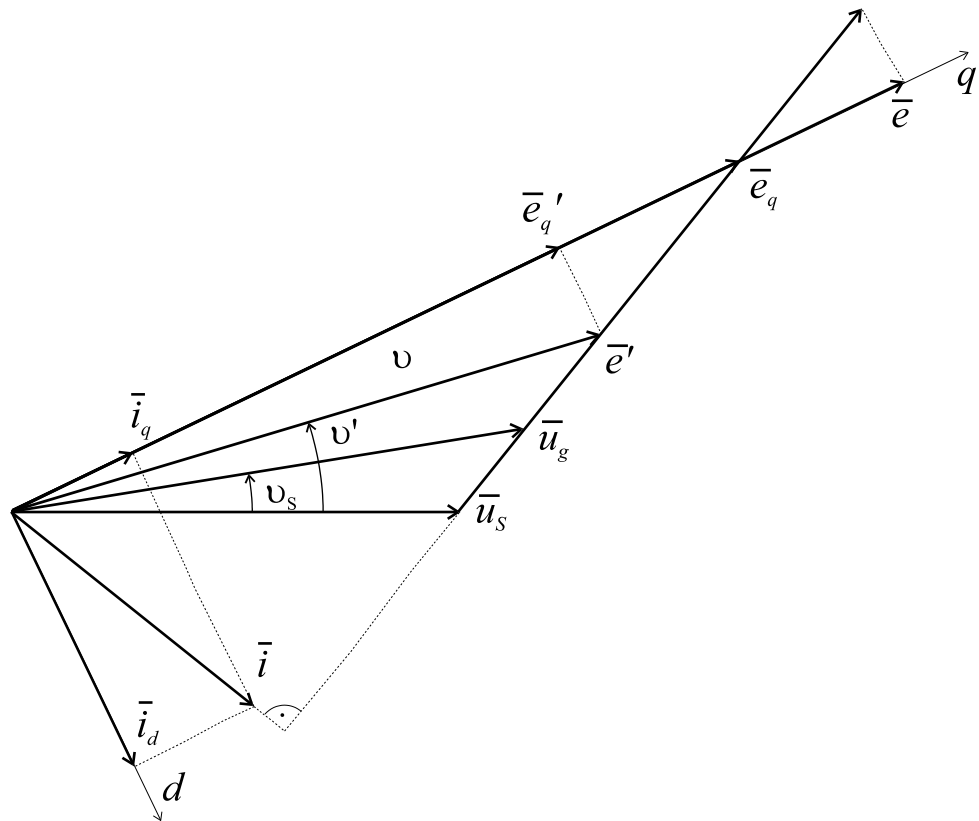




**Příklad respektování nárazového přibuzení:**



**Komplikovanější model pro stroj s vyniklými póly a s respektováním přechodných veličin a tlumením**



Matematický popis vztahů nových veličin:

$$e = e_q \frac{x_d - x_d'}{x_q - x_d'} - e_q' \frac{x_d - x_q}{x_q - x_d'}$$

$$e_q = \frac{e_q' - u_s (x_q - x_d') y_{12} \cos(\vartheta - \beta_{12})}{1 - (x_q - x_d') y_{11} \cos(\beta_{11})}$$

$$p = e_q^2 y_{11} \sin(\beta_{11}) + e_q \cdot u_s \cdot y_{12} \sin(\vartheta - \beta_{12})$$

$$q = e_q^2 y_{11} \cos(\beta_{11}) - e_q \cdot u_s \cdot y_{12} \cos(\vartheta - \beta_{12})$$

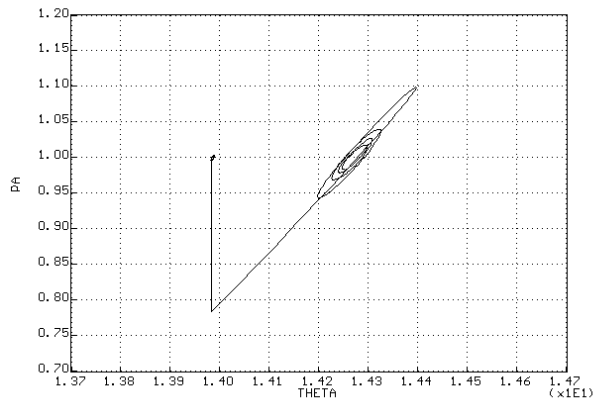
$$u_y = f(u_n - u_g) \quad \frac{de_q'}{dt} = \frac{u_y - e}{T_{d0}} \quad \Delta p = p_t - p \quad \omega' + K_{tun} \omega = \frac{2\pi f}{T_m} \Delta p \quad \vartheta' = \omega$$

$$u_s = \sqrt{\left(e_q - \frac{q \cdot x_q}{e_q}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot x_q}{e_q}\right)^2}$$

$$e' = \sqrt{\left(e_q - \frac{q \cdot (x_q - x'_d)}{e_q}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot (x_q - x'_d)}{e_q}\right)^2}$$

Přetržení jedné fáze spojovacího vedení:

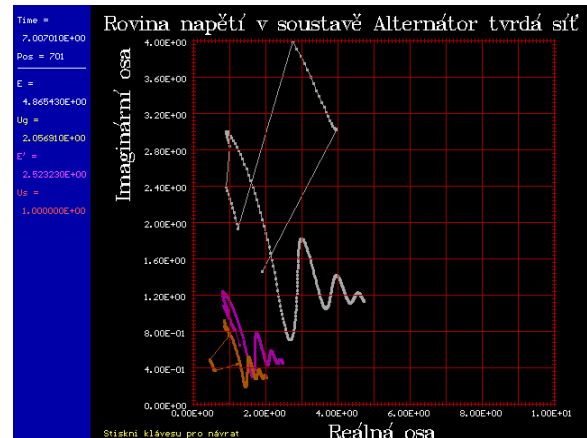
THETA	PA
1.37E+01	7.00E-01
1.47E+01	1.20E+00



$$\vartheta_s = \arg(u_s) = \vartheta - \arctan\left(\frac{p \cdot x_q}{e_q^2 - q \cdot x_q}\right)$$

$$\vartheta' = \arg(E') = \vartheta - \arctan\left(\frac{p \cdot (x_q - x'_d)}{E_q^2 - q \cdot (x_q - x'_d)}\right)$$

Dvoufázový zemní zkrat na vedení, vypnutí zkratu v čase a OZ:



### Okolnosti zlepšující stabilitu alternátoru pracujícího do tvrdé sítě

- Snížení vazební impedance mezi alternátorem a sítí (alternativní cesty přenosu výkonu, transformátory vysokého výkonu a s nízkým napětím nakrátko).
- Snížení výkonového vytížení před poruchou (v důsledku navýšení synchronizačního výkonu).
- Rychlost regulace otáček turbíny.
- Rychlost a rozsah regulace buzení.
- Rychlost a spolehlivost chránících systémů.
- Zařazení systému obnoveného zapnutí.
- Setrvačnost soustrojí.
- Tlumící vinutí alternátoru a činná složka vazební impedance.