

# MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH DĚJŮ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ PRO ÚČELY SIMULACE KRITICKÝCH STAVŮ

Ing. Petr Neuman, CSc.  
ČEPS, a.s., Praha

## Abstrakt:

Na loňském ročníku této konference jsem prezentoval možnosti modelování synchronních generátorů pro dispečerské trenažéry DTS [1]. Připomínám, že základním požadavkem při vývoji dynamických modelů pro použití v tréninkových simulátorech – trenažerech je simulace všech jevů v „reálném čase“, což je jeden z hlavních rozdílů mezi „výcvikovými trenažéry“ a takzvanými „síťovými simulátory“. Síťové simulátory mohou simulační průběh počítat i mnohem déle než je reálný čas průběhu simulovaného děje. V této souvislosti je nutné přesvědčit odbornou veřejnost, že programové prostředky MATLAB-SIMULINK-SimPowerSystem jsou vhodnější pro realistické modely elektromagnetických a elektromechanických jevů jednotlivých prvků, ale především celých elektrizačních soustav, než jiné komerčně dostupné a široce používané programové prostředky. Mezi tyto patří např. používaný simulační program EMTP-ATP, nebo na univerzitách známý program MATHEMATICA. V příspěvku bude vysvětleno proč si autor dovoluje toto tvrdit.

## 1 Úvod

Loňský rok 2006 potvrdil obavy odborníků, že propojené elektrizační soustavy zemí Evropské unie UCTE, provozované na hranicích svých technických možností, jsou mnohem „náchylnější“ ke vzniku nouzových až havarijních stavů (příkladem je postupný rozpad ES ČR na tři „malé ostrovy“ dne 25.7.2006, jednorázový rozpad UCTE na tři „velké ostrovy“ dne 4.11.2006, a další v nedávné době vzniklé nestandardní stavy), i když naštěstí dosud nedošlo k totálnímu „blackoutu“ celé soustavy UCTE a ani nějaké celé národní soustavy. Tato situace je svým způsobem zákonitá. Uvedená zákonitost vzniku „téměř chaotických“ (tzn. obtížně ovlivnitelných a předvídatelných) podmínek provozování ES bude v příspěvku vysvětlena a bude ukázáno, že je nutné ji vzít na vědomí a naučit se elektrizační soustavu za těchto podmínek bezpečně provozovat a řídit. Před námi tedy stojí zásadní otázka, jestli v ES probíhají v jejich abnormálních, nouzových a předkolapsových stavech takové dynamické děje, které lze zařadit do kategorie „deterministického chaosu“. Pokud ano, pak je nutno zkoumat zdali jsme schopni nějakým; třeba i teoreticky náročným způsobem; tyto „předkolapsové“ stavy analyzovat, včas detekovat a tomu v reálném řízení přizpůsobit dispečerské manipulace a řízení celé ES. A právě modelování a simulace může být tímto způsobem analýza a syntézy chování ES. Obecně lze konstatovat, že ES patří do kategorie *rozlehlých kybernetických systémů*, neboť propojením jednotlivých článků nabývá ES nových vlastností, které jednotlivé články samy o sobě neměly; a z tohoto důvodu lze „nelineární chaotické“ děje v ES důvodně předpokládat.

Pokud se týká simulace v reálném čase tak na rozdíl od dispečerských simulátorů DTS určených pro trénink dispečerů, mohou tzv. „síťové simulátory“ určené pro analýzu přechodových dějů, počítat i mnohem déle než je reálný čas průběhu konkrétního simulovaného děje. V této souvislosti lze zmínit např. síťový simulátor MODES používaný standardně pro simulaci dynamických dějů ES v naší společnosti ČEPS (bohužel v širší neenergetické veřejnosti neznámý, vyvinutý „na zakázku“ jedním kmenovým pracovníkem). Vzhledem k tomu, že MODES byl vyvinut pro simulaci elektromechanických přechodových dějů, nemá v zásadě problém počítat simulace v reálném čase a mohl by tedy za určitých okolností být

použit i pro realizaci dispečerského trenážeru. Druhým případem je komerčně dostupný a rovněž často v elektroenergetice používaný simulační program EMTP - ATP, který je již určen pro simulaci elektromagnetických přechodových dějů (zkraty, přepětí, třífázové modely, nesymetrické jevy, vyšší harmonické) a výpočet simulačních dějů je vždy několikanásobně delší než reálný čas dějů. Pro DTS je tedy EMTP nepoužitelný. V příspěvku bude ukázán možný způsob modelování ES v normálních stavech i ve stavech blízkých kritickým (předkolapsových) a to s takovou „časovou i fyzikální aproximací přechodových dějů“, aby model a simulace byly využitelné jak pro analýzy dějů, tak i pro trénink dispečerů.

Příspěvek se věcně zaměří na dosud standardně používané modely ES na kterých se simulují elektromechanické přechodové děje a které slouží pro post-analýzu dějů proběhlých v reálné ES. Příspěvek však není pesimistický, ale na vybraných příkladech jsou ukázány takové typy modelů jednotlivých článků ES, které umožňují nelineární, ale deterministicky chaotické děje modelovat a simulovat.

## **2 Modely synchronních generátorů SG**

### **2.1 Model SG v toolboxu SimPowerSystem**

V loňském příspěvku autora na tomto semináři bylo vysvětleno, že modely synchronních generátorů z toolboxu SimPowerSystem jsou pro realizaci dispečerských tréninkových simulátorů (DTS) prakticky nepoužitelné. Z těchto byly vyvinuty a odladěny vlastní modely synchronních generátorů SG přímo v programu SIMULINK.

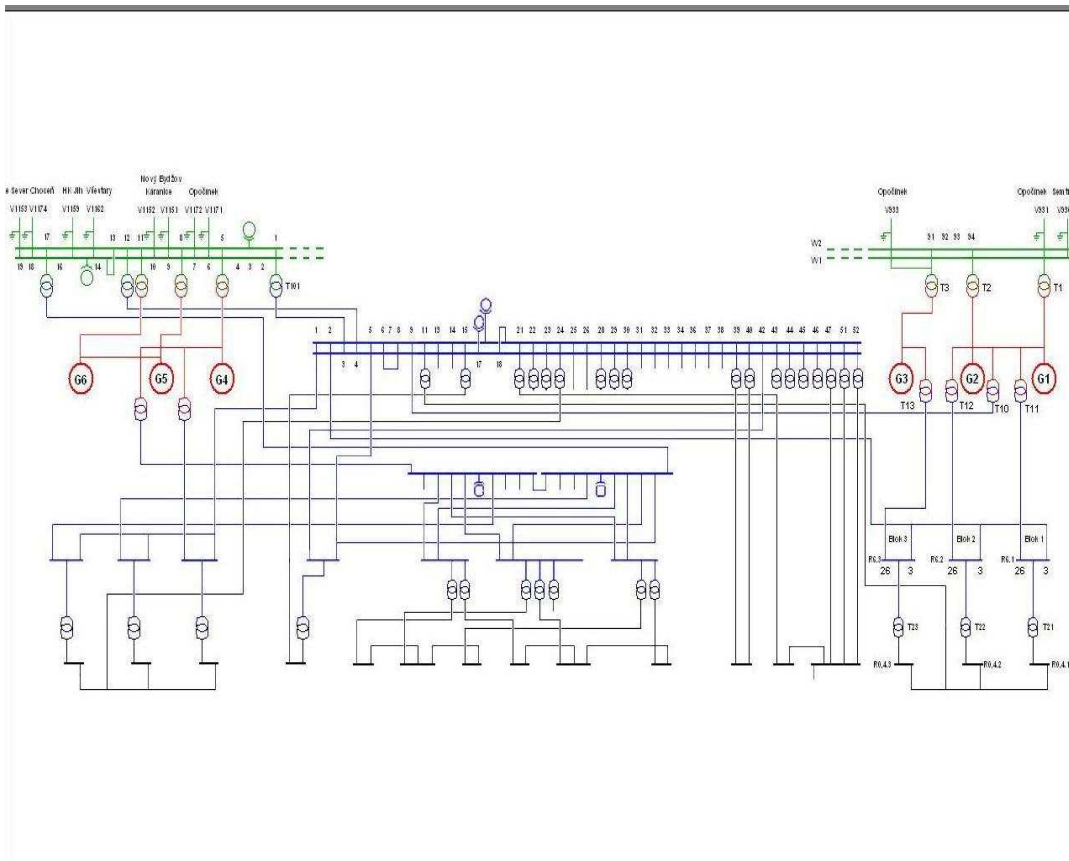
### **2.2 Model SG v programu SIMULINK v rámci referenčního projektu DTS**

Specifičnosti modelování lze dokumentovat na dodaném a provozovaném plnorozsahovém dispečerském trenážerovém simulátoru rozvoden elektrárny International Power Opatovice, a.s. (IPO), který zahrnuje šest turbogenerátorů, elektrárenské rozvodny všech napětových úrovní (0.4 kV, 6.3 kV, 10.5 kV, 110 kV), linky na vyvedení výkonu do distribuční soustavy 110 kV ČEZ – VČE a blízké uzlové rozvodny Opočinek a Neznášov [2].

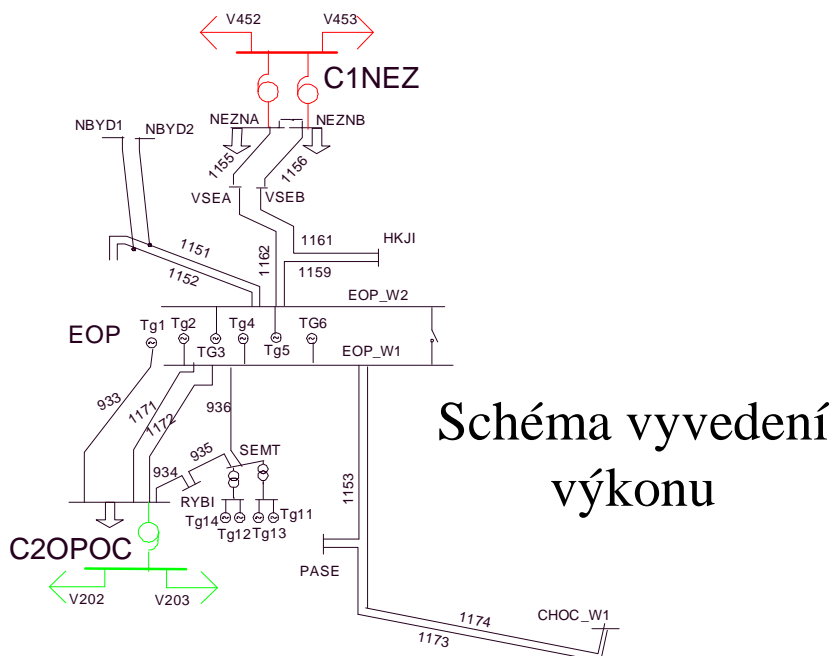
Emulovaný nástěnný panel typu APEL realizovaný v InTouch je na Obr.1. Jednopolové schéma elektrárenských rozvoden v elektrárně Opatovice – IPO, a.s., na tomto schématu dokumentuje rozsah modelovaného zařízení.

### **2.3 Porovnání hloubky popisu systémů a modelovacích prostředků**

Referenční project IPO byl modelován v prostředcích MATLAB-SIMULINK, a pro porovnání byl stejný rozsah turbogenerátorů a elektrárenských rozvoden modelován v prostředcích síťového simulátoru MODES. Schema vyvedení výkonu je na Obr.2 a zadávání zkratů na Obr.3.

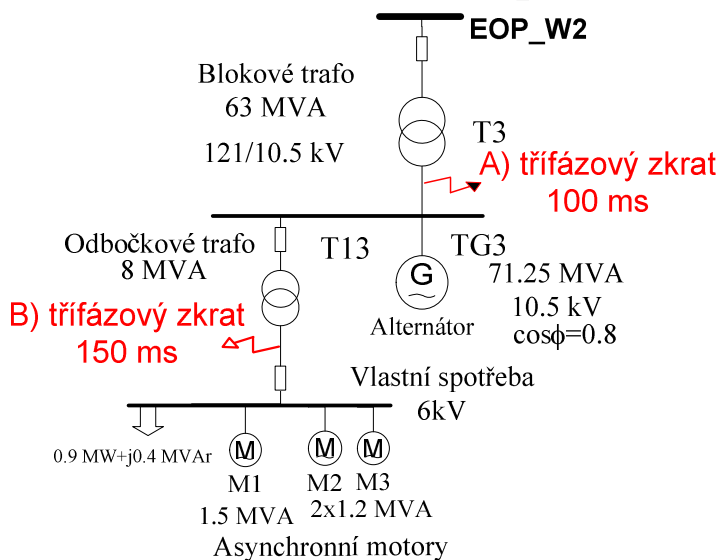


Obr.1. Emulovaný HW panel rozvodu IPO v prostředcích InTouch



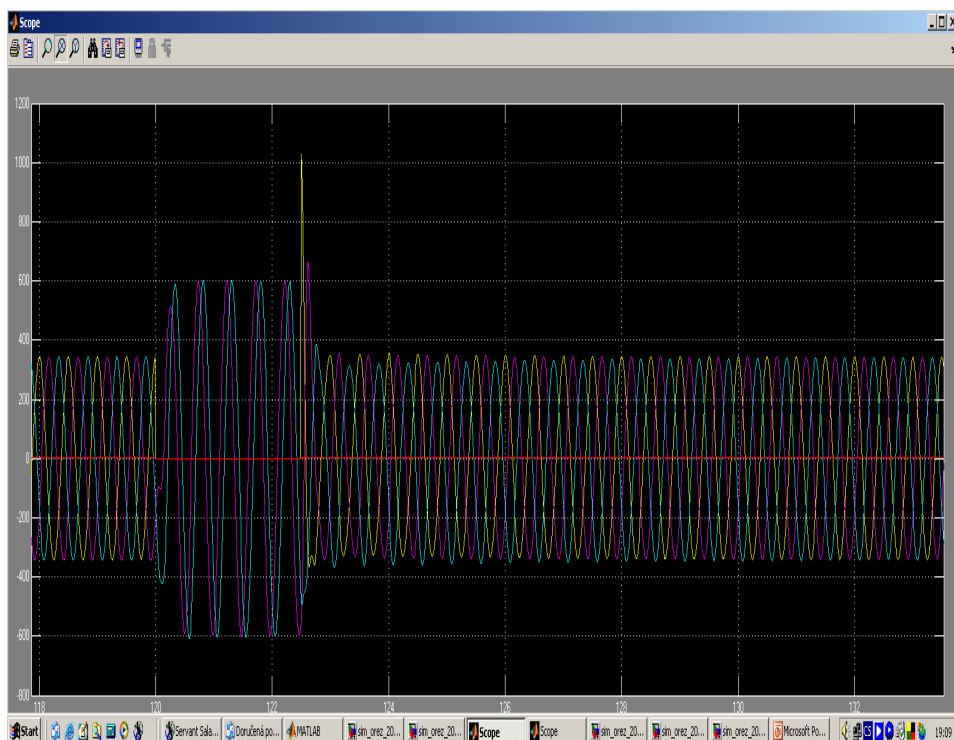
Obr.2. Ideové schéma zapojení rozvodu elektrárny IPO.

## Schéma referenčních poruch

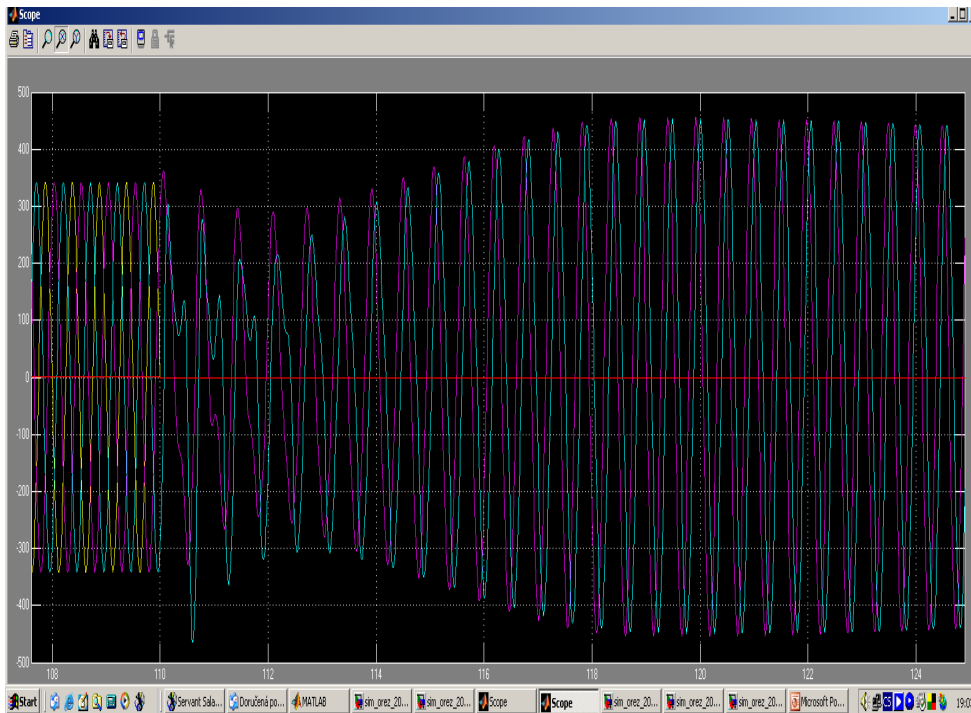


Obr.3. Schema realizovaných zkratů.

Následující obrázky ukazují časové průběhy veličin při jednofázovém zkratu na svorkách generátoru o délce trvání 100 ms (Obr.4.), a trvalý zkrat (Obr.5.).

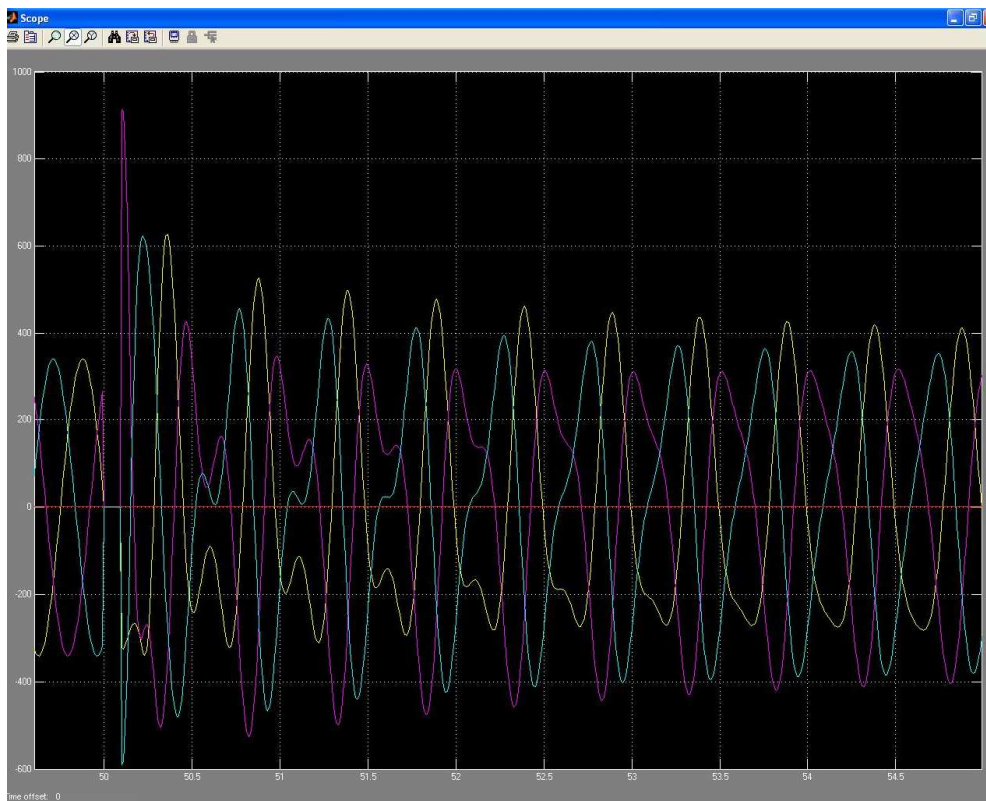


Obr.4. Přechodové děje při jednofázovém zkratu 100 ms na svorkách generátoru



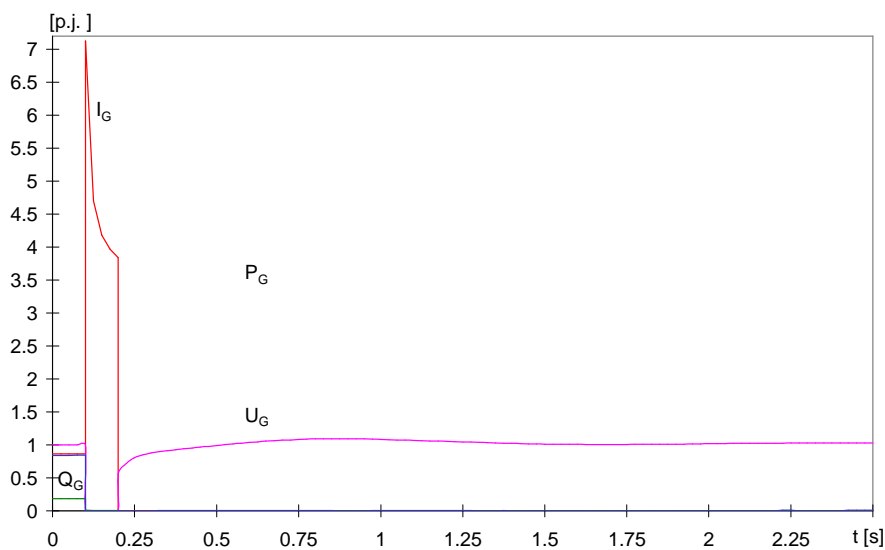
Obr.5. Přechodové děje při jednofázovém trvalém zkratu na svorkách generátoru

Další obrázky ukazují časové průběhy veličin při trojfázovém zkratu na svorkách generátoru o délce trvání 100 ms (Obr.6.) v SIMULINK a pro porovnání v MODES (Obr.7.).

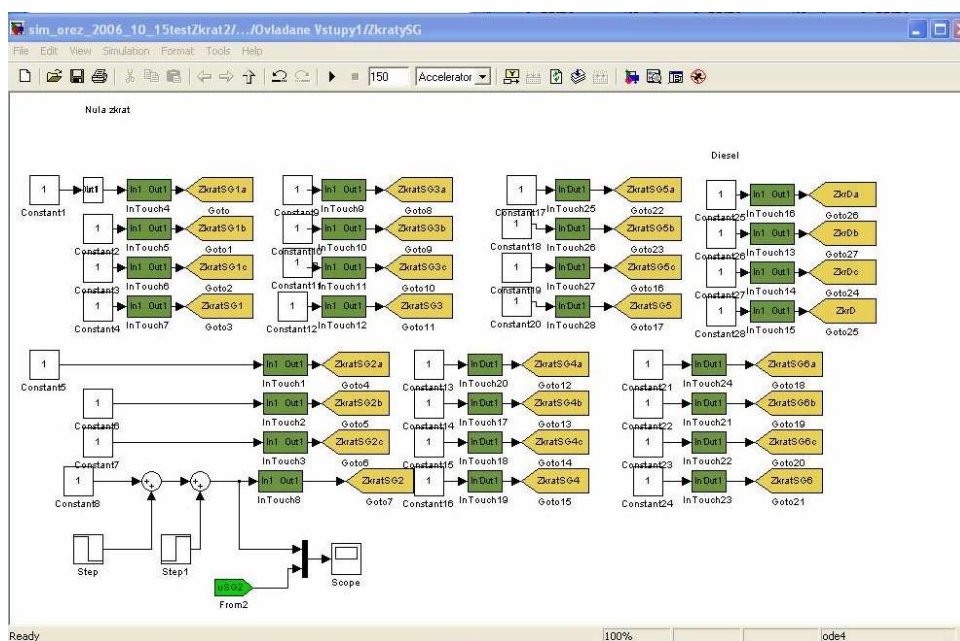


Obr.6. Třífázový zkrat 100 ms na svorkách generátoru

## Zkrat A–průběhy na poškozeném bloku TG3



Obr.7. Průběhy veličin při 100 ms třífázovém zkratu



Obr.8. Schéma SIMULINK zadávání zkratu s omezenou dobou trvání (úspěšný OZ)

## 4 Modely chaotických systémů

V této části budou ukázány jednoduché modely, které se vyznačují „deterministicky chaotickým“ chováním. Přitom jak bude ukázáno, určité subsystemy (prvky) elektrizačních soustav jsou matematicky popsány diferenciálními rovnicemi principiálně shodnými se známými „chaotickými“ systémy.

### 4.1 Model Lorenzova traktoru

Popis Lorenzova atraktoru [3] je dán soustavou diferenciálních rovnic

$$\dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\dot{y} = x(r - z) - y$$

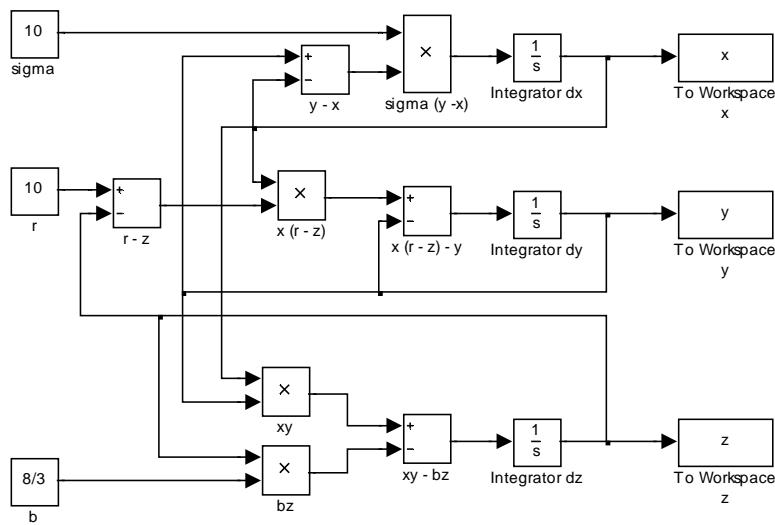
$$\dot{z} = xy - bz$$

kde  $\sigma = 10$  . . . . . Prandtlovo číslo

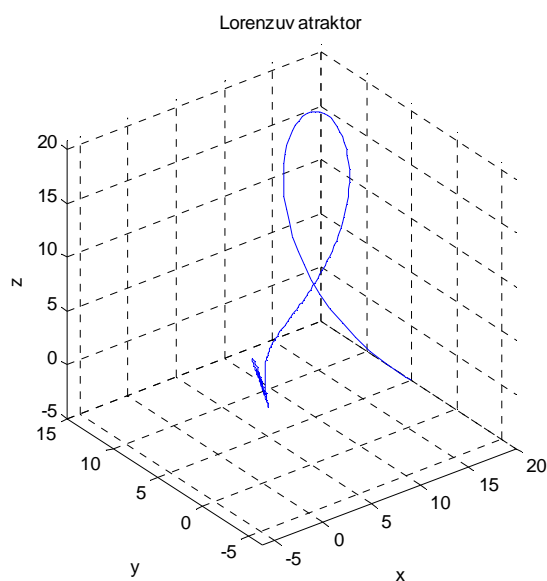
$$b = 8/3$$

$r = 10; 28$  . . . Rayleighovo číslo

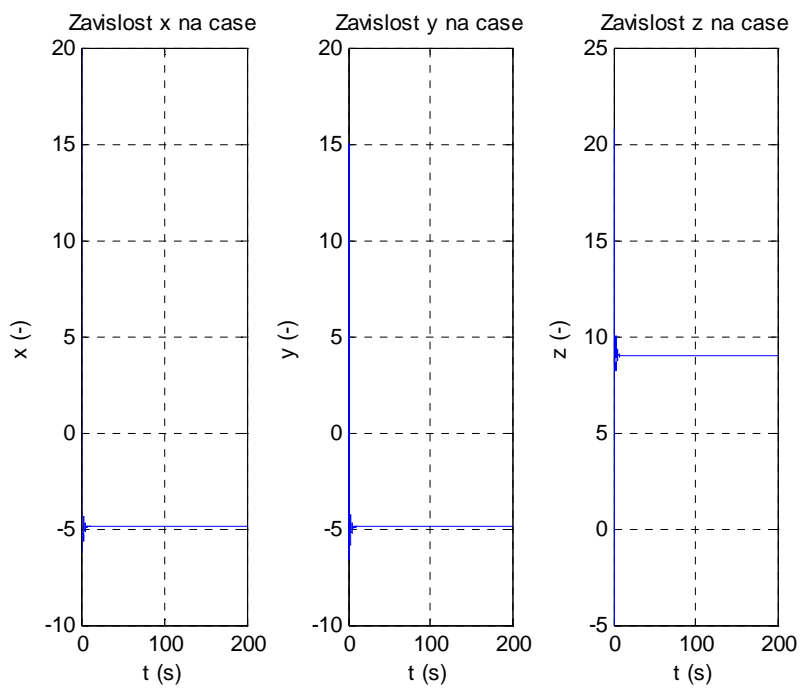
Na Obr.9. je ukázáno schéma SIMULINK a na Obr.10. jsou průběhy veličin pro dva příklady. Příklad A) pro  $r = 10$  má stabilní průběh. Příklad B) pro  $r = 28$  má chaotický průběh.



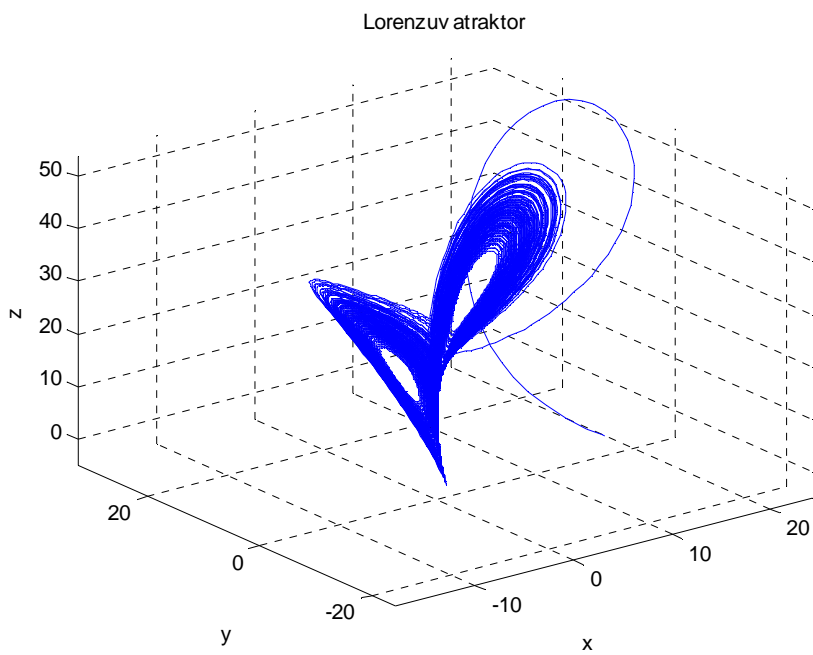
Obr.9. Schéma SIMULINK dynamického systému (Lorenzův atraktor)



Obr.10. Příklad A) stabilní průběh ve stavovém prostoru

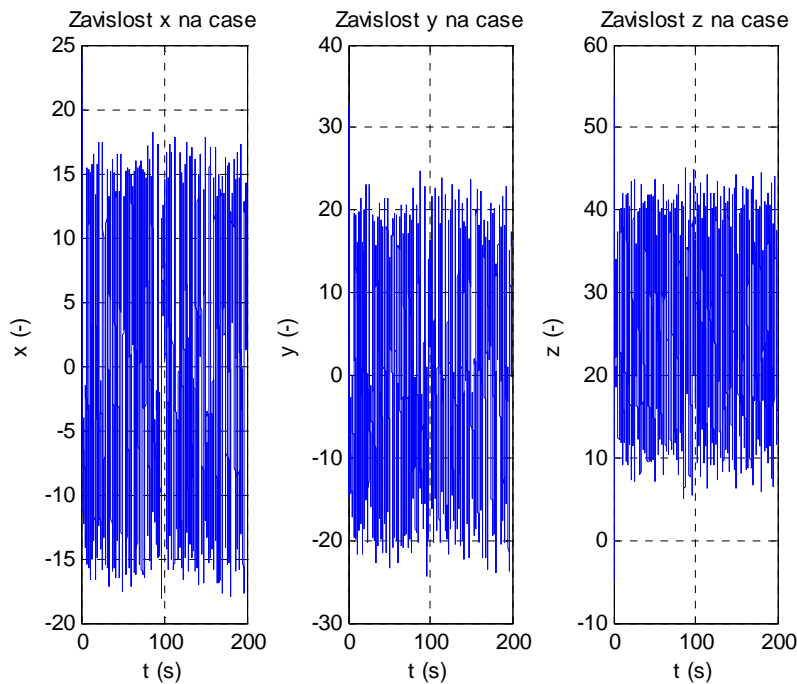


Obr.11. Příklad A) stabilní průběh veličin v časové ose



Obr.12. Příklad B) deterministicky chaotický průběh ve stavovém prostoru





Obr.13. Příklad B) deterministicky chaotický průběh veličin v časové ose

## 4.2 Model Van der Polova oscilátoru

Popis Van der Poolova nebuzeného systému je dán soustavou diferenciálních rovnic

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= (1 - x_1^2)x_2 - x_1 \end{aligned}$$

Řešení nebuzeného Van der Poolova oscilátoru v SIMULINK bylo uvedeno v literatuře [4].

Pokud je Van der Poolův systém buzen vnějším harmonickým budícím signálem

$$\dot{x}_2 = (1 - x_1^2)x_2 - x_1 + A \cos(2\pi t / T_2)$$

pak stavová trajektorie je obdobně „chaotická“ a stavově neopakovatelná jako je tomu u výše uvedeného Lorenzova atraktoru a rozdíl mezi buzeným a nebuzeným systémem je také podobný.

## 5 Závěr

V příspěvku bylo poukázáno na to, že omezení a předpoklady, které byly uvažovány při tvorbě některých standardních simulačních programů a tzv. síťových simulátorů (např. MODES), jsou tak silné, že v podstatě z principu nelze „předkolapsové děje“ v simulačních modelech „vybudit“ a tedy ani v rámci simulací jejich existenci doložit a simulačně ověřit možný alternativní způsob manipulace a řízení. Mezi takové „silné“ předpoklady patří například uvažování zjednodušených modelů SG, připuštění pouze malé změny frekvence, tzn. pouze „malou odchylku“ frekvence od nominální 50 Hz, předpoklad jednofázových modelů zařízení a prvků (SG, rozvodny, vedení, transformátory, atp.), zanedbání některých elektromagnetických nelineárních vlastností, jako např. modelování lineární charakteristiky sycení transformátorů,

dále modelování pouze jedné ze složkových soustav a to sousledné složky, tzn. předpoklad symetrického zatížení a „akceptování“ pouze 1.harmonické složky.

Na základě konzultací s pracovníky společnosti HUMUSOFT je do budoucna uvažován způsob numerického řešení takového realistického modelu, kdy model ES bude rozdělen na základní velký model a několik menších submodelů. Velký model bude simulaci řešit s pevným integračním krokem větší velikosti a menší submodely s kratšími integračními kroky. Tyto subsystemy budou vnitřně referencovány funkcí „model referencing“, tak aby se v simulačním čase „nerozjížděly“ od velkého modelu. Tento postup je jedna z možností, jak realizovat obecný požadavek na „vnucené řízení změny velikosti integračního kroku“. Je to jakoby výpočet s „proměnným krokem“, ale s tím, že jeho velikost bude řízena buďto událostí (např. dosažení zadané meze velikosti veličiny), nebo předem daným scénářem, nebo změnou požadované přesnosti výpočtu.

Situace vzniku předkritických a kolapsových stavů je svým způsobem zákonitá a je tedy nutné vzít ji na vědomí a naučit se takovou elektrizační soustavu za těchto podmínek bezpečně řídit, což ovšem znamená naučit se ji také realisticky a korektně modelovat a simulovat v ní existující přechodové děje (nebo alespoň ty, které doprovázejí a způsobují uváděné předkritické stavy).

## 6 Literatura

- [1] Neuman, P.: Možnosti modelování synchronních generátorů pro dispečerské trenažéry. Sborník příspěvků 14.ročníku konference Technical Computing Prague 2006.
- [2] Neuman P. a kol.: Plnorozsahové dispečerské trenažéry, jejich přínos ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu technických zařízení elektráren. Energetika, č. 8-9, 2006, str. 261 – 265.
- [3] Kapitaniak T.: CHAOS for Engineers – Tudory, Applications, and Control. Sekond, Revise Edition, Springer-Verlag BerlinHeidelberg, 2000.
- [4] Houška J.: Logické řízení energetických systémů v MATLAB. Konference PRAGOREGULA 1999, str. 21-24.