

IMPLEMENTÁCIA DYNAMICKÉHO NELINEÁRNEHO MODELU VIACSTROJOVEJ ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

IMPLEMENTATION OF DYNAMIC NONLINEAR MODEL OF MULTIMACHINE POWER SYSTEM

Michal KOPČEK, Dušan MUDRONČÍK, Stanislav KUNÍK

Autori: Ing. Michal Kopček, prof. Ing. Dušan Mudrončík, PhD., Ing. Stanislav Kuník
Pracovisko: Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a matematiky
Materiálovotechnologická fakulta v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Adresa: Hajdóczyho 1, 917 24 Trnava
Tel.: +421 33 544 77 34
E-mail: michal.kopcek@stuba.sk, dusan.mudroncik@stuba.sk,
stanislav.kunik@stuba.sk

Abstract

Predložený príspevok sa venuje problematike simulovania prechodových procesov v zložitej elektrizačnej sústave (ES). Vychádza z práce [5] a jeho cieľom je oboznámiť čitateľa s vývojom vhodného modelu ES pre potreby ďalšieho výskumu.

This paper is devoted to the simulation of transient processes in a multi – machine power system. It issue from the work [5] and its main aim is to familiarize the reader with the development of power system model suitable for further research.

Key words

nelineárny dynamický model, viacstrojová elektrizačná sústava, testovanie
nonlinear dynamic model, multi - machine power system, testing

Úvod

Správna voľba vhodného matematického modelu ES z hľadiska použitej štruktúry a stupňa zjednodušenia v rozhodujúcej miere ovplyvňuje analýzu jej dynamických vlastností.

Ak berieme do úvahy detailný opis všetkých obvodov, ktoré synchronne generátory obsahujú, zistíme, že matematický model zložitej elektrizačnej sústavy je opísaný sústavou nelineárnych diferenciálnych rovníc veľmi vysokého rádu. Je zrejmé, že takto vytvorený model nie je použiteľný pre ďalšie teoretické spracovanie a použitie. Preto je nutné model vhodným spôsobom zjednodušiť tak, aby v konečnom dôsledku čo najvernejšie zachovával pôvodné vlastnosti ES, ktoré nás zaujímajú z hľadiska riešeného problému.

V prípade analýzy prechodových procesov a analýzy stability procesov ES sú najvhodnejšími zjednodušeniami nasledovné [7]:

- Synchronne generátory sú nahradené konštantným indukovaným napätím za prechodnou pozdĺžnou reaktanciou; magnetický tok vo vzduchovej medzere pokladáme v priebehu prechodného procesu za konštantný.
- Mechanický výkon na hriadieli synchronných a asynchronných generátorov, dodávaný turbínami považujeme za konštantný, keďže prechodné procesy v obvodoch regulácie turbíny sú relatívne pomalé.
- V modeli synchronných generátorov zanedbáme prechodnú vyjadrenosť pólov.
- Zťaže, okrem synchronných a asynchronných motorov sú nahradené konštantnými impedanciami.
- Účinky tmení, ktoré vznikajú v sústave v dôsledku tokov asynchronných výkonov, medzi jednotlivými generátormi, zanedbáme.

Matematický opis modelu

Na základe uvedených zjednodušení možno uvažovať n – strojový systém, v ktorom absolútny pohyb synchronného generátora popisuje nasledovná rovnovážna rovnica [8]:

$$M_i \ddot{\delta} + D_i \dot{\delta} = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

kde elektrický výkon i – teho synchronného generátora sa vypočíta:

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \Theta_{ij})$$

$$A_{ij} = E_i E_j Y_{ij} \quad i = j$$

$$A_{ij} = -E_i E_j Y_{ij} \quad i \neq j \quad (2)$$

Význam jednotlivých symbolov je nasledovný:

M_i - konštanta úmerná elektromechanickej časovej konštante i -teho generátora [p. j.],

D_i - koeficient úmerný mechanickému tmeniu i -teho generátora [p. j.],

P_{mi} - mechanický výkon dodaný i -temu generátoru [p. j.],

P_{ei} - elektrický výkon dodaný i -tym generátorom [p. j.],

δ_i - absolútny uhol rotora i -teho generátora [rad],

Θ_{ij} - fáza / uhol vzájomnej vodivosti (prenosovej admitancie) Y_{ij} [rad],

Y_{ij} - absolútna hodnota vzájomnej vodivosti (prenosovej admitancie) Y_{ij} [p. j.] medzi i -tym a j -tym generátorom.

Uvedená sústava nelineárnych diferenciálnych rovníc (1) je druhého rádu a predstavuje všeobecný matematický model zložitej ES. Aby bolo možné takúto sústavu riešiť a ďalej spracovať, je nutné prepísať model do vhodnejšieho tvaru. Preto každú rovnicu sústavy rovníc (1) rozložíme na sústavu dvoch rovníc prvého rádu vhodnou substitúciou.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{-D_i}{M_i} \omega_i + \frac{P_{mi} - P_{ei}}{M_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

ω_i - uhlová rýchlosť i -teho generátora [rad], ktorá vyjadruje zmenu polohy rotora vzhľadom na zvolenú referenčnú os, ktorá sa otáča synchronnými otáčkami.

Ďalšie zjednodušenie matematického modelu je možné dosiahnuť stotožnením referenčnej osi s osou niektorého synchronného generátora, napr. n -tého. Po takejto úprave potom budeme pozorovať prechodné procesy v ES podľa pohybu rotorov ostatných synchronných generátorov vzhľadom na pohyb i -teho generátora. Úprava rovnice (3) spočíva v odčítaní n -tej sústavy rovníc od všetkých predchádzajúcich, takže matematický model je (podľa [8], [10], [1]) popísaný nasledujúcou sústavou rovníc, a nazveme ho matematický model s nezhodným tlmením:

$$\begin{aligned} \frac{d(\delta_i - \delta_n)}{dt} &= \omega_i - \omega_n \\ \frac{d(\omega_i - \omega_n)}{dt} &= \lambda_n \omega_n - \lambda_i \omega_i + \frac{P_{mi}}{M_i} - \frac{P_{mn}}{M_n} + \frac{P_{en}}{M_n} - \frac{P_{ei}}{M_i} \quad i = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (4)$$

A platí:

$$\lambda_i = D_i M_i^{-1} \quad s = n - 1.$$

Podľa literatúry [7] je možné uvažovať ďalšie zjednodušenie modelu položením všetkých koeficientov λ do rovnosti vzhľadom na to, že hodnoty koeficientov tlmenia D sa dajú v širokom rozsahu ovplyvňovať napr. konštrukciou tlmiacich vinutí generátora. Teda ak platí:

$$\begin{aligned} D_1 M_1^{-1} &= D_2 M_2^{-1} = \dots = D_n M_n^{-1} = \lambda \\ \lambda_1 &= \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

Potom dostaneme matematický model zložitej elektrizačnej sústavy so zhodným tlmením:

$$\begin{aligned} \frac{d(\delta_i - \delta_n)}{dt} &= \omega_i - \omega_n \\ \frac{d(\omega_i - \omega_n)}{dt} &= \lambda(\omega_n - \omega_i) + \frac{P_{mi}}{M_i} - \frac{P_{mn}}{M_n} + \frac{P_{en}}{M_n} - \frac{P_{ei}}{M_i} \quad i = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (6)$$

Pre potrebu ďalšieho použitia modelu je možné spomínané modely dekomponovať. Vzhľadom na vlastnosti tlmenia a implementáciu modelu ES popíšeme dekompozíciu modelu ES so zhodným tlmením typu $n-1$.

Definujme stavový vektor:

$$\bar{x} = [\omega_{1n}, \delta_{1n} - \delta_{1n}^0, \omega_{2n}, \delta_{2n} - \delta_{2n}^0, \dots, \omega_{n-1,n}, \delta_{n-1,n} - \delta_{n-1,n}^0]^T, \quad (7)$$

alebo

$$\bar{x}_i = [\omega_{in}, \delta_{in} - \delta_{in}^0]^T \quad (8)$$

a potom:

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_s]^T, \quad (9)$$

kde

$$\delta_{in} = \delta_i - \delta_n \quad \omega_{in} = \omega_i - \omega_n$$

a δ_{in}^0 sú riešenia nelineárnej sústavy rovníc:

$$P_{ei}(\delta_{in}^0) = P_{mi} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Riešenie sústavy rovníc (10) získame metódou Newton – Raphson. Toto riešenie predstavuje stabilné rovnovážne stavy ES pred pôsobením poruchy. S ohľadom na (8) môžeme zapísať model ES so zhodným tlmením ako sústavu diferenciálnych rovníc [7]:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_i &= \begin{bmatrix} -\lambda & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}_i + \begin{bmatrix} -a_i \\ 0 \end{bmatrix} \Phi_i(y_i) + \bar{h}_i(\bar{x}), \\ y_i &= [0, 1] \bar{x}_i \end{aligned} \quad (11)$$

kde $\Phi_i(y_i)$ je nelineárna funkcia

$$\Phi_i(y_i) = \sin(y_i + \delta_{in}^0) - \sin \delta_{in}^0 \quad (12)$$

a vektor $\bar{h}_i(\bar{x})$ je

$$\bar{h}_i(\bar{x}) = \left[b_i f_i + \sum_{j=1}^s M_n^{-1} f_{nj} - M_i^{-1} f_{ij} \right]. \quad (13)$$

Ostatné zavedené symboly vyrátame nasledovne:

$$a_i = (M_n^{-1} + M_i^{-1}) A_{in} \sin \Theta_{in}, \quad (14a)$$

$$b_i = (M_n^{-1} - M_i^{-1}) A_{in} \cos \Theta_{in}, \quad (14b)$$

$$f_i = \cos \delta_{in} - \cos \delta_{in}^0, \quad (14c)$$

$$f_{ij} = A_{ij} [\cos(\delta_{ij} - \Theta_{ij}) - \cos(\delta_{ij}^0 - \Theta_{ij})]. \quad (14d)$$

Príklad výpočtu popísaných modelov elektrizačnej sústavy zloženej z troch synchronných generátorov je uvedený v [7] str. 24.

Implementácia dynamického modelu ES

Na základe analýzy a matematického opisu modelu ES uvedeného v predchádzajúcom texte sme sa rozhodli implementovať matematický model elektrizačnej sústavy podľa sústavy rovníc (3) typu $n-1$.

Uvedený matematický model bude pre sústavu troch generátorov podľa obr.1 zapísaný nasledovne:

$$\frac{d\delta_1}{dt} = \omega_1$$

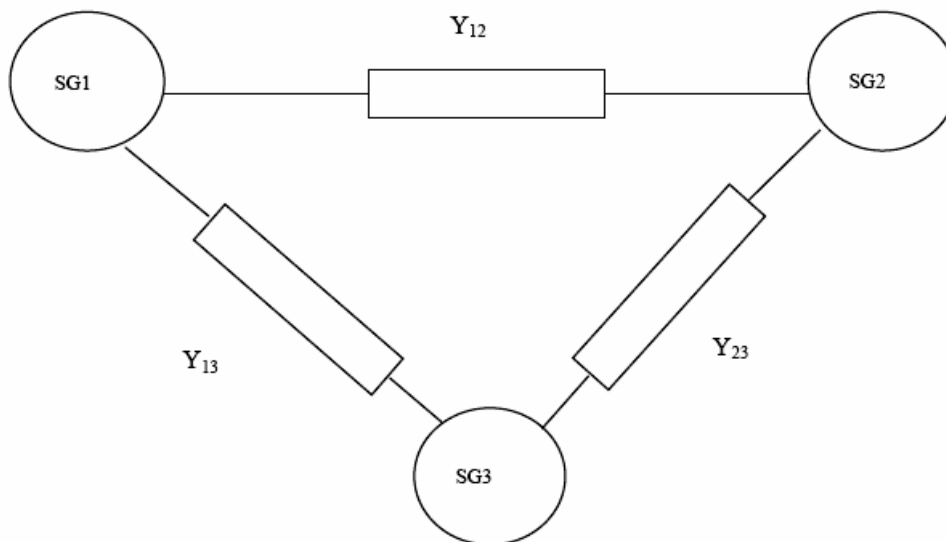
$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{-D_1}{M_1} \omega_1 + P_{m1} - E_1^2 Y_{11} \cos \Theta_{11} + E_1 E_2 Y_{12} \cos(\delta_1 - \delta_2 - \Theta_{12}) + E_1 E_3 Y_{13} \cos(\delta_1 - \delta_3 - \Theta_{13})$$

$$\frac{d\delta_2}{dt} = \omega_2$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{-D_2}{M_2} \omega_2 + P_{m2} - E_2^2 Y_{22} \cos \Theta_{22} + E_2 E_1 Y_{21} \cos(\delta_2 - \delta_1 - \Theta_{21}) + E_2 E_3 Y_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3 - \Theta_{23})$$

$$\frac{d\delta_3}{dt} = \omega_3$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{-D_3}{M_3} \omega_3 + P_{m3} - E_3^2 Y_{33} \cos \Theta_{33} + E_3 E_1 Y_{31} \cos(\delta_3 - \delta_1 - \Theta_{31}) + E_3 E_2 Y_{32} \cos(\delta_3 - \delta_2 - \Theta_{32})$$



Obr. 1. Sústava troch synchronných generátorov

Algoritmus dynamického číslicového modelu viacstrojovej elektrizačnej sústavy pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. Potrebujeme zistiť stav systému pred pôsobením poruchy, to značí, že je nutné na základe zadaných parametrov, ako sú náhradné záťaže, napätia a výkony na svorkách synchronných generátorov, vypočítať ustálený stav sústavy, čo predstavuje riešiť nelineárnu sústavu rovníc, výsledkom ktorej sú absolútne uhly rotorov jednotlivých generátorov δ^0 v ustálenom stave, kedy platí $P_{ei}(\delta_{in}^0) = P_{mi}$.
2. Riešiť sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc počas pôsobenia poruchy. V tomto prípade je porucha simulovaná zmenou matice vodivosti (prenosových admitancií).
3. Následne riešiť spomínanú sústavu s parametrami poporuchového stavu.

Popísaný algoritmus sme implementovali v prostredí MATLAB.

Výpočet matice vodivosti

Matica vlastných a vzájomných vodivosti je dôležitou súčasťou nášho modelu, pretože nesie informáciu o štruktúre reálneho systému. Pre simuláciu prechodových procesov v ES potrebujeme vypočítať práve tri takéto matice. Prvá matica popisuje štruktúru systému pred poruchou, druhá počas trvania poruchy a tretia matica popisuje štruktúru systému po poruche. Z uvedeného je zrejmé, že potrebujeme dostatočne efektívny algoritmus na výpočet týchto matíc. Pre náš model sme použili algoritmus výpočtu vodivostnej matice pomocou techniky riedkych matíc, ktorý bol popísaný v [4]. Tento algoritmus využíva na výpočet vodivostnej matice rovnicu (15), ktorá je založená na Kirchoffovom zákone.

$$Y = Z_d^{-1} - Z_d^{-1} \cdot M^T \cdot Y_u^{-1} \cdot M \cdot Z_d^{-1}, \quad (15)$$

kde

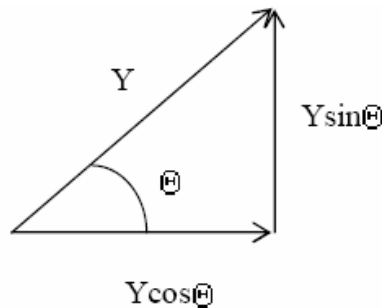
$$Y_u = M \cdot Z_d^{-1} \cdot M^T, \quad (16)$$

Z_d - komplexná diagonálna matica impedancií vetiev,

M - incidenčná matica,

Y_u - matica uzlových vodivosti a vypočíta sa podľa rovnice (16).

Výsledkom výpočtu je matica vodivosti v zložkovom tvare, ktorú treba upraviť na dve zložky, a to maticu absolútnych hodnôt vodivosti Y_{ij} a ďalšiu maticu, ktorá predstavuje fázu vodivosti Θ_{ij} medzi i -tym a j -tym synchronným generátorom, tak, ako ukazuje obrázok 2.



Obr. 2. Princíp výpočtu absolútnej hodnoty vodivosti

Výpočet ustáleného stavu

Pred začatím simulácie dynamických procesov v ES je potrebné vypočítať počiatočné podmienky pre metódu Runge – Kutta a teda nájsť ustálený stav systému. Ako bolo spomenuté, pre získanie ustáleného stavu systému je nutné riešiť sústavu diferenciálnych rovníc (10) metódou Newton – Raphson, ktorej úplný podrobný popis je možné nájsť napr. v [3], [9] alebo [2].

Pri riešení ustálených stavov ES pomocou metódy Newton – Raphson potrebujeme vyrátať Jacobiho maticu z výrazu $P_{mi} - P_{ei}$, ktorá predstavuje parciálne derivácie podľa $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$,

$$\text{kde } P_{ei} = \sum_{j=1}^n A_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \Theta_{ij}).$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial(P_{m1} - P_{e1})}{\partial\delta_1}(\bar{\delta}), \frac{\partial(P_{m1} - P_{e1})}{\partial\delta_2}(\bar{\delta}), \dots, \frac{\partial(P_{m1} - P_{e1})}{\partial\delta_n}(\bar{\delta}) \\ \frac{\partial(P_{m2} - P_{e2})}{\partial\delta_1}(\bar{\delta}), \frac{\partial(P_{m2} - P_{e2})}{\partial\delta_2}(\bar{\delta}), \dots, \frac{\partial(P_{m2} - P_{e2})}{\partial\delta_n}(\bar{\delta}) \\ \vdots \\ \frac{\partial(P_{mn} - P_{en})}{\partial\delta_1}(\bar{\delta}), \frac{\partial(P_{mn} - P_{en})}{\partial\delta_2}(\bar{\delta}), \dots, \frac{\partial(P_{mn} - P_{en})}{\partial\delta_n}(\bar{\delta}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Na vytvorenie Jacobiho matice v MATLABe slúži funkcia ***jacobian*** [11] v takomto tvare:

$$J = \text{jacobian}(L, v);$$

kde L predstavuje vektor funkcií a v vektor neznámých.

Následne môžeme prejsť zo sústavy nelineárnych rovníc na riešenie sústavy lineárnych rovníc. Riešenie n lineárnych rovníc o n neznámých riešime pomocou funkcie ***gmres***, ktorá tieto rovnice rieši iteračnou metódou. Princíp funkcie je nasledovný:

Majme maticovú rovnicu $AX = B$, potom hľadaný vektor X určíme týmto jednoduchým zápisom:

$$X = \text{gmres}(A, B);$$

kde A je matica a B je vektor pravých strán. [11]

Počiatkové podmienky riešenia metódy Newton - Raphson sú zadané ako vektor hodnôt $\bar{\delta} = (0, 0, \dots, 0)$. Vstupné údaje pre testovanie navrhnutého algoritmu pochádzajú z [6]. Metóda pre dané počiatkové podmienky konverguje.

V tabuľke 1 sú uvedené aproximácie $\bar{\delta}^{(k)}$, $k = 0 \div 6$. Z tabuľky je jasne vidieť, že metóda Newton - Raphson konvergovala už po 4. iterácii s platnosťou na 13 číslic. Väčším počtom iterácií by sme už nedosiahli zvýšenia presnosti.

KONVERGENCIA METÓDY NEWTON - RAPHSON

Tabuľka 1

k	$\bar{\delta}_1^{(k)}$	$\bar{\delta}_2^{(k)}$	$\bar{\delta}_3^{(k)}$
0	0,000000000000000	0,000000000000000	0,000000000000000
1	0,13258974780990	0,21396148348043	0,2029747236296
2	0,13415910830935	0,21812585540888	0,20664290670218
3	0,13415956446431	0,21812867450229	0,20664504404330
4	0,13415956446441	0,21812867450359	0,20664504404405
5	0,13415956446441	0,21812867450359	0,20664504404405
6	0,13415956446441	0,21812867450359	0,20664504404405

Výpočet prechodových procesov

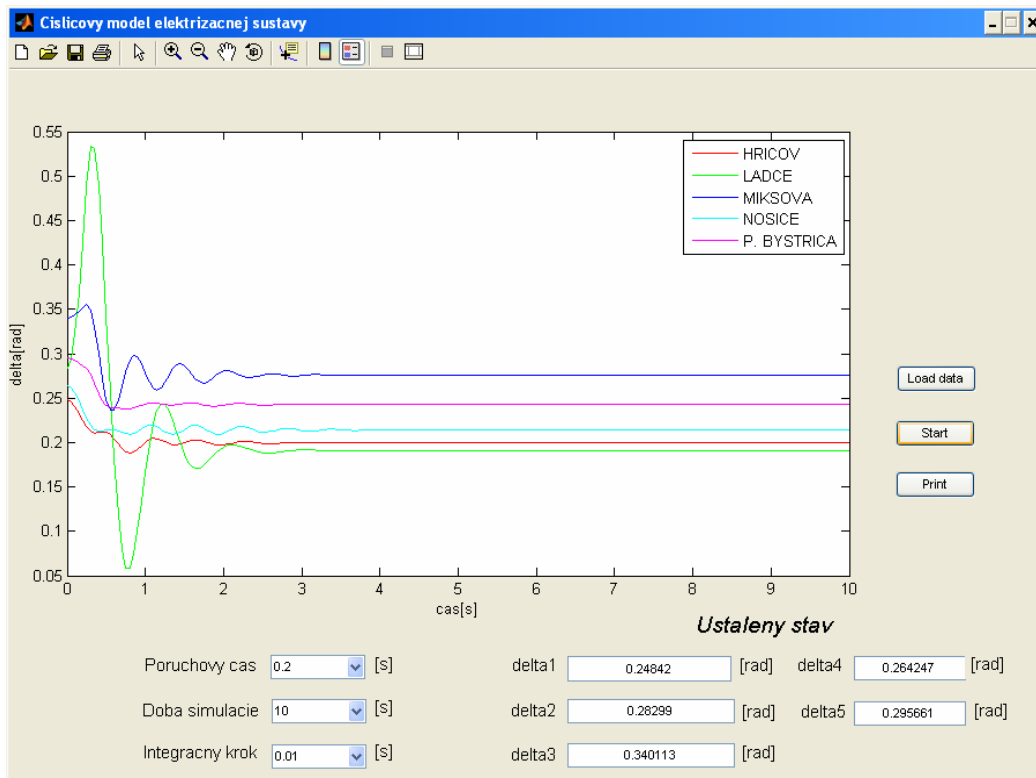
Simulácia dynamiky procesov prebiehajúcich v ES spočíva v riešení sústavy nelineárnych diferenciálnych rovníc 2. rádu počas pôsobenia poruchy. Na základe vykonanej analýzy sme sa rozhodli použiť metódu Runge – Kutta 4. rádu.

Je možné používať aj metódy Runge - Kutta vyššieho ako 4. rádu, ktoré sú teoreticky presnejšie, avšak výpočet je komplikovanejší. Pritom je chyba metódy Runge - Kutta štvrtého rádu len $O(h^4)$, jedná sa o relatívne presnú metódu. Podrobnejší opis a odvodenie postupov získania rovníc pre metódu Runge – Kutta možno nájsť napr. v [2], [9].

Z analýzy metódy Runge – Kutta vyplýva, že sme schopní riešiť len diferenciálne rovnice prvého rádu. Preto pre výpočet prechodových procesov v ES využijeme rozklad nelineárnej diferenciálnej rovnice druhého rádu (1) na sústavu dvoch diferenciálnych rovníc prvého rádu (3). V MATLABe sme využili implementovanú funkciu *ode45()*, ktorá je založená na metóde Runge – Kutta 4. a 5. rádu, jej použitie je veľmi dobre popísané v používateľskej príručke tohto systému. [11]

Grafické používateľské rozhranie

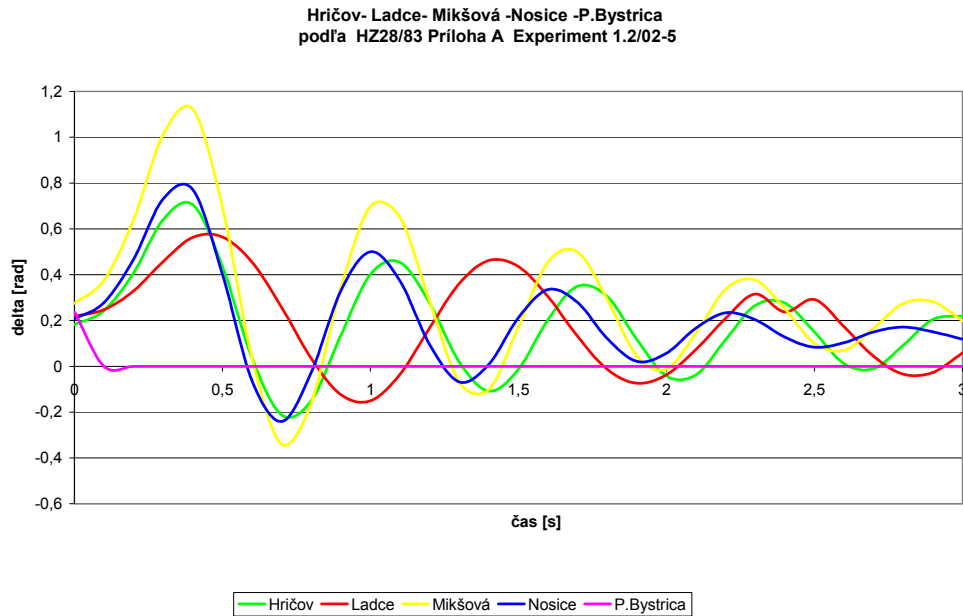
Ako sme už spomínali, model je implementovaný v prostredí MATLAB (MATrix LABoratory), ktoré ponúka pomerne jednoduché rozhranie na tvorbu vizualizácie a zároveň obsahuje veľké množstvo matematických funkcií. Tieto funkcie sme s výhodou využili pri tvorbe modelu, vďaka čomu odpadla potreba programovať ich vlastnými silami. Na obr. 3 je okno vytvoreného modelu. Pre simuláciu je nutné nahráť súbor so vstupnými premennými, nastaviť parametre simulácie (poruchový čas, doba simulácie, integračný krok) a spustiť simuláciu.



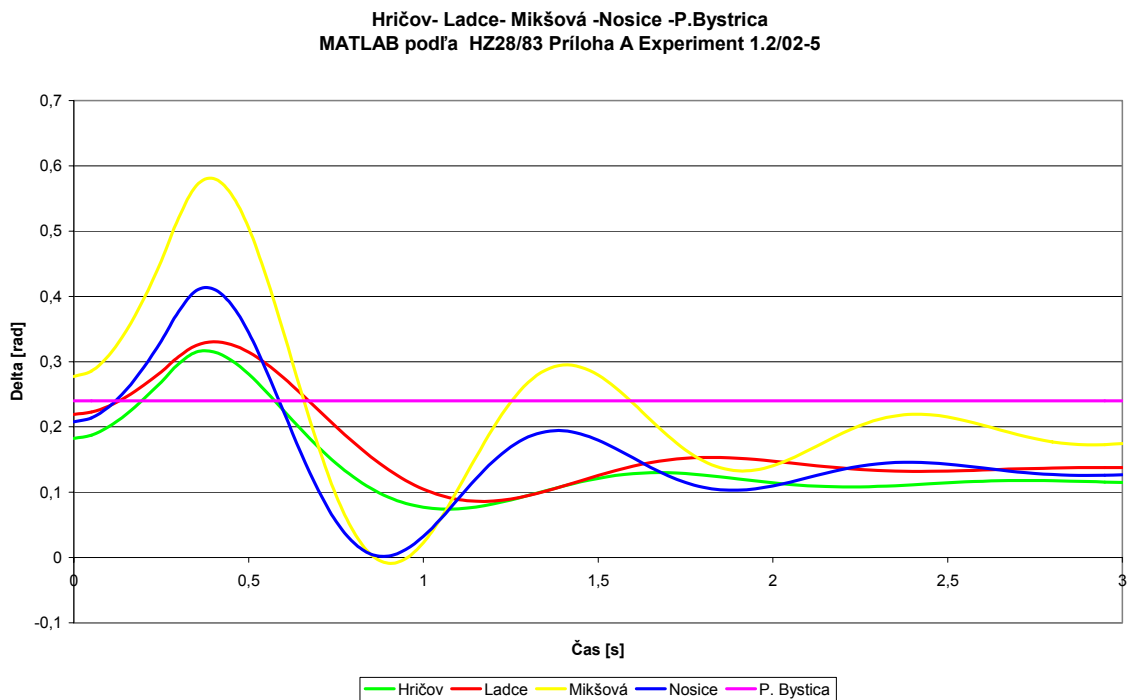
Obr. 3. Okno aplikácie

Testovanie číslicového modelu ES

Model je testovaný pomocou vstupných dát z výskumnej práce [6] z roku 1983, ktorá riešila analýzu stability elektrizačnej sústavy pri zadaných poruchách. V nasledujúcich grafoch sú porovnané prechodové charakteristiky troj- a päť-generátorových sústav získané z dát [6] a vypočítané našim modelom.

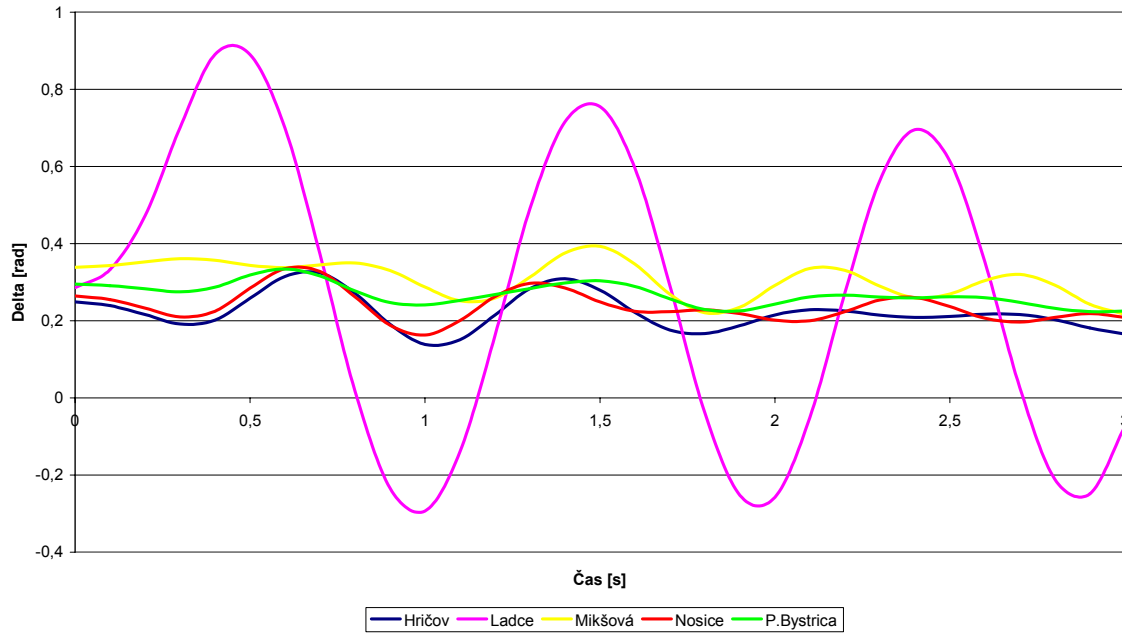


Obr. 4. Sústava 5 generátorov podľa [6] test č. 1



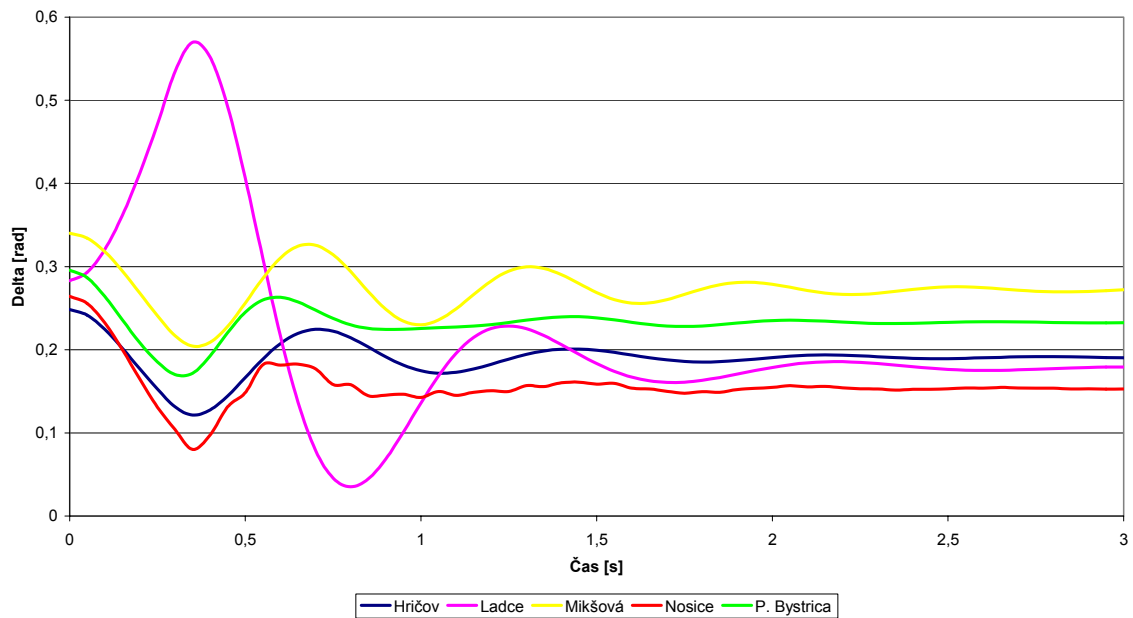
Obr. 5. Sústava 5 generátorov model Matlab test č. 1

Hričov - Ladce - Mikšová - Nosice - Považská Bystrica
Podľa HZ 28/83 Príloha A Experiment 1.3.1/01



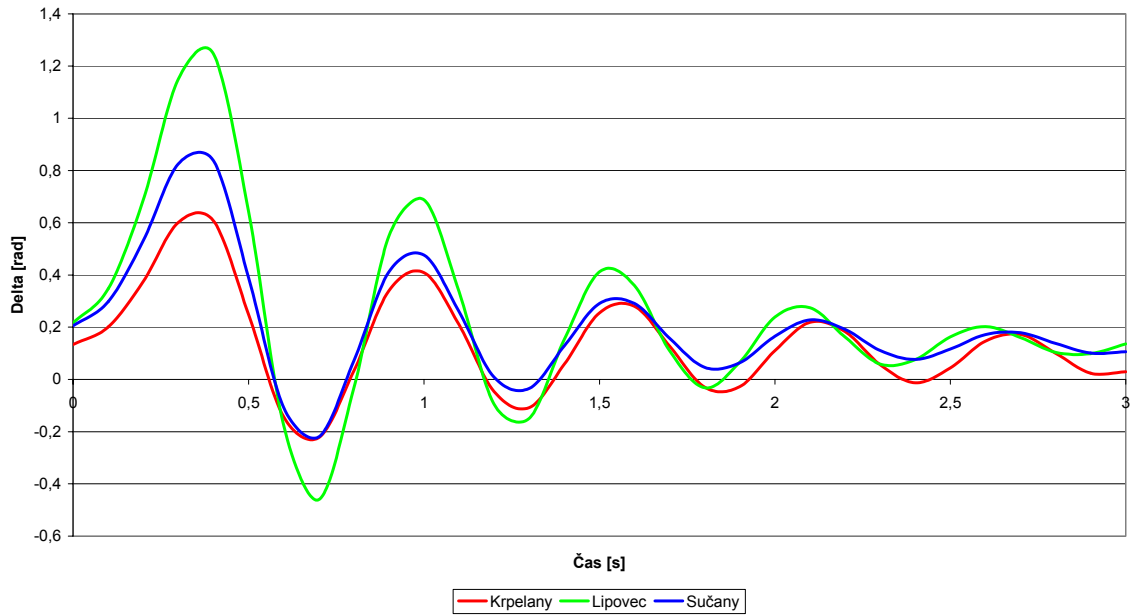
Obr. 6. Sústava 5 generátorov podľa [6] test č. 2

Hričov - Ladce - Mikšová - Nosice - Považská Bystrica
MATLAB Podľa HZ 28/83 Príloha A Experiment 1.3.1/01



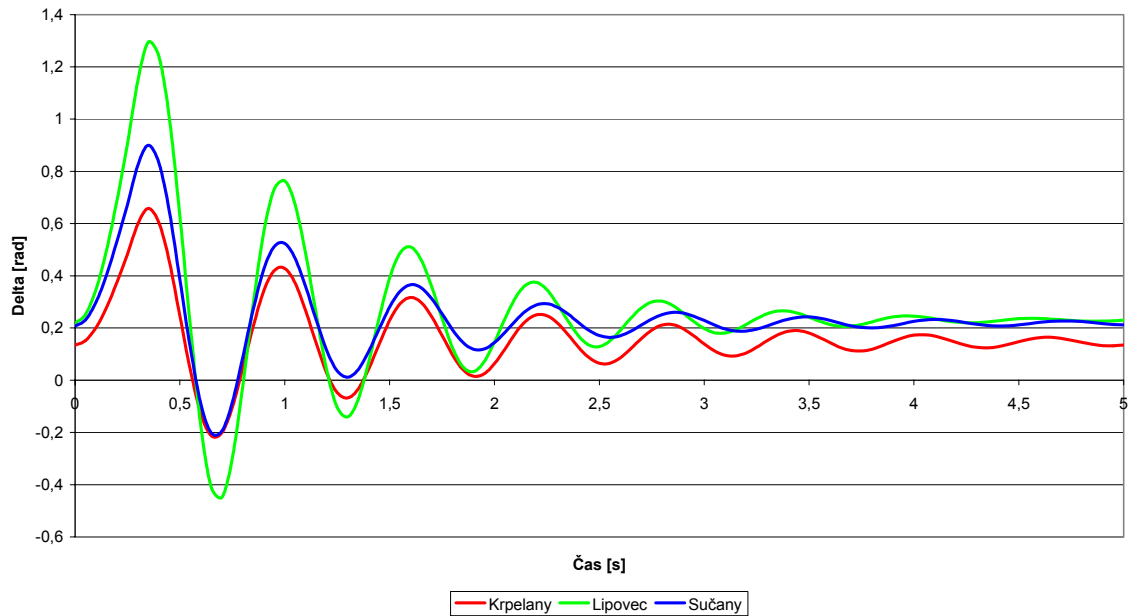
Obr. 7. Sústava 5 generátorov model Matlab test č. 2

Krpelany - Lipovec - Sučany
podľa HZ č.28/83 príloha B



Obr. 8. Sústava 3 generátorov podľa [6] test č. 3

Krpelany - Lipovec - Sučany
MATLAB podľa HZ č.28/83 príloha B



Obr. 9. Sústava 3 generátorov model Matlab test č. 3

POČIATOČNÉ STAVY PRE TEST č. 1

Tabuľka 2

	Hričov	Ladce	Mikšová	Nosice	P. Bystica
MATLAB	0,182405	0,219209	0,277232	0,207682	0,239842
HZ 28/83	0,181856	0,218627	0,275438	0,206991	0,238456

POČIATOČNÉ STAVY PRE TEST č. 2

Tabuľka 3

	Hričov	Ladce	Mikšová	Nosice	P. Bystrica
MATLAB	0,24842	0,28299	0,340113	0,264247	0,295661
HZ 28/83	0,248761	0,285845	0,338874	0,26409	0,294822

POČIATOČNÉ STAVY PRE TEST č. 3

Tabuľka 4

	Krpelany	Lipovec	Sučany
MATLAB	0,13416	0,218129	0,206645
HZ 28/83	0,133782	0,216672	0,205283

Záver

Ako môžeme vidieť v tabuľkách 2, 3 a 4, hodnoty počiatkových stavov sa líšia rádovo až na tretom desatinnom mieste, z čoho vyplýva, že náš model v tejto časti pracuje správne.

Rozdiel v prechodových charakteristikách vytvorených z dát výskumnej práce [6] a vytvorených modelom je zjavný aj napriek tomu, že boli vytvorené z rovnakých vstupných dát. Charakteristiky vytvorené našim modelom pri 5 generátorovej sústave majú približne polovičné hodnoty amplitúd a zhruba polovičnú frekvenciu kmitov. Z rovnice (1) je zrejmé, že veľkosť prvej amplitúdy určuje okamžitý rozdiel výkonu turbíny a skratového výkonu, a taktiež frekvencia kmitov sa dá ovplyvniť hodnotou koeficientov inercie a tlmenia pri prvej a druhej derivácii absolútneho uhla rotora δ .

Z uvedeného vyplýva, že vzhľadom na použité testovacie dáta pri výpočte ustálených stavov pracuje náš model správne, čiže túto časť možno do určitej miery považovať za validovanú. Uvedené testy však odhalili relevantné odchýlky hodnôt pri výpočte prechodových charakteristík. Vhodným prostriedkom k odstráneniu týchto odchýlok sa javí použitie dynamického modelu ES realizovaného v programe MODES (tento model je validovaný na reálnej ES Slovenska) za účelom získania ďalších testov pre porovnanie validity testovacích dát z práce [6]. Tento postup by nám mal pomôcť odhaliť chyby a zároveň validovať náš model.

Popísaný dynamický nelineárny model viacstrojovej ES je súčasťou výskumu dizertačnej práce jedného z autorov (Kopček), ktorej hlavným cieľom je vývoj algoritmu inteligentnej ochrany synchronných generátorov. Tento algoritmus má slúžiť na vypínanie generátorov v prípade takej poruchy, kedy už generátor nie je schopný samovoľne sa vrátiť do synchronných otáčok.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] BIALEK, J., W., BUMBY, J., R., MACHOWSKI, J. *Power system dynamics and stability*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 1997. ISBN 0-471-97174-X
- [2] ČERNÁ, R., MACHALICKÝ, M., VOGEL, J., ZLATNÍK, Č. *Základy numerické matematiky a programování*. Praha: SNTL, 1987.
- [3] FINK, K., K., MATHEWS, J., H. *Numerical methods using MATLAB*. 4th edition, New Jersey, USA: Prentice – Hall Inc, 2004. 167p. ISBN 0-13-065248-2
- [4] GABČO, L., MUDRONČÍK, D. *Conductivity matrix computation via sparse matrices techniques*. Bratislava: Elektrotechnický časopis 45, 1994. 190p.
- [5] KOPČEK, M. *Optimalizácia procesov elektrizačnej sústavy na primárnej a sekundárnej úrovni riadenia*. Pisomná práca k dizertačnej skúške, Trnava: ÚIAM MtF STU, 2008. 42 s.
- [6] BÍZIK, J., a kol. *Analýza stability procesov daného elektrizačného systému pri zadaných poruchách*. Výskumná práca. Bratislava: STU, 1983.
- [7] MUDRONČÍK, D. *Analýza stability procesov zložitej elektrizačnej sústavy metódou vektorovej funkcie Ljapunova*. Kandidátska dizertačná práca. Bratislava: STU, 1979.
- [8] PAI, M., A. *Power system stability – Analysis by the direct method of Lyapunov*. Amsterdam: North – Holland Publishing Company, 1981. ISBN 0-444-86310-9
- [9] RALSTON, A. *Základy numerické matematiky*. Praha: Academia, 1978. 380p. ISBN 0-13-065248-2
- [10] SAUER, P., W., PAI, M., A. *Power system dynamics and stability*. 1st edition, New Jersey, USA: Prentice – Hall Inc, 1997. ISBN 0-13-678830-0
- [11] Manuálové stránky programu MATLAB. Dostupné z <<http://www.mathworks.com>>