

Model bodovej kinetiky jadrového reaktora v MATLAB/Simulink

Point kinetics model of reactor in MATLAB/Simulink

Michal Kebísek, UIAM MTF STU, Trnava

Igor Halenár, UIAM MTF STU, Trnava

Abstract: The article presents the design and implementation of point kinetics model of a nuclear reactor. The model was implemented and tested in simulation environment MATLAB/Simulink. Presented work was carried out under the project “Increase of Power Safety of the Slovak Republic” supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.

Key words: reactor point kinetics model, MATLAB/Simulink

Abstrakt: Článok sa zaoberá návrhom a implementáciou modelu bodovej kinetiky jadrového reaktora. Model bol implementovaný a otestovaný v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink. Prezentovaná problematika bola realizovaná v rámci projektu “Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR“, ktorý je podporovaný Operačným programom Výskum a vývoj financovaným Európskym fondom regionálneho rozvoja.

Kľúčové slová: model bodovej kinetiky reaktora, MATLAB/Simulink

1. Úvod

Článok prezentuje čiastkové kroky realizované v rámci projektu „Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR“ (ITMS kód 26220220077). Projekt sa zaoberá aplikovaným výskumom zvyšovania bezpečnosti energetických premien reaktora VVER-440 a predlžovaním životnosti významných komponentov energetického bloku. Jeho súčasťou je aj využitie fuzzy logiky pre diagnostické systémy blokov JE.

Základné ciele projektu sú:

- a) Zvýšiť výpovednú schopnosť inštalovaných systémov prevádzkovej diagnostiky hlavných cirkulačných čerpadiel (SHCC) v lokalitách JE Bohunice a JE Mochovce. Zlepšiť

podporu operátorov systémov pri klasifikácii stavu HČČ a rozšíriť systémy CSLBB pre 3. a 4. blok JE.

- b) Inovovať systémy diagnostiky voľných častí v primárnom okruhu reaktora s cieľom zvýšiť ich presnosť a spoľahlivosť pri detekcii a identifikácii voľných častí. Inovovať systém diagnostiky anomálnych situácií chemických režimov primárneho a sekundárneho okruhu reaktora s cieľom zvýšiť presnosť a spoľahlivosť systému ako podporného prostriedku pre rozhodovanie operátora na základe doterajších prevádzkových skúseností. Navrhnuť a odskúšať spoľahlivú metodiku včasného odhalenia degradácie monitorov prietoku napájacej vody do PG, za VTO a pary z PG s využitím techník výpočtovej inteligencie. Navrhnuť a odskúšať spoľahlivú metodiku včasného odhalenia vadných in-core detektorov (termočlánkov a samonapájacích detektorov) s využitím techník výpočtovej inteligencie pri spracovaní signálov v lineárnej i nelineárnej oblasti.
- c) Analyzovať možnosti počítačovej simulácie pri optimalizácii procesov diagnostiky a testovania zariadení a systémov JE počas uvádzania do prevádzky. Navrhnuť počítačový model pre simulovanie prechodových procesov blokov JE VVER 440 so zameraním na JE EMO34.

2. Model jadrového reaktora

2.1. Matematický model jadrového reaktora

Model jadrového reaktora bol vytvorený na základe matematických rovníc opisujúcich správanie sa vybraných častí v reaktore. Prvými dôležitými rovnicami sú rovnice reaktorovej kinetiky:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

kde

ρ – reaktivita v reaktorovej komore,

β – zlomky oneskorených neutrónov,

Λ – stredný čas medzi emisiou neutrónu a jeho zachytením v jadre a vyvolaním štiepenia,

n – množstvo neutrónov v reaktore v pomere k počiatočnému stavu,

λ – konštanty oneskorenia jadier,

C – počet jadier, z ktorých vzniknú oneskorené neutróny v pomere k počiatočnému stavu.

Rovnica (1) je rovnica neutrónov v jadrovom reaktore. Vyjadruje počet neutrónov v reaktore v závislosti na aktuálnych podmienkach. Rovnica (2) udáva počet prekursorov v reaktore, tj. počet atómov iných rádioaktívnych prvkov vzniknutých pri procese štiepenia paliva, ktoré ovplyvňujú štiepnu reakciu.

Rovnica bodovej kinetiky reaktora predstavuje stavový model reaktora, ktorý je možné implementovať v prostredí MATLAB/Simulink. Úpravou odstaneme rovnicu bilancie neutrónov:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)}{\Lambda} n(t) - \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (3)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (4)$$

Z týchto šiestich bilančných rovníc pre prekursorov je možné napísať nasledujúci bodový kinetický model:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)}{\Lambda} n(t) - \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\vec{C}(t)}{dt} = \frac{\vec{\beta}}{\Lambda} n(t) - \vec{\lambda} \cdot \vec{C}(t) \quad (6)$$

kde

\vec{C} je stĺpcový vektor obsahujúci koncentráciu prekursorov každej skupiny,

β je stĺpcový vektor obsahujúci skupiny oneskorených neurónov,

$\vec{\lambda}$ je stĺpcový vektor konštanty oneskorenia jadier jednotlivých skupín.

Posledná časť rovnice (6) $\vec{\lambda} \cdot \vec{C}(t)$ predstavuje skalárny súčin dvoch vektorov. Jej výsledná reprezentácia je nasledovná:

$$\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6] \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} = \vec{\lambda}^T \times \vec{C} \quad (7)$$

Na základe tohto je možné napísať bodový kinetický model nasledovne:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)}{\Lambda} n(t) - \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + \vec{\lambda}^T \times \vec{C}(t) \quad (8)$$

$$\frac{d\vec{C}(t)}{dt} = \frac{\vec{\beta}}{\Lambda} n(t) - \vec{\lambda} \cdot \vec{C}(t) \quad (9)$$

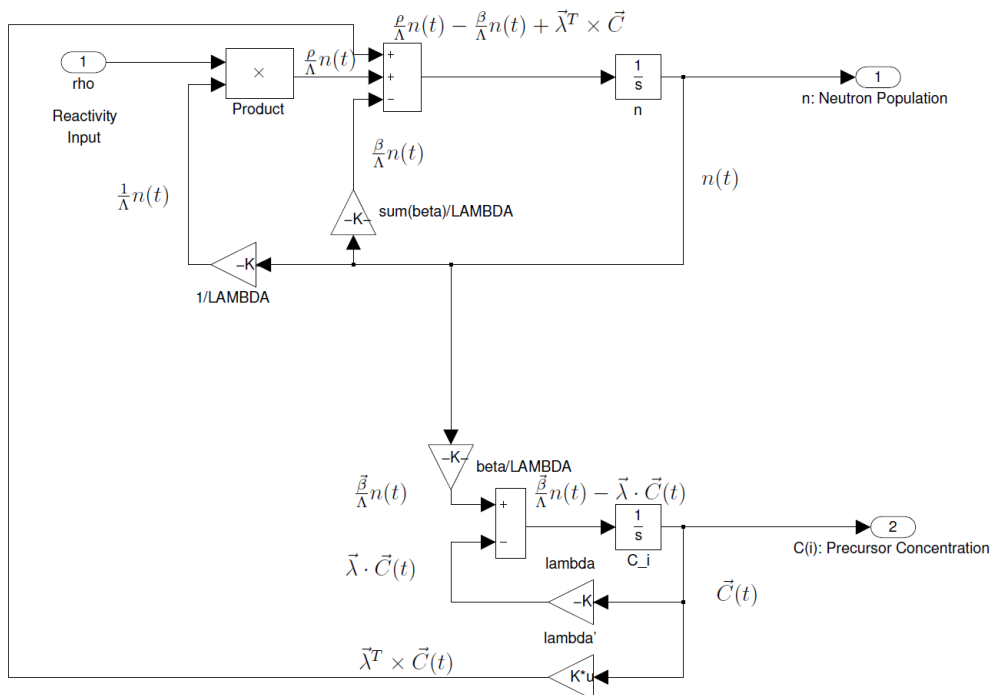
Na implementáciu modelu v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink boli použité nasledovné bloky:



Obrázok 1: Použité Simulink bloky

2.2. Implementácia modelu jadrového reaktora

Model jadrového reaktora bol implementovaný v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink. Blok bodovej kinetiky slúži na výpočet počtu neutrónov v modeli jadrového reaktora. Vstupom je reaktivita v jadrovom reaktore $\rho(t)$ a výstupom je počet neutrónov $n(t)$ a počet prekursorov $C_i(t)$. Využívajú na to rovnice (8) a (9). Blok bodovej kinetiky je zobrazený na obrázku 2.



Obrázok 2: Model bodovej kinetiky jadrového reaktora

3. Testovanie modelu

Za účelom testovania bolo potrebné nastaviť potrebné konštanty a inicializačné hodnoty modelu. Tu sú prezentované kinetické parametre pre U^{235} :

$$\Lambda = 35ms$$

$$\vec{\beta} = \begin{bmatrix} 0.00021 \\ 0.00142 \\ 0.00128 \\ 0.00257 \\ 0.00075 \\ 0.00027 \end{bmatrix}$$

$$\vec{\lambda} = \begin{bmatrix} 0.0124 \\ 0.0305 \\ 0.1110 \\ 0.3010 \\ 1.1400 \\ 3.0100 \end{bmatrix} \frac{1}{s}$$

$$n(0) = 1$$

Pre bilančnú rovnicu prekurzorov je rovnovážna koncentrácia nasledovná:

$$\frac{d\vec{C}(t)}{dt} = 0 = \frac{\vec{\beta}}{\Lambda} n(0) - \vec{\lambda} \cdot \vec{C}(0) \quad (10)$$

$$\frac{\vec{\beta}}{\Lambda} n(0) = \vec{\lambda} \cdot \vec{C}(0) \quad (11)$$

$$\vec{C}(0) = \frac{\vec{\beta}}{\vec{\lambda}} \frac{n(0)}{\Lambda} \quad (12)$$

Definované parametre boli zadané do programu MATLAB:

```
LAMBDA = 0.0035
```

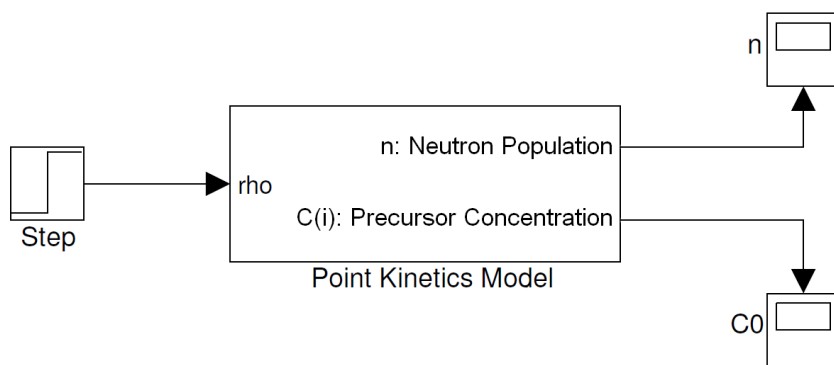
```
beta = [0.00021 0.00142 0.00128 0.00257 0.00075 0.00027]'
```

```
lambda = [0.0124 0.0305 0.111 0.301 1.14 3.01]'
```

```
N0=1.0
```

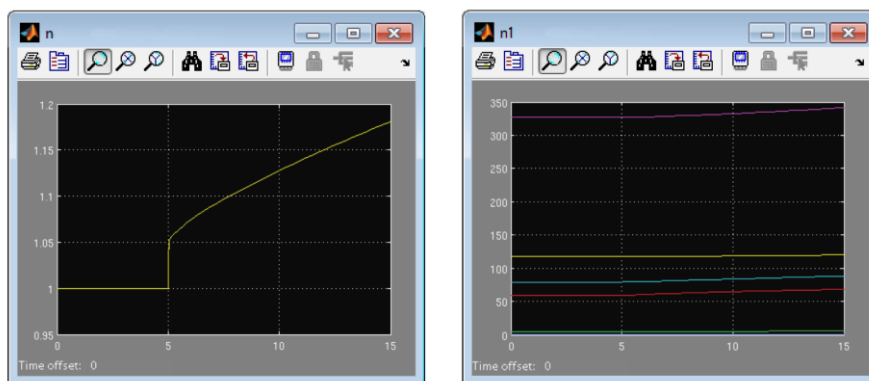
```
C0=(beta./lambda)*(N0/LAMBDA)
```

Testovací prípad predstavuje simuláciu vyťahovania regulačnej tyče, ktorá predstavuje reaktivitu 0.05\$ kritického reaktora. K tomu je využitý blok Step, pripojený na vstup. Vstupná hodnota reaktivity bola $\rho=0(k_{eff}=1)$ a po 5 sekundách sa táto hodnota zmenila na $\rho=0.05\beta$. Testovací model je znázornený na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 3: Testovací model

Výsledky simulácie sú znázornené na obrázku 4. Ľavá strana obrázka 4 znázorňuje časový vývoj neutrónovej populácie a pravá strana obrázka zobrazuje časový vývoj prekurzorovej populácie pre každú skupinu.



Obrázok 4: Výsledky simulácie

Po zvýšení reaktivity, prekursorová populácia začne narastať, každá skupina svojím vlastným tempom, určeným jej konštantou oneskorenia jadier. Ich dynamika je príliš pomalá na to, aby si bolo možné všimnúť okamžité zmeny reaktivity.

Na druhej strane, neutrónová populácia reaguje okamžite na zmeny reaktivity a to z dôvodu rýchlej dynamiky emisie neutrónov. Neutrónová populácia začne rýchlo narastať a vytvára sa nerovnováha medzi neutrónovou populáciou a koncentrácia prekursorov. Po niekoľkých okamihoch sa nerovnováha rastu neutrónovej populácie začína spomaľovať a ďalej pokračuje v raste tempom koncentrácie prekursorov.

Tento inicializačný skok v populácii neutrónov je známy ako okamžitý skok a môže byť aproximovaný, za predpokladu $\frac{dC_i}{dt} = 0$, v momente kritického množstva reaktivity.

Implementovaný model bodovej kinetiky jadrového reaktora je možné používať pri ďalších experimentoch.

4. Záver

Článok sa zaoberá návrhom a implementáciou modelu bodovej kinetiky jadrového reaktora. Model bol implementovaný a otestovaný v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink. Prezentovaná problematika bola realizovaná v rámci projektu „Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR“.

5. Pod'akovanie / Acknowledgement



This publication is the result of implementation of the project: "Increase of Power Safety of the Slovak Republic"(ITMS: 26220220077) supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



6. Zoznam bibliografických odkazov

- (1) ARAB-ARIBEIK, H., SETAYESHI, S. *An adaptive-cost/function optimal controller design for a PWR nuclear reactor*. In *Annals of Nuclear Energy*, 2003, č. 30, s. 739-754.
- (2) DOE Fundamentals Handbook: *Nuclear Physics and Reactor Theory Volume 2. U.S. Department of Energy*. January 1993. Dostupné na internete < <http://www.hss.doe.gov/nuclearsafety/techstds/docs/handbook/h1019v2.pdf> >.
- (3) KHORRAMABADI, S. S., BOROUSHAKI, M., LUCAS, C. *Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation*. In *Annals of Nuclear Energy*, 2008, č. 35, s. 2051-2058.
- (4) MYDLO, P. *Fuzzy regulácia pre nelineárne spojité technologické procesy*. Dizertačná práca. Trnava STU, 2012. 80 s.

7. Adresa autorov:

Michal Kebísek, Ing., PhD.
Materiálovotechnologická fakulta STU
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie
a matematiky
Hajdóczyho 1
917 24 Trnava
michal.kebisek@stuba.sk

Igor Halenár, Ing., PhD.
Materiálovotechnologická fakulta STU
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie
a matematiky
Hajdóczyho 1
917 24 Trnava
igor.halenar@stuba.sk