Hodnotenie vlastností modelov

Models characteristics assessment

Martin Juhás, UIAM MTF STU, Trnava

Bohuslava Juhásová, UIAM MTF STU, Trnava

Abstract: In this contribution an issue of models characteristics assessment in the context of a project "Increasing of the Slovak Republic Energy Safety" (ITMS code: 26220220077) and its activity "A fuzzy logic utilization for diagnostic systems of nuclear power blocks" in order to research of safety increasing of energy transformation in reactor VVER-440 applying and life extending of significant components of the energy block, is presented. As a part of the assessment criteria of considered models properties such as stability, controllability and observability are specified.

Key words: model characteristic, stability, observability, controllability

Abstrakt: V článku je prezentovaná problematika hodnotenia vlastností modelov v súvislosti s projektom Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR (ITMS kód 26220220077) aktivity Využitie fuzzy logiky pre diagnostické systémy blokov JE s cieľom aplikovať výskum zvyšovania bezpečnosti energetických premien reaktora VVER-440 a predlžovanie životnosti významných komponentov energetického bloku. Ako súčasť kritérií hodnotenia uvažovaných modelov sú špecifikované vlastnosti stabilita, pozorovateľnosť a riaditeľnosť.

Kľúčové slová: vlastnosť modelu, stabilita, pozorovateľnosť, riaditeľnosť

1. Úvod

Článok sa zaoberá problematikou hodnotenia vlastností modelov v súvislosti s projektom Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR aktivity Využitie fuzzy logiky pre diagnostické systémy blokov JE kde cieľom je:

a) Zvýšiť výpovednú schopnosť inštalovaných systémov prevádzkovej diagnostiky hlavných cirkulačných čerpadiel (SHCČ) v lokalitách JE Bohunice a JE Mochovce. Zlepšiť podporu operátorov systémov pri klasifikácii stavu HCČ 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. Navrhnúť a odskúšať spoľahlivú metodiku včasného odhalenia degradácie monitorov prietoku napájacej vody do PG, za VTO a pary z PG s využitím techník výpočtovej inteligencie. Navrhnúť 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. Navrhnúť počítačový model pre simulovanie prechodových procesov blokov JE VVER 440 so zameraním na JE EMO34.

2. Stabilita systémov

2.1. Dynamická stabilita

Stabilitou systému je možné v širšom zmysle chápať ako schopnosť zachovať si celistvosť a funkčnosť, to znamená schopnosť zotrvávať aj počas prítomnosti rušivých vplyvov okolia v takých formách svojej existencie, ktoré keby systém stratil, prestal by byť sebou samým. Ide tu predovšetkým o relatívnu stálosť štruktúry systému. stálosť väzieb a vzťahov medzi elementmi systému a pod. Pri skúmaní dynamických systémov nás obyčajne zaujíma iná stránka stability systémov, a to stabilita správania systému, stabilita procesov, ktoré prebiehajú v systéme a ktoré sa charakterizujú zmenami jeho vnútorného stavu. V tejto súvislosti sa používa pojem dynamická stabilita.

Dynamická stabilita je podmienkou funkcie schopnosti systému. Vyjadruje schopnosti systému klásť určitý pružný odpor poruchovým vplyvom, odstraňovať zmeny zapríčinené poruchovými vplyvmi okolia, ak tieto prestanú pôsobiť. Malé zmeny vstupných pôsobení nesmú vyvolať podstatné zmeny v reakcii systému, nesmú nastávať samovoľné procesy v systéme. Ak je potrebné exaktne skúmať stabilitu systému, treba vychádzať z podstatných všeobecne platných vlastností stabilných systémov. Takou vlastnosťou je schopnosť stabilného systému vrátiť sa z rôznych začiatočných stavov do určitého ustáleného režimu alebo v špeciálnom prípade do ustáleného stavu. Najčastejšie je skúmaná stabilita systému podľa správania systému v okolí rovnovážneho stavu. Rovnovážnym stavom sa nazýva každý taký bod v stavovom priestore, v ktorom sa bez zmeny vonkajšieho pôsobenia stav systému nemení. Pre rovnovážny stav platí vzťah

$$\frac{dx(t)}{dt} = 0 \tag{1}$$

Pri riešení lineárnych systémov predpokladáme, že vonkajšie pôsobenia na systém sú nulové

$$u(t) = 0 \tag{2}$$

keďže pri lineárnych systémoch zo stability jedného pohybu vyplýva stabilita všetkých pohybov.

Lineárne systémy od nelineárnych sa z hľadiska stability podstatne odlišujú.

2.2. Stabilita lineárneho spojitého systému

Pre lineárny stacionárny spojitý systém, ktorý všeobecne opisujeme rovnicami

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{3}$$

a pre nulový vektor vstupných veličín v dôsledku (1) určíme rovnovážny stav systému riešením rovnice

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) = 0 \tag{4}$$

Ak je matica A regulárna, lineárny stacionárny systém má jediný rovnovážny stav vyjadrený vektorom

$$x_e = 0$$

ktorý nazývame nulovým rovnovážnym stavom.

Pri skúmaní stability lineárneho stacionárneho systému pre nulový rovnovážny stav vychádzame z riešenia rovnice

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \tag{5}$$

ktorej riešením je

$$x(t) = \Phi(t - t_0)x(t_0)$$

kde

$$\Phi(t - t_0) = e^{A(t-t_0)}$$

Pre stabilný systém, ktorý sa má pri nulovom vonkajšom pôsobení vrátiť siného začiatočného stavu $x(t_0)$ do nulového rovnovážneho stavu, musí byť splnená podmienka

$$\lim_{t\to\infty} x(t) = 0 \tag{6}$$

Z toho ďalej vyplýva, že má platiť

$$\lim_{t\to\infty} \Phi(t - t_0) = \lim_{t\to\infty} \Phi(t) = 0 \tag{7}$$

Vzťah (7) je splnený len v prípade, ak sú reálne časti charakteristických čísel matice *A* záporné.

Charakteristické čísla matice *A* sú koreňmi charakteristickej rovnice

$$|sI - A| = 0 \tag{8}$$

kde výraz $|sI — A|$ znamená determinant matice $[sI — A]$ a I je jednotková matica.

Lineárny stacionárny systém bude teda stabilný len vtedy, ak reálne časti koreňov charakteristickej rovnice systému sú záporné. Charakteristická rovnica (8) má po vyjadrení determinantu tvar

$$\sum_{i=0}^{n} a_i s^i = 0 \tag{9}$$

Pre jednorozmerový systém je polynóm na ľavej strane charakteristickej rovnice totožný s polynómom v menovateli prenosovej funkcie systému.

Počítanie koreňov charakteristickej rovnice pre systémy vyšších rádov je zložité. Sú však známe kritériá a algoritmy, podľa ktorých možno jednoduchšie o bez výpočtu koreňov určiť, či ich reálne časti sú záporné, a teda či je systém stabilný.

2.2.1. Routh — Schurov algoritmus

Nutnou podmienkou stability systému je to, že všetky koeficienty charakteristickej rovnice musia mať rovnaké znamienka.

Pre systémy druhého rádu je to aj postačujúca podmienka stability, pre systémy vyšších rádov je to len nutná ale nie postačujúca podmienka.

Routhov — Schurov algoritmus vyjadruje postup znižovania rádu polynómu charakteristickej rovnice takto: Ak pôvodná charakteristická rovnica odpovedala stabilnému systému, tak aj redukovaná patri nejakému stabilnému systému. Naopak, ak pôvodná rovnica odpovedala nestabilnému systému, tak aj redukovaná patri nestabilnému systému. Rád charakteristickej rovnice znižujeme až po druhý rád.

Podmienkou stability je, aby všetky koeficienty redukovaných polynómov boli počas redukcie kladné.

Jeden krok redukcie charakteristickej rovnice je vyjadrený schémou podľa (Obrázok 1:

rád								k
n.	a_n $-k.a_{n-1}$	a_{n-1} $\downarrow$	a_{n-2} $-k.a_{n-3}$	a_{n-3} $\downarrow$	…	a_1 $-k.a_0$	a_0 $\downarrow$	a_n/a_{n-1}
n-1	-	a_{n-1}	$(a_{n-2}-k.a_{n-3})$	a_{n-3}		$(a_1-k.a_0)$	a_0	

Obrázok 1: Routh-Schurov algoritmus redukcie polynómov

Koeficienty charakteristickej rovnice napíšeme vedľa seba tak, aby vľavo bol koeficient pri najvyššej mocnine premennej, a potom ostatné podľa znižovania mocniny. Označíme každý druhý koeficient. Označené koeficienty vynásobíme konštantou, ktorá sa rovná podielu prvého a druhého koeficientu zľava. Súčiny odčítame od predchádzajúcich koeficientov napísaných vľavo. Dostaneme tak koeficienty novej charakteristickej rovnice s rádom nižším o jednotku od rádu predchádzajúcej rovnice.

2.2.2. Hurwitzovo kritérium

Aby charakteristická rovnica mala korene reálne záporné, alebo komplexné so zápornou reálnou časťou, ako to vyjadruje všeobecná podmienka stability systému, je treba, aby podľa Hurwitzovho kritéria koeficienty tejto rovnice spĺňali nasledovné podmienky:

Všetky koeficienty charakteristickej rovnice musia mať rovnaké znamienko (nutná podmienka).

Všetky determinanty H_1, H_2 ... H_n zostavené z koeficientov charakteristickej rovnice musia byť kladné (postačujúca podmienka).

Determinant H_n má n stĺpcov a n riadkov a jeho štruktúra je nasledovná:

$$H_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_0 \end{vmatrix} \tag{10}$$

Podľa Hurwitzovho kritéria je systém stabilný, ak sú všetky hlavné subdeterminanty väčšie ako nula a špeciálne $H_n > 0$. Systém bude na hranici stability vtedy, ak

$$H_n = a_0 H_{n-1} = 0 \tag{11}$$

Táto rovnica je splnená v dvoch prípadoch, buď: $a_0 = 0$, alebo $H_{n-1} = 0$. V prvom prípade ($a_0 = 0$) sa systém nachádza na medzi tzv. aperiodickej stability (jeden z koreňov charakteristickej rovnice je nulový). V druhom prípade ($H_{n-1} = 0$) je systém na medzi kmitavej stability (dva združené korene charakteristickej rovnice sa nachádzajú na imaginárnej osi Gaussovej roviny).

2.3. Frekvenčné kritériá stability

Frekvenčné kritériá stability vychádzajú z geometrického znázornenia polynómu menovateľa prenosu (Michajlovovo), alebo frekvenčného prenosu otvoreného regulačného obvodu (Nyquistovo) v Gaussovej komplexnej rovine, resp. v logaritmických frekvenčných charakteristikách.

2.3.1. Kritérium Michajlovovo – Loenhardovo

Lineárny systém je stabilný vtedy a len vtedy, ak pri zmene frekvencie od $-\infty$ do $+\infty$ sa zmení argument (fáza) vektora $\{N(s)\}_{s=j\omega}$ práve o hodnotu $n\pi$, kde n je stupeň charakteristickej rovnice systému.

Lineárny systém je stabilný vtedy, ak hodograf $N_{(j\omega)}$ pre $0<\omega<\infty$ začína na reálnej kladnej osi komplexnej roviny (nie v bode 0) a so vzrastajúcou ω postupne prejde v kladnom zmysle n kvadrantov, tj. pretína striedavo reálnu a imaginárnu os. Dĺžka vektora $N_{(j\omega)}$ musí byť stále väčšia ako 0. Hodograf končí v n-tom kvadrante v nekonečne.

Ak je systém opísaný rovnicami (3) nestacionárny, to znamená, že matica A je funkciou času $A(t)$, problémy stability sú dosť komplikované. Okrem iného môže nastať situácia, že pre určité časové intervaly, teda pre určité oblasti hodnôt parametrov matice $A(t)$, je systém stabilný a pre iné nestabilný. Obyčajne nás zaujíma, či je systém stabilný v rámci celej danej oblasti zmien parametrov.

2.4. Stabilita nelineárnych spojitých systémov

Nelineárne systémy sa od lineárnych systémov z hľadiska stability kvalitatívne odlišujú. Zatiaľ čo lineárny systém má len jeden rovnovážny stav, nelineárny ich môže mať niekoľko, z ktorých niektoré môžu byť stabilné a iné nestabilné.

Ak je rovnovážny stav lineárneho systému stabilný, tak je stabilný pre ľubovoľný začiatočný stav. Hovoríme, že systém je globálne stabilný. V prípade nelineárneho systému môže byť stavový priestor rozčlenený na samostatné oblasti obklopujúce jednotlivé rovnovážne stavy. Ak je príslušný rovnovážny stav stabilný, tak len pre začiatočné stavy z určitej oblasti, ktorá ho obklopuje.

V nelineárnych systémoch môžu vznikať periodické režimy, limitné cykly, ktoré môžu byť stabilné alebo nestabilné a v špeciálnom prípade polostabilné.

Rovnovážne stavy nelineárneho stacionárneho systému opísaného rovnicou

$$\dot{x}(t) = f(x,u) \tag{12}$$

zistíme pre daný konštantný (obyčajne nulový) vektor vstupných veličín

$u(t) = c = konšt.$

riešením rovnice

$$f(x,c) = 0 \tag{13}$$

Rovnica môže mať niekoľko riešení

$x_{ei}, i = 1,2,\ldots,M$

2.4.1. Skúmanie stability v malom

V blízkosti každého rovnovážneho stavu zisťujeme stabilitu tak, že najprv model systému – rovnice systému – linearizujeme pre okolie rovnovážneho stavu, a potom zisťujeme stabilitu ako pre lineárny systém. Linearizáciou rovnice (12) pre okolie rovnovážneho stavu x_{ei} dostaneme rovnicu

$$\dot{x}(t) = f(x_{ei}, c) + J(x_{ei})\left[x(t) - x_{ei}\right] \tag{14}$$

kde $J(x_{ei})$ je Jacobiho matica pre $x = x_{ei}$

$$J(x_{ei}) \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=x_{ei}} \tag{15}$$

Podmienkou stability rovnovážneho stavu x_{ei} je, aby korene charakteristickej rovnice

$$\left| sI - J(x_{ei}) \right| = 0 \tag{16}$$

mali reálne časti koreňov záporné.

2.4.2. Ljapunovova metóda

Najvšeobecnejšou a najuniverzálnejšou metódou na zisťovanie stability systémov je metóda založená na Ljapunovovej teórii stability a Ljapunovovej funkcii. Metóda je aplikovateľná tak pre lineárne, ako aj pre nelineárne systémy, a to stacionárne i nestacionárne. Umožňuje zisťovať stabilitu nielen v okolí rovnovážneho stavu, teda „v malom", ale aj pre celé oblasti stavového priestoru, teda „vo veľkom". Umožňuje určovať aj oblasti stability. Metóda je založená na nasledujúcej vete, ktorá je uvedená v znení pre stacionárny prípad:

Rovnovážny stav *xc* systému (12) je stabilný v oblasti Ω stavového priestoru, ak existuje skalárna funkcia $L(x)$ s týmito vlastnosťami:

a) $L(x)$ a jej parciálne derivácie podľa všetkých zložiek vektora x sú spojité v Ω.

b) $L(x)$ je v oblastí Ω kladne definitná vzhľadom na *xe*.

c) Derivácia funkcie *L(x)* podľa času vzhľadom na systém (12) je záporne definitná v oblasti *Ω*, to znamená

$$\frac{dL(x)}{dt} = [gradL(x)]^T x = [gradL(x)]^T f(x,c) < 0 \tag{17}$$

d) Pre všetky *x* okrem *x* = *xc* platí

L(x)≠0

Funkciu *L(x)* s uvedenými vlastnosťami nazývame Ljupunovova funkcia. Z vety vyplýva, že existencia funkcie *L(x)* je postačujúcou podmienkou stability rovnovážneho stavu.

2.5. Stabilita lineárnych diskrétnych systémov

Pri skúmaní stability diskrétneho lineárneho stacionárneho systému opísaného rovnicami

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + Hu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \tag{18}$$

stačí tak isto ako pre spojitý systém skúmať jeho stabilitu pre nulový rovnovážny stav, čo inak znamená skúmať prechodnú zložku procesov, ktorá je riešením rovnice

$$x(k+1) = \Phi x(k) \tag{19}$$

Všeobecné riešenie tejto rovnice pre *N* taktov je

$$x(N) = \Phi^N x(0) \tag{20}$$

Podmienka stability je

$$\lim_{N\to\infty} x(N) = \lim_{N\to\infty} \Phi^N x(0) = 0 \tag{21}$$

Možno dokázať, že vzťah (21) platí, a teda, že systém je stabilný len vtedy, ak charakteristické čísla matice *Φ* majú absolútnu hodnotu menšiu ako jednotka, to znamená, že v komplexnej rovine sa nachádzajú vnútri jednotkovej kružnice. Charakteristické čísla matice *Φ* sú koreňmi charakteristickej rovnice

$$|zI - \Phi| = 0 \tag{22}$$

Podobne ako pre spojité lineárne systémy aj pre diskrétne lineárne systémy sú známe algoritmy na priame zistenie ich stability bez výpočtu koreňov charakteristickej rovnice.

Ak do charakteristickej rovnice (22) zavedieme substitúciu

$$z = \frac{s+1}{s-1}$$

ktorá konformne zobrazuje jednotkový kruh do ľavej polroviny komplexnej roviny, dostaneme novú charakteristickú rovnicu

$$\left| \frac{s+1}{s-1} I - \Phi \right| = 0 \tag{23}$$

odkiaľ ďalej dostaneme

$$\left| s(\Phi - I) - (A + I) \right| = 0 \tag{24}$$

Na zisťovanie stability diskrétneho systému podľa transformovanej charakteristickej rovnice (24) môžeme aplikovať ktorékoľvek kritérium alebo algoritmus platné pre spojité lineárne systémy.

3. Pozorovateľnosť a riaditeľnosť

Pri sledovaní dynamických systémov z aspektu ich riadenia, ale aj z pohľadu identifikácie, sú dôležité vlastnosti, ktoré umožňujú posúdiť reálne možnosti uskutočnenia identifikácie alebo riadenia systémov. Východiskom je stavový opis dynamického systému rovnicami

$$\begin{aligned} x(t) &= F\{x(t_0), u(t_0, t)\} \\ y(t) &= G\{x(t_0), u(t)\} \end{aligned} \tag{25}$$

Stav $x(t_0)$ dynamického systému, opísaného stavovými rovnicami (25) v čase $t = t_0$, je pozorovateľný vtedy, keď pre daný vstup $u(t)$ možno nájsť taký čas $t_k > t_0$, že znalosť vstupu $u(t)$ a stavu $x(t)$ pre $t_0<t<t_k$, je postačujúca pre jednoznačné určenie stavu $x(t_0)$. Ak sú všetky stavy $x(t_0)$ systému pozorovateľné v čase t_0, je systém pozorovateľný v čase t_0. Ak sú všetky stavy systému pozorovateľné pre ľubovoľné $t_0 \in T$, je systém úplne pozorovateľný.

Pri definícii riaditeľnosti systému rozlišujeme riaditeľnosť podľa stavových premenných a riaditeľnosť podľa výstupu.

Dynamický systém opísaný stavovými rovnicami (25) je úplne riaditeľný podľa stavových premenných $x(t)$ vtedy, keď z počiatočného stavu $x(t_0)=x_0$, prislúchajúcemu ľubovoľnému časovému okamihu $t = t_0$ môže byť privedený do ľubovoľného konečného stavu $x(t_k)$, za konečný časový interval $(t_k - t_0)$ ohraničeným vstupom $u(t)$. Potom existuje také t_k, $t_0<t_k<\infty$, pre ktoré $x(t_k) = x_k$.

Dynamický systém, opísaný stavovými rovnicami (25), je úplne riaditeľný podľa výstupných premenných (podľa výstupu) vtedy, keď počiatočný výstup $y(t_0)=y_0$, odpovedajúci ľubovoľnému časovému okamihu $t = t_0$, môže byť privedený na ľubovoľný výstup $y(t_k)=y_k$ za konečný časový interval (t_k-t_0) ohraničeným vstupom $u(t)$. Potom existuje také t_k, $t_0<t_k<\infty$ pre ktoré $y(t_k) = y_k$.

Zmeny stavov, resp. výstupov systému pri uvedených definíciách môžu byť jednoznačné pri lineárnych systémoch, alebo viacznačné (ale konečné) pri nelineárnych systémoch. Z uvedených definícií, ktoré vychádzajú zo stavového opisu dynamických systémov pre jednotlivé druhy systémov (lineárne, stacionárne, spojité, diskrétne), možno všeobecne odvodiť matematické podmienky, ktorých splnenie (nesplnenie) zaručuje dosiahnutie (nedosiahnutie) požadovanej vlastnosti.

4. Záver

V článku je prezentovaná problematika hodnotenia vlastností modelov v súvislosti s projektom Zvyšovanie energetickej bezpečnosti SR aktivity Využitie fuzzy logiky pre diagnostické systémy blokov JE s cieľom aplikovať výskum zvyšovania bezpečnosti energetických premien reaktora VVER-440 a predlžovanie životnosti významných komponentov energetického bloku. Ako súčasť kritérií hodnotenia uvažovaných modelov sú špecifikované vlastnosti stabilita, pozorovateľnosť a riaditeľnosť.

5. Poďakovanie / Acknowledgement

Európska únia
Európsky fond regionálneho rozvoja

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.

Operačný program VÝSKUM a VÝVOJ

6. Zoznam bibliografických odkazov

(1) GVOZDJAK, L., BORŠČ, M., VITKO, A. *Základy kybernetiky*. Bratislava: Alfa, 1990. 256 s. ISBN 80-05-00677-2.

(2) VRBAN, A., HALAMA, J., HUSÁROVÁ, B. *Základy teórie automatického riadenia*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 170s. ISBN 80-227-1267-1.

(3) HUBA, M., HUBINSKÝ, P., ŽÁKOVÁ, K. *Teória systémov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002. 432 s. ISBN 80-227-1820-3.

(4) BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.

7. Adresa autora (-ov):

Martin Juhás, Ing., PhD.
Materiálovotechnologická fakulta STU
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a matematiky
Hajdóczyho 1
917 24 Trnava
martin_juhas@stuba.sk

Bohuslava Juhásová, Ing., PhD.
Materiálovotechnologická fakulta STU
Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a matematiky
Hajdóczyho 1
917 24 Trnava
bohuslava.juhasova@stuba.sk