SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Jozef Škultéty

RIADENIE SYSTÉMOV S VYUŽITÍM LAGUERREOVÝCH SIETÍ

Autoreferát dizertačnej práce

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti
philosophiae doctor, PhD.

v odbore doktorandského štúdia
9.2.7 Kybernetika

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Jozef Škultéty**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Eva Miklovičová, PhD.**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Mikuláš Alexík, PhD.**
Fakulta riadenia a informatiky, ŽU v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

prof. Ing. Boris Rohaľ-Ilkiv, CSc.
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky
Strojnícka fakulta, STU v Bratislave
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa ....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná ....
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa ...., číslo odboru: 9.2.7, odbor doktorandského štúdia: Kybernetika, na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

OBSAH

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

α_c	mierka spojitej Laguerreovej siete alebo spojitého rozvoja do x
α_d	mierka diskrétnej Laguerreovej siete alebo diskrétneho rozvoja do x
M	počet koeficientov Laguerreovej siete alebo rozvoja do x
IMC	riadenie s vnútorným modelom
MPC	prediktívne riadenie
OMPC	prediktívne riadenie s uvažovaním účelovej funkcie na nekonečnom horizonte
ORO	otvorený regulačný obvod
regulátor x	regulátor tvorený rozvojom do x
SISO	systém s jedným vstupom a s jedným výstupom
URO	uzavretý regulačný obvod

ÚVOD

V dnešnej dobe sa do popredia v oblasti modelovania systémov opäť dostávajú ortonormálne funkcie, pretože modely založené na týchto funkciách nevyžadujú znalosť rádu systému ani dopravného oneskorenia. V tejto práci budeme využívať konkrétne Laguerreove ortonormálne funkcie, keď model systému bude daný Laguerreovou sieťou. Laguerreova sieť je vhodná pre aproximovanie stabilných systémov. Voľba mierky a počtu koeficientov ovplyvňuje kvalitu aproximácie. Identifikácia takéhoto modelu je jednoduchá vďaka ortonormálnym vlastnostiam Laguerreových funkcií.

Počas štúdia danej problematiky som sa oboznámil s riadením s referenčným modelom v otvorenej slučke, kedy systém je daný Laguerreovou sieťou a regulátor je tvorený špeciálnou štruktúrou – rozvojom do x (Bars a Mayer, 1976). Výhodou tohto prístupu je veľmi jednoduchá syntéza regulátora a možnosť veľmi jednoducho ovplyvňovať výstup systému – iba voľbou referenčného modelu pri návrhu riadenia. Pre mňa osobne sa tento návrh riadenia javí ako veľmi zaujímavý a preto sa táto práca zaoberá riadením s referenčným modelom na základe Laguerreových sietí.

V tejto práci sa budeme snažiť dať odpovede na rôzne otázky ohľadne takéhoto návrhu riadenia. Napríklad, ako je možné realizovať tento návrh riadenia v diskrétnej oblasti, ako je možné realizovať tento návrh riadenia v uzavretej slučke, ako je možné garantovať stabilitu a robustnú stabilitu, atď.

Piata kapitola je v autoreferáte zámerne vynechaná pretože neobsahuje náš prínos.

1 PREHĽAD LITERATÚRY

Laguerreove siete sa využívajú v oblasti identifikácie systémov, kedy je možné v niektorých prípadoch použitím Laguerreovych sietí zvýšiť presnosť modelov alebo dosiahnuť zníženie parametrizácie. V (Bouzrara a kol., 2012) je navrhnutý ARX-Laguerre model. Výhodou tohto modelu je zníženie parametrizácie v porovnaní s klasickým ARX modelom. Autori ukázali, že počet parametrov ARX-Laguerreovho modelu nebude nikdy vyšší ako počet parametrov ARX modelu. V (Alci a Asyali, 2009) je realizovaný model, ktorý je kombináciou ortonormálnych Laguerreových funkcií a statického nelineárneho fuzzy systému. Výsledkom bolo zvýšenie presnosti modelu. V oblasti medicíny bola Laguerreova sieť využitá napr. pri identifikácii kardiovaskulárneho systému (Hahn a kol., 2010).

V (Masnadi-Shirazi a Ghasemi, 2000) autori realizovali adaptívnu Laguerreovu sieť.

1.1 Identifikácia Laguerreových modelov

V (Zervos a Dumont, 1988) je použitá metóda najmenších štvorcov pre identifikáciu Laguerreovej siete. V (Olivier 1994) je realizovaná identifikácia spojitej Laguerreovej siete na základe gradientovej metódy.

V oblasti identifikácie Laguerreových sietí je riešená problematika voľby počtu Laguerreových koeficientov M a voľba optimálnej mierky α. V (Parks, 1971) odporúčajú pre voľbu α_c vypočítať najprv 2 hodnoty na základe impulznej odozvy systému f nasledovne:

$$M_1 = \frac{\int_0^\infty t f^2 dt}{\int_0^\infty f^2 dt} \qquad M_2 = \frac{\int_0^\infty t \dot{f}^2 dt}{\int_0^\infty f^2 dt}$$

Potom je možné α_c určiť pomocou nasledujúceho vzťahu

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \tag{1.1}$$

Iný návrh (Bars, 1975) odporúča použiť pre voľbu α_c nasledovné kritérium:

$$J = \sum_{i=0}^{n} c_i^2 \tag{1.2}$$

kde c_i sú váhovacie koeficienty Laguerreovej siete.

Koeficient α_c je optimálny, ak dané kritérium dosiahne maximum. Iný návrh toho istého autora uvažuje voliť $\alpha_c = 1/T_s$, kde T_s je časová konštanta systému. V tej istej práci je tiež odporúčané nasledovné pravidlo pre voľbu α_c: pre procesy s rýchlou odozvou je možné dosiahnuť rýchlu konvergenciu s vyššími α_c hodnotami. Pre procesy s pomalšou odozvou je vhodné voliť menšiu hodnotu α_c.

V práci (Zervos a Dumont, 1988) autori odporúčajú voliť počet Laguerreových koeficientov M pre systémy s nízkym rádom a s výrazným dopravným oneskorením vzhľadom k dominantnej časovej konštante z intervalu $M \epsilon \langle 5, 10 \rangle$. Autori v mnohých prípadoch dosiahli vyhovujúce výsledky. Pre podtlmené systémy s výrazným dopravným oneskorením je potrebné voliť $M \epsilon \langle 10, 15 \rangle$. V prípade ak dopravné oneskorenie nie je výrazné, je potrebný menší počet Laguerreových koeficientov.

V prípade diskrétnych Laguerreových sietí autori článku (Fu a Dumont, 1993) ukázali všeobecnú metódu, ako je možné zvoliť optimálne α_d na základe impulznej odozvy systému. Táto metóda je použiteľná aj pre systémy s dopravným oneskorením.

V (Elnaggar, 1997) je ukázaná ekvivalencia medzi prenosovou funkciou prvého rádu a Laguerreovým modelom. Na základe tejto ekvivalencie je možné určiť mierku Laguerreovej siete a M. Tento návrh je platný pre spojité a aj pre diskrétne Laguerreove siete. Nevýhodou tohto algoritmu je, že je potrebné poznať časovú konštantu a dopravné oneskorenie systému. Taktiež v (Elnaggar, 1997) je tento algoritmus rozšírený pre online voľbu M a α_d diskrétnej Laguerreovej siete na základe variabilného regresného odhadu. Uvedené návrhy sú platné iba pre aproximovanie systému prvého rádu.

Z koeficientov spojitej prenosovej funkcie je možné určiť hodnoty váhovacích koeficientov spojitej Laguerreovej siete (Bars a Mayer, 1977).

1.2 Prediktívne riadenie

V oblasti prediktívneho riadenia sa Laguerreove siete využívajú na zníženie parametrizácie akčných zásahov. V prípade, ak obmedzenia vstupných alebo výstupných veličín boli prekročené, došlo k online optimalizácii pomocou kvadratického programovania. V tomto prípade došlo k zníženiu výpočtovej náročnosti v porovnaní s prípadom bez Laguerreovej parametrizácie. Ak však online optimalizácia pomocou kvadratického programovania nebola aktívna, tak zníženie výpočtovej náročnosti pomocou Laguerreovej parametrizácie bolo zanedbateľné (Barry a Wang, 2004). Návrh MPC s Laguerreovou parametrizáciou akčných zásahov je možné nájsť v (Wang 2001), (Wang 2004), (Wang 2009) a jeho použitie napr. v (Fan a kol., 2012), (Chen a Wu, 2011). V článku (Kuo a Vu, 2011) autori použili návrh MPC umožňujúci predpísať požadovaný stupeň stability spolu s Laguerreovou parametrizáciou akčných zásahov.

V článku (Valencia-Palomo a Rossiter, 2010) je ukázané, že použitím Laguerreovej parametrizácie akčných zásahov v mp-QP sa zmenšil počet regiónov a zvýšil sa počet prípustných riešení. Taktiež sa výrazne zjednodušil test pre výber vhodného akčného zásahu pre multi-parametrické prediktívne riadenie. Algoritmus používa Laguerreovu parametrizáciu akčných zásahov k dosiahnutiu alternatívnej trajektórie a tak dochádza k zmene optimalizačného problému. Dochádza k redukcii online výpočtovej náročnosti a použitím Laguerreových funkcií v OMPC sa zlepšila riešiteľnosť. S využitím týchto výsledkov bol implementovaný v PLC MPC mp-QP algoritmus s uvažovaním obmedzení veličín.

2 CIELE PRÁCE

Základnými problémami, ktorými sa predložená dizertačná práca zaoberá sú:

1. Návrh algoritmu pre priamy výpočet koeficientov rozvoja do x.
2. Návrh algoritmu pre voľbu mierky spojitej Laguerreovej siete.
3. Návrh rozvoja do x v diskrétnej oblasti.
4. Návrh riadenia s referenčným modelom v otvorenej slučke v diskrétnej oblasti.
5. Návrh riadenia s referenčným modelom v uzavretej slučke v spojitej oblasti a v diskrétnej oblasti.
6. Analýza stability a robustnej stability riadenia s referenčným modelom na základe spojitej Laguerreovej siete s vnútorným modelom a s integrátorom.
7. Analýza stability URO riadenia s referenčným modelom na základe spojitej Laguerreovej siete s integrátorom s využitím zjednodušenej verzie Nyquistovho kritéria.
8. Návrh riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s integrátorom s kompenzáciou poruchy.
9. Návrh prediktívneho riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s vnútorným modelom a s integrátorom.
10. Programová realizácia uvedených návrhov.
11. Overenie funkčnosti a spoľahlivosti daných návrhov.

3 SPOJITÉ LAGUERREOVE SIETE

Táto kapitola dizertačnej práce sa zameriava na modelovanie systémov s využitím Laguerreových sietí. V autoreferáte však uvedieme iba vybrané kapitoly z dizertačnej práce.

3.1 Rozvoj do x

Modifikáciou spojitej Laguerreovej funkcie je možné definovať rozvoj do x v spojitej oblasti nasledovne (Bars a Mayer, 1977):

$$H(s) = \sum_{i=0}^{\infty} d_i x^i(s) \tag{3.1}$$

kde

$$x = \frac{s - \alpha_c}{s + \alpha_c} \tag{3.2}$$

pričom aj funkcie x majú ortonormálne vlastnosti.

Tiež prenosové funkcie, ktoré nie sú rýdzo dynamické, môžu byť vyjadrené pomocou rozvoja do x. Tým pádom je tiež možné pomocou rozvoja do x vyjadriť regulátor v tvare prenosovej funkcie, kde rády čitateľa a menovateľa sú rovnaké.

Laguerreove koeficienty je možné prepočítať priamo na koeficienty rozvoja do x ale je tiež možné realizovať aj opačný postup (Bars a Mayer, 1977).

Je nutné zdôrazniť platnosť nasledovného vzťahu:

$$x^j L_i(s) = L_{i+j}(s) \tag{3.3}$$

kde $L_i(s)$ je i-ta Laguerreova funkcia.

3.2 Výpočet koeficientov rozvoja do x

V (Dumont a Zervos, 1988), (Zervos a Dumont, 1988) je použitá metóda najmenších štvorcov pre výpočet koeficientov Laguerreovej siete. Túto metódu sme navrhli použiť pre priamy výpočet koeficientov rozvoja do x. Nami navrhnutý výpočet koeficientov rozvoja do x je vhodné použiť v prípade, keď chceme aproximovať nerýdzo dynamickú prenosovú funkciu, ktorú nie je možné aproximovať Laguerreovou sieťou alebo v prípade, keď hodnoty Laguerreových koeficientov nie sú k dispozícii.

Nech je výstup systému v danom čase vyjadrený nasledovne:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{n} d_i x^i(k) + w(k) = X_u(k)\theta + w(k) \tag{3.4}$$

kde $X_u(k) = [u(k)\ x(k) \dots x^n(k)]$, $\theta = [d_0\ \ d_1\ \dots\ d_n]^T$ a $w(k)$ je parazitný šum.

V prípade realizácie N meraní dostávame:

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(1) & x(1) & \cdots & x^n(1) \\ u(2) & x(2) & \cdots & x^n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u(k) & x(k) & \cdots & x^n(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w(1) \\ w(2) \\ \vdots \\ w(k) \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Rovnicu (3.5) je možné v maticovom tvare zapísať nasledovne ako

$$Y = H\theta + W \tag{3.6}$$

Odhad hľadaných koeficientov rozvoja do x je možné realizovať použitím metódy najmenších štvorcov:

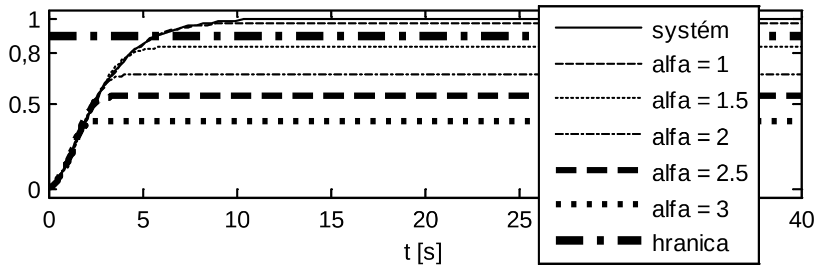
$$\hat{\theta} = (H^T H)^{-1} H^T Y \tag{3.7}$$

kde rozmer matice H je $(N \times M)$. Odhad hľadaných koeficientov bude nevychýlený, ak stredná hodnota šumu je nulová.

3.3 Voľba mierky spojitej Laguerreovej siete

Voľbou optimálnej hodnoty α_c je možné dosiahnuť lepšiu kvalitu aproximácie systému a menší počet Laguerreových koeficientov ako v prípade, keď α_c nie je vhodne zvolená. Toto tvrdenie platí aj v prípade diskrétnych Laguerreových sietí. S cieľom dosiahnutia čo najlepšie aproximácie systému sme navrhli nasledovný algoritmus voľby α_c.

Pre spojité Laguerreove siete platí: $\alpha_c \in (0, \infty\rangle$. Z tohto dôvodu je potrebné najprv ohraničiť tento interval. Obr. 3.1 zobrazuje prechodovú charakteristiku aperiodického systému 2. rádu (plná čiara) a prechodové charakteristiky Laguerreových modelov s rôznymi hodnotami mierky ale s rovnakým počtom Laguerreových koeficientov. Hodnota mierky bola postupne zvyšovaná o konštantnú hodnotu (napríklad o 0.5) od počiatočnej kladnej hodnoty blízkej 0.



Obr. 3.1: Ilustratívny príklad: Ako zvoliť hornú hranicu mierky spojitej Laguerreovej siete

Od určitej hodnoty mierky (označme ju ako $\overline{\overline{\alpha_c}}$) nastane prípad daný obr. 3.1. Zvyšovaním hodnoty mierky spojitej Laguerreovej siete nad hodnotu $\overline{\overline{\alpha_c}}$ bude narastať odchýlka ustálenej hodnoty výstupu Laguerreovho modelu od ustálenej hodnoty výstupu systému.

Hranica na obr. 3.1 predstavuje zvolenú konštantnú hodnota (napríklad $9/10$ z ustálenej hodnoty výstupu systému). Ňou sa definuje prípustná odchýlka pre ustálené stavy výstupov Laguerreových modelov.

V našom prípade $\overline{\overline{\alpha_c}} = 1$. Na základe tejto vlastnosti je možné určiť hornú hranicu mierky. Horná hranica mierky je 1.5 pretože táto hodnota patrí do uvedenej postupnosti (keď zvyšovaním mierky nie je možné zlepšiť kvalitu aproximácie systému, keď M je konštantné) a zároveň je prvou hodnotou, ktorá je pod hranicou.

Po zvolení $\overline{\overline{\alpha_c}}$, je interval $\left(0,\ \overline{\overline{\alpha_c}}\right\rangle$ prechádzaný s konštantným krokom 0.01. Optimálna hodnota α_c je nájdená minimalizáciou kritéria (3.8).

$$J = \int_0^t (y - \mathrm{y}_m)^2\, dt \tag{3.8}$$

Tiež je možné tento algoritmus prehľadávania intervalu pozmeniť. A to tak, že z predchádzajúceho kroku je zvolených niekoľko najlepších riešení (napr. prvých 16) a pre tieto riešenia je mierka hľadaná s krokom 0.001 v danom intervale. Potom je zvolené najlepšie riešenie.

Výpočtová náročnosť nami navrhnutého algoritmu je vyššia ako u vybraných metód v prehľade literatúry. Hľadanie optimálnej mierky je vykonané iba raz pre zvolený počet Laguerreových koeficientov. Z tohto dôvodu vyššia výpočtová náročnosť navrhnutého algoritmu nie je výrazným problémom.

Taktiež je možné tento algoritmus aplikovať aj pre voľbu mierky diskrétnej Laguerreovej siete a pre voľbu mierky diskrétneho rozvoja do x. V tomto prípade však nie je potrebné hľadať hornú hranicu mierky pretože mierka diskrétnej Laguerreovej siete a diskrétneho rozvoja do x patrí do intervalu $\langle 0, 1)$.

4 DISKRÉTNE LAGUERREOVE SIETE

Táto kapitola dizertačnej práce sa zameriava na modelovanie systémov s využitím diskrétnych Laguerreových sietí. V autoreferáte však uvedieme iba nami navrhnutý rozvoj do x v diskrétnej oblasti.

4.1 Rozvoj do x v diskrétnej oblasti

Nami navrhnutá realizácia diskrétneho rozvoja do x je nasledovná:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{\infty} d_i x^i(z) \tag{4.1}$$

kde

$$x = \frac{z^{-1} - \alpha_d}{1 - \alpha_d z^{-1}} \tag{4.2}$$

Taktiež platí nasledovný vzťah:

$$x^j \Gamma_i(z) = \Gamma_{i+j}(z), \quad j \geq 0, i \geq 0 \tag{4.3}$$

kde Γ_i(z) označuje i-tu diskrétnu Laguerreovu funkciu.

6 RIADENIE S REFERENČNÝM MODELOM S VYUŽITÍM SPOJITÝCH LAGUERREOVÝCH SIETÍ

Pôvodný návrh riadenia s referenčným modelom (kapitola 6.1) je realizovaný v otvorenej slučke a preto nie je možné eliminovať vplyv porúch a vplyv nemodelovanej dynamiky. Z tohto dôvodu sme navrhli tri realizácie riadenia v uzavretej slučke, pričom samotný návrh regulátora x ostáva nezmenený.

6.1 Riadenie s referenčným modelom v otvorenej slučke

Pri riadení s referenčným modelom je cieľom aby výstup systému sledoval výstup referenčného modelu v otvorenej slučke. Otázkou však je, ako je možné definovať riadiacu štruktúru a jej parametre, ak je riadený systém aproximovaný Laguerreovým modelom.

V prípade Laguerreovej siete sa riešenie návrhu riadenia s referenčným modelom stáva veľmi jednoduchým (Bars a Mayer, 1976), (Bars a Mayer, 1977). Ak riadiaci systém s prenosovou funkciou $H_{reg}(s)$ je sériovo zapojený s riadeným systémom, ktorého prenosová funkcia je $H(s)$, mal by byť splnený (aspoň približne) nasledovný vzťah

$$H_{reg}(s)H(s) = H_{rm}(s) \tag{6.1}$$

kde H_{rm} je prenosová funkcia referenčného modelu. Z rovníc (3.3), (3.1) vyplýva, že ak model systému a aj referenčný model sú vyjadrené v tvare Laguerreovho modelu, potom najvhodnejšou štruktúrou pre prenosovú funkciu riadiaceho systému je rozvoj do x:

$$H_{reg}(s) = \sum_{j=0}^{n} d_j x^j = \sum_{j=0}^{n} d_j \left(\frac{s - \alpha_c}{s + \alpha_c}\right)^j \tag{6.2}$$

Uvažujme, že prenosové funkcie riadeného systému $H(s)$ a referenčného modelu $H_{rm}(s)$ sú dané ich Laguerreovými sieťami s príslušnými koeficientmi c_i a m_i. Nech je pri výpočte koeficientov regulátora x uvažovaná rovnaká hodnota α_c a $M = n + 1$ pre Laguerreov model systému, referenčný model a regulátor x.

Ak aplikujeme štruktúru riadiaceho systému (6.2) pozostávajúcu z M prvkov, dostaneme nasledovný systém:

$$\begin{aligned} H_{reg}(s)H(s) &= \sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s) \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) = \sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{n} d_j c_i L_{i+j}(s) \\ &= \sum_{i=0}^{n} m_i L_i\,(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\,(s) \end{aligned} \qquad (6.3)$$

kde r_j sú dodatočné koeficienty, ktoré však nepoznáme pri návrhu regulátora, čiže $\sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j$ predstavuje nemodelovanú dynamiku. V prípade riadenia s referenčným modelom bude rovnica (6.1) splnená pre zvolený referenčný model v prípade, ak bude zvolená dostatočná hodnota M.

Koeficienty d_j pre $j = 0, 1, \ldots n$ charakterizujú riadiaci systém. Môžu byť určené pomocou nasledovného rekurentného vzťahu (Bars a Mayer, 1976):

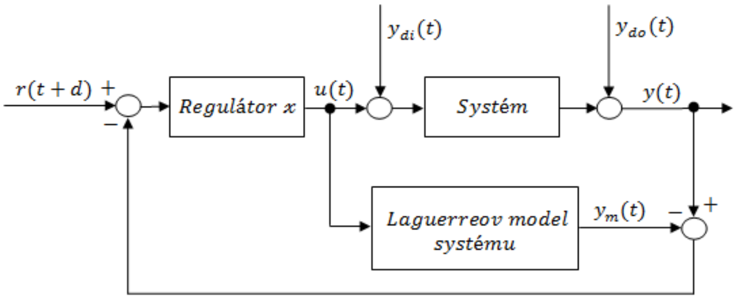
$$\begin{aligned} d_0 &= m_0/c_0 \\ d_1 &= (m_1 - d_0 c_1)/c_0 \\ &\vdots \\ d_n &= \left(m_n - \sum_{i=0}^{n-1} d_i\, c_{n-1}\right)\Big/ c_0 \end{aligned} \qquad (6.4)$$

Riadenie s referenčným modelom je realizované v otvorenej slučke a zabezpečuje sledovanie referenčného signálu. Avšak nepotláča vplyv porúch, vplyv nemodelovanej dynamiky a v prípade, ak nie je zvolená dostatočná hodnota M, nie je zabezpečené ani sledovanie.

Výhodou uvedeného návrhu riadenia je možnosť jednoducho ovplyvňovať výstup systému iba voľbou referenčného modelu. Ďalšou výhodou je jednoduchá syntéza návrhu riadenia, pričom referenčný model je potrebný iba pre návrh riadenia.

6.2 Návrh riadenia s využitím vnútorného modelu

Prvý návrh uzavretej slučky pre riadenie s referenčným modelom je podobný IMC riadeniu. Schéma riadenia definovaná nasledovne:



Obr. 6.1: Riadenie s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete s vnútorným modelom

Žiadaná hodnota je označená ako $r(t + d)$ a d je dopravné oneskorenie, $u(t)$ je akčný zásah, $y_{di}(t)$ je porucha na vstupe systému v čase t, $y_{do}(t)$ je porucha na výstupe systému, $y(t)$ je výstup systému a $y_m(t)$ je výstup modelu systému.

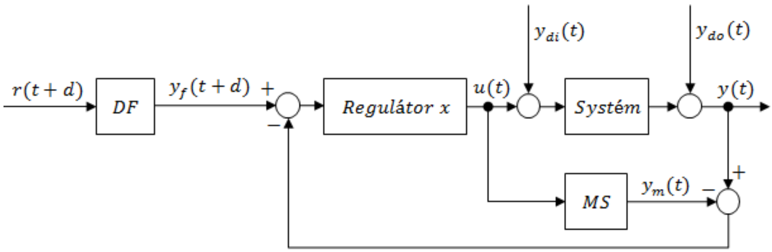
Pri tomto návrhu riadenia nie je možné zvlášť ovplyvňovať dynamiku regulácie poruchy. Navyše model systému je nutné zrealizovať v schéme riadenia cez spojitú Laguerreovu sieť. Z týchto dôvodov sme neskôr priamo do návrhu riadenia zahrnuli integračnú zložku.

Poznamenajme, že trvalá regulačná odchýlka bude eliminovaná v prípade, ak bude splnená rovnica (6.1).

6.3 Návrh riadenia s využitím vnútorného modelu s dvomi stupňami voľnosti

V tomto návrhu riadenia je možné zvlášť ovplyvňovať aj dynamiku regulácie poruchy, čo v predchádzajúcom prípade nebolo možné.

Pri návrhu regulátora x bude referenčný model zvolený s ohľadom na požadovanú rýchlosť eliminácie poruchy. Následne bude regulačný obvod realizovaný podľa obr. 6.2, kde MS je Laguerreov model systému v tvare spojitej Laguerreovej siete a y_f je žiadaná hodnota filtrovaná dodatočným filtrom (DF), ktorý ovplyvňuje dynamiku sledovania žiadanej hodnoty.



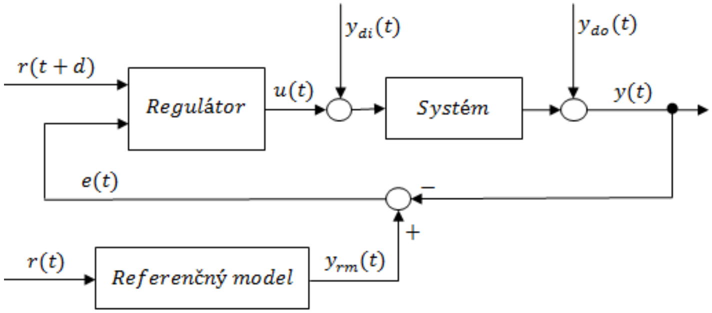
Obr. 6.2: Riadenie s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete s vnútorným modelom s dvomi stupňami voľnosti

V prípade regulátora s vnútorným modelom s dvomi stupňami voľnosti je možné dodatočný filter realizovať pomocou prenosovej funkcie alebo pomocou rozvoja do $\varkappa$. Mierka a počet koeficientov pre dodatočný filter môžu byť rozdielne od mierky a od počtu koeficientov pre návrh regulátora $\varkappa$ v otvorenej slučke.

Schéma riadenia je v tomto prípade o niečo zložitejšia ako v prípade návrhu regulačného obvodu s vnútorným modelom bez dodatočnej dynamiky eliminácie poruchy, keďže je nutné zrealizovať v schéme riadenia aj dodatočný filter.

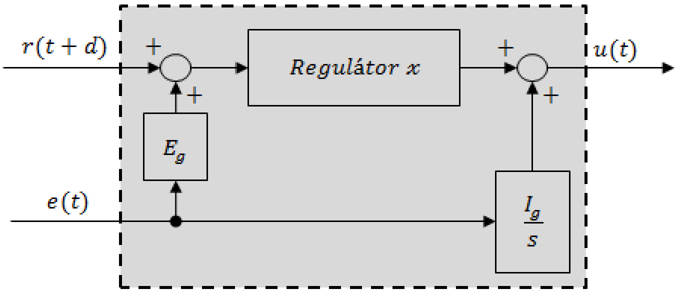
6.4 Návrh riadenia s využitím integrátora

V prípade návrhu riadenia s referenčným modelom v uzavretej slučke s integrátorom má regulátor dva vstupy (obr. 6.3).



Obr. 6.3: Riadenie s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete s využitím integrátora

Štruktúra regulátora je daná obr. 6.4. Voľbou konštanty E_g ovplyvňujeme rýchlosť regulácie poruchy. Integrátor eliminuje trvalú regulačnú odchýlku a konštanta I_g ovplyvňuje rýchlosť eliminácie trvalej regulačnej odchýlky. Dynamika sledovania referenčného signálu je iná ako dynamika regulácie poruchy pre tento typ regulátora. Návrh riadenia je realizovaný s ohľadom na zachovanie vlastnosti definovanej rovnicou (6.1).



Obr. 6.4: Štruktúra regulátora s integrátorom

Pre regulátor využívajúci integrátor môže byť referenčný model v schéme riadenia zrealizovaný buď cez prenosovú funkciu, Laguerreov model alebo cez rozvoj do x.

7 RIADENIE S REFERENČNÝM MODELOM S VYUŽITÍM DISKRÉTNYCH LAGUERREOVÝCH SIETÍ

Riadenie s referenčným modelom sme odvodili pre diskrétnu oblasť. Odvodenie je rovnaké ako v spojitej oblasti (kapitola 6.1) ale s tým, že sú použité diskrétne Laguerreove siete a štruktúra regulátora je definovaná nami navrhnutým diskrétnym rozvojom do x (kapitola 3.1).

Nami navrhnuté realizácie URO v spojitej oblasti je taktiež možné použiť aj v diskrétnej oblasti. V prípade riadenia s integrátorom je integrátor daný diskrétnou prenosovou funkciou a nie spojitou ako je zobrazené na obr. 6.4.

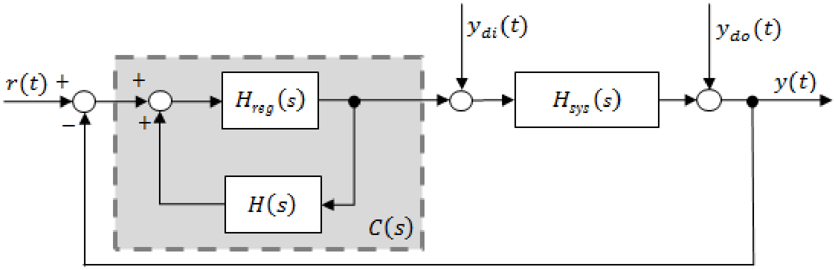
Taktiež existuje iný spôsob návrhu diskrétneho regulátora v otvorenej slučke. V prvom kroku bude navrhnutý spojitý regulátor x (systém a referenčný model sú dané spojitou Laguerreovou sieťou). Potom sa iba transformuje spojitá prenosová funkcia regulátora na diskrétnu, napríklad použitím lichobežníkového pravidla ale hodnoty váhovacích koeficientov regulátora zostávajú nezmenené. Tento návrh je možné aplikovať na všetky tri uvedené návrhy uzavretého regulačného obvodu.

8 ANALÝZA STABILITY A ROBUSTNEJ STABILITY RIADENIA S REFERENČNÝM MODELOM NA ZÁKLADE SPOJITEJ LAGUERREOVEJ SIETE S VNÚTORNÝM MODELOM

Analýzou stability a robustnej stability v prípade riadenia s vnútorným modelom (IMC), keď model systému je daný pomocou prenosovej funkcie sa zaoberá práca (Morari a Zafiriou, 1989). V našej práci analyzujeme stabilitu a robustnú stabilitu riadenia s referenčným modelom v uzavretej slučke s využitím vnútorného modelu vzhľadom k nemodelovanej dynamike vyplývajúcej z orezania Laguerreovho modelu.

Pri analýze stability a robustnej stability uvažujeme multiplikatívnu neurčitosť a využili sme teóriu malého zosilnenia.

Schéma riadenia s vnútorným modelom (obr. 6.1) je ekvivalentná schéme riadenia na obr. 8.1., kde $H_{reg}(s)$ je daný rozvojom do x, $H(s)$ je vnútorný model daný Laguerreov sieťou konečného rádu a $H_{sys}(s)$ je riadený systém.



Obr. 8.1: Ekvivalentná schéma riadenia s vnútorným modelom

Regulátor v uzavretej slučke je označený sivou časťou na obr. 8.1 a jeho prenosová funkcia je:

$$C(s) = \frac{H_{reg}(s)}{1 - H(s)H_{reg}(s)} = \frac{\sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s)}{1 - \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) \sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s)} = \frac{\sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s)}{1 - \left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j(s)\right)} \tag{8.1}$$

V menovateli je možné nájsť Laguerreov model referenčného modelu.

Prenosová funkcia uzavretého regulačného obvodu s modelom systému je

$$\hat{T}(s) = \frac{C(s)H(s)}{1 + C(s)H(s)} = \frac{\left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\right)}{1 - \left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\right)} * \frac{1 - \left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\right)}{1 - \left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\right) + \left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j\right)} = \sum_{i=0}^{n} m_i L_i(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j(s) \tag{8.2}$$

Pre zabezpečenie robustnej stability musí byť splnená nasledovná nerovnosť:

$$|\hat{T}(j\omega)| < \frac{1}{|\delta(j\omega)|}; \quad \forall \omega \tag{8.3}$$

kde δ vyjadruje neurčitosť riadeného systému $H_{sys}(s)$.

Stabilitu uzavretého regulačného obvodu s modelom systému nie je potrebné overovať, pretože platí rovnica (8.2).

8.1 Podmienka stability s uvažovaním orezania Laguerreovho modelu systému v schéme riadenia s vnútorným modelom

Relatívna nepresnosť systému $H_{\text{sys}}(s)$ je vyjadrená ako

$$\delta(s) = \frac{\Delta H_{\text{sys}}(s)}{H(s)} \tag{8.4}$$

kde

$$\Delta H_{\text{sys}}(s) = H_{\text{sys}}(s) - H(s) \tag{8.5}$$

V prípade Laguerreovho modelu

$$\Delta H_{\text{sys}}(s) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i L_i - \sum_{i=0}^{n} c_i L_i = \sum_{i=n+1}^{\infty} c_i L_i \tag{8.6}$$

Potom

$$\delta = \frac{\Delta H_{\text{sys}}}{H} = \frac{\sum_{i=n+1}^{\infty} c_i L_i}{\sum_{j=0}^{n} c_j L_j} \tag{8.7}$$

Rovnica (8.7) je ekvivalentná rovnici (8.8)

$$\delta = \frac{\sum_{i=n+1}^{\infty} c_i\, x^i}{\sum_{j=0}^{n} c_j\, x^j} \tag{8.8}$$

pretože

$$\begin{aligned}
\frac{\sum_{i=n+1}^{\infty} c_i L_i}{\sum_{j=0}^{n} c_j L_j} &= \frac{\frac{\sqrt{2\alpha_c}}{s+\alpha_c} \sum_{i=n+1}^{\infty} c_i \left(\frac{s-\alpha_c}{s+\alpha_c}\right)^i}{\frac{\sqrt{2\alpha_c}}{s+\alpha_c} \sum_{j=0}^{n} c_j \left(\frac{s-\alpha_c}{s+\alpha_c}\right)^j} = \\
&= \frac{\sum_{i=n+1}^{\infty} c_i \left(\frac{s-\alpha_c}{s+\alpha_c}\right)^i}{\sum_{j=0}^{n} c_j \left(\frac{s-\alpha_c}{s+\alpha_c}\right)^j} = \\
&= \frac{\sum_{i=n+1}^{\infty} c_i\, x^i}{\sum_{j=0}^{n} c_j\, x^j}
\end{aligned} \tag{8.9}$$

Stabilita uzavretého regulačného obvodu s vnútorným modelom na základe Laguerreovej siete môže byť overená použitím (8.3).

Pre výpočet δ je možné uvažovať nasledovné možnosti:

- môže byť použitá rovnica (8.7) alebo rovnica (8.8). Samozrejme nekonečná suma nemôže byť realizovaná. Ale nekonečno môže byť nahradené indexom s vyššou hodnotou. Po tejto hodnote indexu hodnoty Laguerreových koeficientov nadobúdajú zanedbateľne malé hodnoty.

- ΔH_{sys} môže byť vypočítaná pomocou (8.5), kde $H_{\mathrm{sys}}(s)$ je odozva riadeného systému vo frekvenčnej oblasti (ak je dostupná).

8.2 Návrh robustného riadenia s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete

Nech je daných m rozdielnych modelov systému $H_{sys}(s)$. Nech tieto modely predstavujú rozdielne neurčitosti systému. Cieľom je navrhnúť regulátor na základe kapitoly 6.1, ktorý bude robustne stabilný v tejto oblasti. Pre návrh takéhoto robustného regulátora sú k dispozícii dve možnosti:

- Použiť nominálny model daný prenosovou funkciou. Následne bude tento nominálny model aproximovaný Laguerreovým modelom.
- Použiť Laguerreove modely, ktoré definujú neurčitosti systému v m bodoch. Potom sa na základe týchto modelov vypočíta nominálny Laguerreov model.

Neurčitosť δ je daná množinou Ψ, pričom uvažujme m stabilných Laguerreových modelov. Tak dostávame m vektorov Laguerreových koeficientov a m hodnôt mierok α_c, pričom všetky Laguerreove modely sú rovnakého rádu.

Nech je $H(s)$ stabilný nominálny Laguerreov model daný priemerom hodnôt Laguerreových koeficientov a mierok všetkých Laguerreových modelov

$$\begin{aligned} \bar{c}_i &= \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} c_{ij} \quad \text{pre} \quad i = 0, 1, \dots n \\ \alpha_{nominal} &= \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{m}\alpha_i \end{aligned} \tag{8.10}$$

kde $\eta_{nominal} = [\bar{c}_0 \;\; \bar{c}_1 \;\; \dots \;\; \bar{c}_n]$ je vektor obsahujúci M Laguerreových koeficientov $H(s)$ a $\alpha_{nominal}$ je mierka $H(s)$.

V ďalšom kroku je potrebné nájsť maximálne hodnoty modulov na množine Ψ

$$\Delta M(j\omega) = \max_{H_L(j\omega)\in\Psi} |H_L(j\omega) - H(j\omega)|; \quad \forall\omega \tag{8.11}$$

kde H_L sú Laguerreove modely množiny Ψ.

Potom

$$\delta(j\omega) = \frac{\Delta M(j\omega)}{|H(j\omega)|} \tag{8.12}$$

Pre robustnú stabilitu je použitá rovnica (8.3) s rovnicou (8.12).

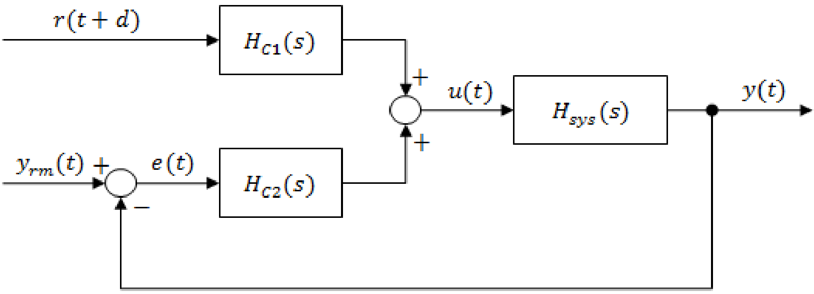
Regulátor je vypočítaný na základe kapitoly 6.1, pričom je použitý nominálny Laguerreov model $H(s)$. Tento model je taktiež použitý ako vnútorný model systému v schéme riadenia.

9 ANALÝZA STABILITY A ROBUSTNEJ STABILITY RIADENIA S REFERENČNÝM MODELOM NA ZÁKLADE SPOJITEJ LAGUERREOVEJ SIETE S INTEGRÁTOROM

Cieľom tejto kapitoly je riešenie stability riadenia s referenčným modelom v uzavretej slučke s integrátorom (kapitola 6.4). Ako v prípade riešenia stability riadenia s vnútorným modelom, bude aj tu riešená stabilita na základe nepresnosti vyplývajúcej z orezania Laguerreovho modelu. Tiež bude ukázaný spôsob, ako vyšetriť stabilitu URO na základe zjednodušenej verzie Nyquistovho kritéria a ako realizovať návrh robustného regulátora.

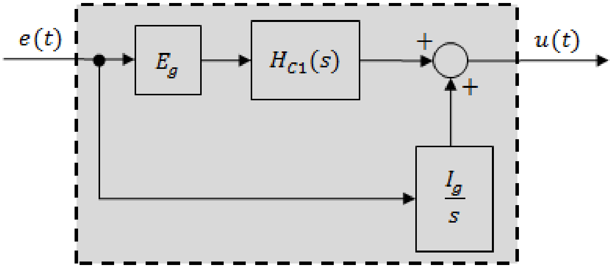
9.1 Podmienka stability s uvažovaním orezania Lagerreovho modelu systému v schéme riadenia s integrátorom

Schéma riadenia s integrátorom (obr. 6.3) je ekvivalentná k nasledovnej schéme



Obr. 9.1: Ekvivalentná schéma k riadeniu s referenčným modelom s integrátorom

pričom H_{C1} je daný rozvojom do x. Návrh regulátora H_{C1} je realizovaný na základe rovnice (6.1). Štruktúra regulátora H_{C2} je daná na obr. 9.2.



Obr. 9.2: Štruktúra regulátora H_{C2}

Keďže H_{C1} je v otvorenej slučke, tak $H_{C1}H_{sys}(s)$ bude vždy stabilný. Preto stabilitu regulátora H_{C1} nie je nutné analyzovať. Potrebné je teda vyšetriť stabilitu uzavretého obvodu s regulátorom H_{C2}.

Prenosová funkcia uzavretého regulačného obvodu s modelom systému $H(s)$ vo forme Laguerreovej siete nasledovná:

$$\begin{aligned}\hat{T}(s) &= \frac{H_{C2}(s)H(s)}{1 + H_{C2}(s)H(s)} \\ &= \frac{E_g \sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s) \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) + I_g/S \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s)}{1 + E_g \sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s) \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) + I_g/S \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s)} \\ &= \frac{E_g\left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j(s)\right) + I_g H_{integ}(s) \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s)}{1 + E_g\left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j(s)\right) + I_g H_{integ}(s) \sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s)}\end{aligned} \tag{9.1}$$

Podmienka stability s uvažovaním orezania Laguerreovho modelu v schéme riadenia s integrátorom je rovnaká ako podmienka uvedená v kapitole 8.1. Stabilitu je možné overiť použitím rovnice (8.3) spolu s rovnicou (8.4).

9.2 Návrh robustného riadenia s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete

Návrh robustného riadenia pre tento typ regulátora je rovnaký ako v kapitole 8.2.

9.3 Analýza stability URO s využitím zjednodušenej verzie Nyquistovho kritéria

Pre vyšetrenie stability URO podľa obr. 9.1 (regulátor s integrátorom) použijeme zjednodušenú verziu Nyquistovho kritéria. Taktiež toto kritérium je možné použiť aj pre analýzu stability uzavretého regulačného obvodu s nominálnym modelom pre regulátor s integrátorom (9.1).

Opäť platí, že regulátor H_{C1} je v otvorenej slučke (obr. 9.1) a preto $H_{C1}(s)H_{sys}(s)$ bude vždy stabilný. Preto stabilitu regulátora H_{C1} nie je nutné analyzovať.

Prenosová funkcia ORO pre $H_{C2}(s)H_{sys}(s)$ je vyjadrená nasledovne:

$$\begin{aligned} G_{ORO}(s) &= H_{C2}(s)H_{sys}(s) \\ &= E_{\mathrm{g}}\sum_{j=0}^{n} d_j x^j(s)\sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) + I_{\mathrm{g}}/s\sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) \\ &= E_{\mathrm{g}}\left(\sum_{i=0}^{n} m_i L_i(s) + \sum_{j=n+1}^{2n} r_j L_j(s)\right) \\ &\qquad + I_{\mathrm{g}}/s\sum_{i=0}^{n} c_i L_i(s) \end{aligned} \tag{9.2}$$

pričom systém je daný Laguerreovou sieťou konečného rádu.

Z rovnice (9.2) vyplýva, že charakteristický polynóm $H_{C2}H_{sys}$ je možné zapísať nasledovne:

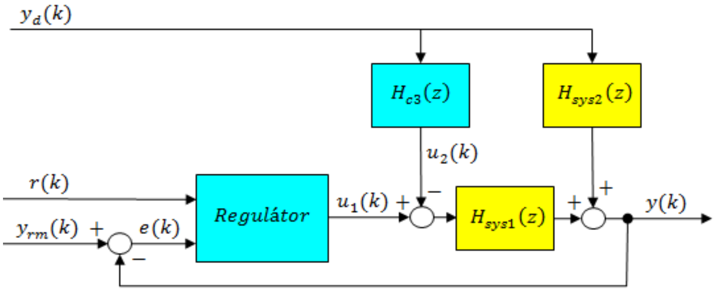
$$G_{CHPORO}(s) = s(s+\alpha_c)^{2M-1} \tag{9.3}$$

Keďže $\alpha_c > 0$, budú korene (9.3) vždy záporné s výnimkou jedného nulového koreňa. V prípade ORO je nulový koreň (nesmie byť komplexne združený) zaradený k stabilným koreňom. Z tohto dôvodu stačí na vyšetrenie stability URO aplikovať zjednodušenú verziu Nyquistovho kritéria (Hudzovič, 1982).

Keďže v (9.2) je astatizmus, tak Nyquistova krivka (frekvenčná charakteristika) ORO nebude začínať na reálnej osi. Pri vyšetrovaní stability URO je potrebné najprv uzavrieť Nyquistovu krivku ORO. Postupujeme v smere narastania ω a Nyquistovu krivku ORO vždy uzatvárame v smere hodinových ručičiek. URO bude stabilný v tedy, ak Nyquistova krivka ORO pretína reálnu os na pravo od kritického bodu $(-1, 0)$ (Hudzovič, 1982).

10 RIADENIE S REFERENČNÝM MODELOM NA ZÁKLADE DISKRÉTNYCH LAGUERREOVÝCH SIETÍ S INTEGRÁTOROM S KOMPENZÁCIOU PORUCHY

V prípade merateľnej poruchy je možné do riadenia s referenčným modelom pridať korekčný člen, ktorý vplyv merateľnej poruchy eliminuje bez toho, aby výstup systému bol ovplyvnený touto poruchou. Regulátor s dvomi vstupmi je daný podľa obr. 6.4, pričom však uvažujeme diskrétnu prenosovú funkciu integrátora a nie spojitú, H_{c3} je korekčný člen, H_{sys1} je riadený systém a H_{sys2} je model merateľnej poruchy. Model systému a model poruchy je potrebné poznať pred návrhom korekčného člena.



Obr. 10.1: Regulačný obvod s kompenzáciou merateľnej poruchy

Prenosová funkcia poruchy pre regulačný obvod s kompenzáciou merateľnej poruchy (obr. 10.1) je:

$$H_{Y/D}(z) = \frac{H_{sys2}(z) - H_{c3}(z)H_{sys1}(z)}{1 + H_{c2}(z)H_{sys1}(z)} \tag{10.1}$$

kde

$$H_{c2}(z) = E_g \sum_{j=0}^{n} d_j x^j(z) + \frac{I_g}{1 - z^{-1}} \tag{10.2}$$

Ak zvolíme korekčný člen $H_{c3}(z)$ v nasledovnom tvare:

$$H_{c3}(z) = \frac{H_{sys2}(z)}{H_{sys1}(z)} \tag{10.3}$$

potom

$$H_{Y/D}(z) = 0 \tag{10.4}$$

Regulátor s integrátorom zabezpečuje kompenzáciu iných porúch.
Z rovnice (10.3) vyplýva:

$$H_{c3}(z)H_{sys1}(z) = H_{sys2}(z) \tag{10.5}$$

Pre návrh korekčného člena $H_{c3}(z)$ na základe obr. 10.1 sú k dispozícii nasledovné dve možnosti:

- Prvou možnosťou je použitie rovnice (10.3). Nevýhodou tohto prístupu je, že model systému a aj model poruchy musí byť najprv daný v tvare prenosovej funkcie. Následne je vyjadrený podiel týchto prenosových funkcií na základe (10.3). Nakoniec je tento podiel aproximovaný Laguerreovým modelom alebo rozvojom do x.
- Druhou možnosťou je použitie rovnice (10.5). Jedná sa o obdobný problém návrhu riadenia ako v prípade riadenia s referenčným

modelom (kapitola 6.1). Preto v tomto prípade je $H_{c3}(z)$ dané rozvojom do x.

11 PREDIKTÍVNE RIADENIE S REFERENČNÝM MODELOM NA ZÁKLADE DISKRÉTNEJ LAGUERREOVEJ SIETE S VNÚTORNÝM MODELOM

Riadenie s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s vnútorným modelom sme rozšírili o prediktívnu časť (tmavá časť obr. 11.1), pričom sme sa inšpirovali prediktívnym PID riadením (Haber a kol., 2011).

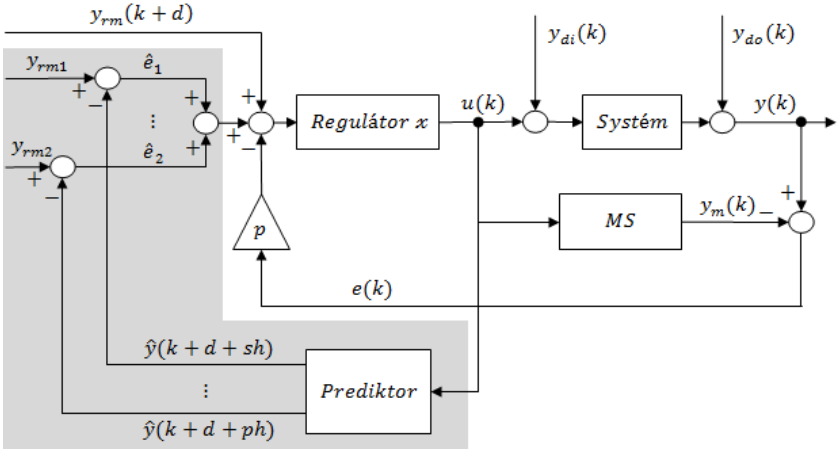
Odchýlky (11.1) predstavujú rozdiel medzi vektorom budúcich hodnôt referenčného signálu a vektorom predikovaného výstupu systému na danom horizonte predikcie, kde $sh \leq ph$, $sh \geq 1$, d je dopravné oneskorenie, $y_{rm1}, \dots, y_{rm2}$ sú budúce výstupy zvoleného referenčného modelu a $\hat{y}(k + d + sh), \dots, \hat{y}(k + d + ph)$ sú predikované výstupy systému.

$$
\begin{aligned}
\hat{e}_1 &= \hat{e}(k + d + sh|k) = y_{rm1} - \hat{y}_1 \\
&\qquad = y_{rm}(k + d + sh) - \hat{y}(k + d + sh) \\
&\vdots \\
\hat{e}_2 &= \hat{e}(k + d + ph|k) = y_{rm2} - \hat{y}_2 \\
&\qquad = y_{rm}(k + d + ph) - \hat{y}(k + d + ph)
\end{aligned}
\tag{11.1}
$$

Budúce poruchy nie sú známe v aktuálnom čase. Uvažujeme, že sú konštantné, preto je $e(k)$ násobené p, kde $p = (ph - sh) + 2$.

Výhodou uvedeného návrhu oproti jeho neprediktívnej verzii je, že ladiacimi parametrami je možné dodatočne bez zmeny návrhu regulátora ovplyvniť výstup systému. Prediktívny algoritmus má menšie prírastky akčných zásahov ako základný algoritmus s vnútorným modelom.

V porovnaní s inými prediktívnymi algoritmami je jeho výhodou nízky počet ladiacich parametrov (konkrétne 2), čím je možné tento regulátor veľmi jednoducho naladiť na danú úlohu. Navyše je možné výstup systému jednoducho ovplyvňovať aj voľbou referenčného modelu pri návrhu regulátora.



Obr. 11.1: Prediktívne riadenie s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s vnútorným modelom

11.1 Predikcia výstupu systému

Vektor výstupov diskrétnych Laguerreových funkcií v časovej oblasti je daný nasledovne:

$$L(k) = [l_0(k)\ \ l_1(k) \dots l_n(k)]^T \tag{11.2}$$

pričom diskrétne Laguerreove funkcie v časovej oblasti spĺňajú nasledovnú diferenčnú rovnicu (Wang, 2009)

$$\hat{L}(k+1) = A_l L(k) + L(0)u(k+1) \tag{11.3}$$

kde A_l je matica rozmeru $(M \times M)$ a $L(0)$ je vektor.

Predikciu budúcich výstupov systému na základe diskrétnej Laguerreovej siete je možné realizovať nasledovne:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+d+sh|k) &= \eta\hat{L}(k+d+sh|k) \\ &\vdots \\ \hat{y}(k+d+ph|k) &= \eta\hat{L}(k+d+ph|k) \end{aligned} \tag{11.4}$$

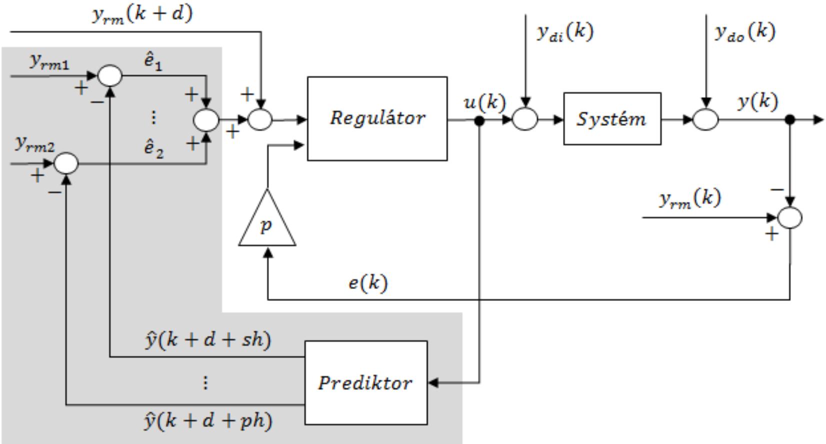
kde $\eta = [c_0\ c_1 \dots c_n]$ obsahuje M Laguerreových koeficientov. $\hat{L}(k+d+i|k)$, $i \in \langle sh,\ ph\rangle$ sú predikované výstupy Laguerreových funkcií počítaných pomocou (11.3) nasledovne:

$$
\begin{aligned}
\hat{L}(k+1|k) &= A_l L(k) + L(0)u(k+1|k) \\
\hat{L}(k+2|k) &= A_l \hat{L}(k+1|k) + L(0)u(k+2|k) \\
&\vdots \\
\hat{L}(k+d+ph|k) & \\
&= A_l \hat{L}(k+d+ph-1|k) \\
&\quad + L(0)u(k+d+ph|k)
\end{aligned}
\tag{11.5}
$$

Budúce akčné zásahy v tomto prípade sú neznáme. Preto budeme uvažovať: $u(k+1|k) = u(k|k), \ldots, u(k+d+ph|k) = u(k|k)$.

12 PREDIKTÍVNE RIADENIE S REFERENČNÝM MODELOM NA ZÁKLADE DISKRÉTNEJ LAGUERREOVEJ SIETE S INTEGRÁTOROM

Taktiež je možné rozšíriť aj riadenie s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s integrátorom o prediktívnu časť (tmavá časť obr. 12.1), pričom aj v tomto prípade prediktívne riadenie s referenčným modelom je podobné prediktívnemu PID riadeniu (Haber a kol., 2011).



Obr. 12.1: Prediktívne riadenie s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s integrátorom

Obr. 12.1 zobrazuje schému prediktívneho riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s integrátorom. V tomto prípade má regulátor štyri ladiace parametre a to: sh, ph, Ig a Eg. Prediktor na základe diskrétnej Laguerreovej siete je opísaný v kapitole 11.1.

Výhodou prediktívnej verzie algoritmu oproti jeho neprediktívnemu návrhu je, že počiatočný akčný zásah nenadobúda vysoké hodnoty. Avšak jeho nevýhodou je, že integračná časť regulátora ovplyvňuje aj dynamiku sledovania a nie len dynamiku regulácie poruchy, čo v prípade jeho neprediktívneho návrhu neplatí (pri predpoklade presného modelu systému). Nevýhodou tohto algoritmu sú zvýšené nároky na ladenie regulátora.

ZÁVER

Predložená dizertačná práca sa zaoberá problematikou riadenia SISO systémov s využitím Laguerreových sietí. V práci sa zaoberáme konkrétne riadením s referenčným modelom na základe Laguerreových sietí, pričom regulátor tvorí špeciálna štruktúra – rozvoj do x. Existujúci návrh riadenia s referenčným modelom na základe Laguerreových sietí je realizovaný v otvorenej slučke a je daný iba pre spojitú oblasť. Preto hlavnú časť práce tvorí rozpracovanie uvedeného návrh riadenia.

Existujúci návrh riadenia je realizovaný v otvorenej slučke. Preto nie je možné potlačiť vplyv nemodelovanej dynamiky a porúch. Z týchto dôvodom sme v spojitej oblasti navrhli konkrétne tri realizácie v uzatvorenej slučke. Prvý návrh URO využíva vnútorný model (kapitola 6.2) pričom ale nie je možné zvlášť ovplyvňovať dynamiku eliminácie poruchy. V druhom návrhu URO s vnútorným modelom (kapitola 6.3) je už táto realizácia možná, avšak schéma riadenia je zložitejšia. Nevýhodou oboch spomínaných návrhov je nutnosť realizovať v schéme riadenia model systému. Uvedené nedostatky odstraňuje tretí návrh URO s integrátorom (kapitola 6.4), pričom aj v tomto návrhu je možné zvlášť ovplyvňovať dynamiku sledovania a dynamiku eliminácie porúch. Vo všetkých našich návrhoch URO je zachovaná pôvodná vlastnosť sledovania (keď výstup systému sleduje výstup referenčného modelu).

Ďalším cieľom práce bolo odvodenie návrhu riadenia s referenčným modelom v otvorenej slučke pre diskrétnu oblasť, keďže rozvoj do x bol definovaný iba pre spojitú oblasť. Preto sme najprv zadefinovali diskrétny rozvoj do x. Následne sme odvodili návrh riadenia s referenčným modelom v otvorenej slučke pre diskrétnu oblasť (kapitola 7). Taktiež aj v diskrétnej oblasti sme realizovali už spomínané tri návrhy uzavretého regulačného obvodu. Tiež sme uviedli návrh transformácie riadenia s referenčným modelom v spojitej oblasti do diskrétnej oblasti (koniec kapitoly 7). Túto transformáciu je možné realizovať pre všetky tri návrhy URO ale aj pre pôvodný návrh realizovaný v otvorenej slučke.

Tiež sme sa zamerali na analýzu stability a robustnej stability riadenia s referenčným modelom v spojitej oblasti s vnútorným modelom (kapitola 8) a s integrátorom (kapitola 9.1 a 9.2), pričom sme uvažovali multiplikatívnu neurčitosť. Taktiež sme realizovali aj analýzu stability riadenia s referenčným modelom v uzatvorenej slučke na základe spojitej Laguerreovej siete s integrátorom, pričom sme využili zjednodušenú verziu Nyquistovho kritéria (kapitola 9.3).

Ďalej bol v práci rozpracovaný spôsob návrhu riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnych Laguerreových sietí s integrátorom s kompenzáciou poruchy (kapitola 10). V prípade merateľnej poruchy je možné do riadenia s referenčným modelom pridať korekčný člen, ktorý vplyv merateľnej poruchy eliminuje bez toho, aby výstup systému bol ovplyvnený touto poruchou. Aj v tomto prípade je zachovaná vlastnosť sledovania. Taktiež je možné tento návrh realizovať aj v spojitej oblasti.

Tiež sme sa zaoberali návrhom prediktívneho riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnej Laguerreovej siete s vnútorným modelom (kapitola 11). Výhodou prediktívneho riadenia s vnútorným modelom oproti jeho neprediktívnej verzii je, že ladiacimi parametrami je možné dodatočne bez zmeny návrhu regulátora ovplyvniť výstup systému. Navyše počiatočný akčný zásah nenadobúda vysoké hodnoty. Prediktívny algoritmus má aj menšie prírastky akčných zásahov ako základný algoritmus s vnútorným modelom. Jeho výhodou je aj nízky počet ladiacich parametrov (konkrétne 2), čím je možné tento regulátor veľmi jednoducho naladiť na danú úlohu. Navyše je možné výstup systému jednoducho ovplyvňovať aj voľbou referenčného modelu pri návrhu regulátora.

V prípade riadenia s referenčným modelom s integrátorom je tiež možné realizovať jeho prediktívne rozšírenie (kapitola 12). Výhodou prediktívnej verzie algoritmu oproti jeho neprediktívnemu návrhu je, že počiatočný akčný zásah nenadobúda vysoké hodnoty. Avšak jeho nevýhodou je, že integračná časť regulátora ovplyvňuje aj dynamiku sledovania a nie len dynamiku regulácie poruchy, čo v prípade jeho neprediktívneho návrhu neplatí (pri predpoklade presného modelu systému). Nevýhodou tohto algoritmu sú tiež zvýšené nároky na ladenie regulátora.

Tiež môžeme konštatovať, že sme úspešne implementovali riadenie s referenčným modelom s integrátorom v PLC. Vybrané návrhy riadení sme overovali aj na nelineárnych systémoch. Výsledky preukázali funkčnosť a spoľahlivosť našich návrhov riadenia.

Zaoberali sme sa aj problematikou voľby optimálnej hodnoty α_c spojitej Laguerreovej siete, keďže jej hodnotu je možné voliť z intervalu $(0, \infty >$. Navrhli sme algoritmus pre jej voľbu, ktorý je však s malou zmenou možné použiť aj pre voľbu mierky diskrétnej Laguerreovej siete. Taktiež ho je možné použiť aj pre voľbu α rozvoja do x.

V kapitole 3.2 sme použili metódu najmenších štvorcov pre priamy výpočet koeficientov rozvoja do x. Nami navrhnutý výpočet koeficientov rozvoja do x je vhodné použiť v prípade, keď chceme aproximovať nerýdzo dynamickú prenosovú funkciu, ktorú nie je možné aproximovať Laguerreovou sieťou alebo v prípade, keď hodnoty Laguerreových koeficientov nie sú k dispozícii.

NAJDÔLEŽITEJŠIA LITERATÚRA

Alci, M., Asyali, M.H. (2009). Nonlinear system identification via Laguerre network based fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems,* vol. 160, no. 24, pp. 3518-3529.

Bars, R. (1975). Identification and control of linear systems on the basis of the Laguerre orthonormal system (In Hungarian). University doctor thesis, 194 p.

Bars, R., Mayer, I. (1976). Model-reference control of systems identified by the Laguerre orthonormal structure. *4. IFAC symp. of Identification and System Parameters Estimation*, Tbilisi, vol. 3, pp. 430-443, Moskva.

Bars, R., Mayer, I. (1977). Algorithms for evaluating the Laguerre and $\varkappa$ expansion coefficients of transfer functions. *Problems of Control and Information Theory*, vol. 6 (3), Budapest, pp. 249-260.

Barry, T., Wang, L. (2004). A model-free predictive controller with Laguerre polynomials. *5th Asian Control Conference (ASCC),* vol. 1, pp. 177-184, Australia.

Bouzrara, K., Garna, T., Ragot, J., Messaoud, H. (2012). Decomposition of an ARX model on Laguerre orthonormal bases, ISA Transactions, pp. 848-860.

Dumont, G.A., Zervos, C.C. (1988). Adaptive control based on orthonormal series representation. *Proceedings of second IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, pp. 371-376.

Elnaggar, A. (1997). On line parameter estimation of the Laguerre functions. *36th Conference on Decision & Control*, pp. 1273-1276, USA.

Fan, L., Zhang, J., Liu, Y., Shi, X. (2012). Improved model predictive control for a proton Exchange membrane fuel cell. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 7, no. 9, pp. 8734-8744.

Fu, Y., Dumont, G.A. (1993). An optimum time scale for discrete laguerre network. *IEEE*, vol. 30, NO. 6, pp. 934-938.

Haber, R., Bars, R., Schmitz, U. (2011). *Predictive Control in Process Engineering.* Wiley-VCH.

Hahn, J.O., McCombie, D.B., Reisner, A.T., Hojman, H.M., Asada, H.H. (2010). Identification of multichannel cardiovascular dynamics using dual Laguerre basis functions for noninvasive cardiovascular monitoring. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 18, no. 1, pp. 170-176.

Hudzovič, P. (1982). Teória automatického riadenia: Lineárne spojité systémy. SVŠT, Bratislava.

Chen, X., Wu, X. (2011). Design and implementation of model predictive control algorithms for small satellite three-axis stabilization. *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 666-671, China.

Kuo, C.F.J., Vu, H.Q. (2011). Active damping vibration and compensating deflection in the processing-roll system. *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 20, pp. 2125-2138.

Masnadi-Shirazi, M.A., Ghasemi, M. (2000). Adaptive Laguerre network realization. *Signal processing*, vol. 80, no. 10, pp. 2169-2186.

Morari, M., Zafiriou, E. (1989). *Robust process control*. Prentice Hall.

Olivier, P.D. (1994). Online system identification using Laguerre series. *IEEE Proc.-Control Theory Appl*., vol. 141, no. 4.

Parks, T.W. (1971). Choice of time scale in Laguerre approximations using signal measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control,* vol 16., no. 5, pp. 511-513.

Valencia-Palomo, G., Rossiter, J.A. (2010). Using Laguerre functions to improve efficiency of multi-parametric predictive control. *American Control Conference (ACC)*, pp. 4731-4736, USA.

Valencia-Palomo, G., Rossiter, J.A. (2012). Novel programmable logic controller implementation of a predictive controller based on Laguerre functions and multiparametric solutions. *IET Control Theory and Applications,* vol. 6, no. 8, pp. 1003-1014, Mexico.

Wang, L. (2001). Discrete time model predictive control design using Laguerre functions. *American Control Conference (ACC),* vol. 3, pp. 2430-2435, USA.

Wang, L. (2004). Discrete model predictive controller design using Laguerre functions. *Journal of Process Control*, vol. 14, no. 2, pp. 131-142.

Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using Matlab*. Springer.

Zervos, C.C., Dumont, G.Y. (1988). Deterministic adaptive control based on Laguerre series representation. *International Journal of Control*; vol. 48, no. 6, pp. 2333–2359.

PUBLIKÁCIE AUTORA

Škultéty, J., Miklovičová, E., Mrosko, M. (2010). Justification of input and output constraints incorporation into predictive control design. *Technical Computing 2010: 18th Annual Conference Proceedings,* ISBN 978-80-970519-0-7, Bratislava, Slovak Republic.

Škultéty, J., Miklovičová, E. (2011). Model predictive control based on state space formulation. *ELITECH´11: 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology*, nakladateľstvo STU, pp. 1-5, ISBN 978-80-227-3500-1, Bratislava, Slovak Republic.

Škultéty, J., Maláč, J., Beňo, M., Mihál, P. (2011). RobotChallenge 2010 - víťazný robot v kategórii puck collect. *Posterus [elektronický zdroj]*: Internetový časopis, vol. 4, no. 7, ISSN 1338-0087.

Škultéty, J., Miklovičová, E., Mrosko, M. (2011). Input and output constraints in model predictive control design. *ATP Journal plus č. 1: Systémy automatického riadenia*, pp. 6-12, ISSN 1336-5010.

Balogh, R., Škultéty, J. (2011). Robotic team projects at the FEI STU. *Robotics in Education 2011: 2nd International Conference,* pp. 7-13, ISBN 978-3-200-02273-7, Vienna, Austria.

Škultéty, J., Bars, R., Miklovičová, E. (2012). System modeling and prediction using discrete Laguerre networks. *Kybernetika a informatika 2012. Medzinárodná konferencia SSKI a FEI STU,* pp. 55-56, ISBN 978-80-227-3642-8, Skalka pri Kremnici, Slovak Republic.

Škultéty, J., Bars, R., Miklovičová, E. (2012). Laguerre network based system modelling and prediction. *ELITECH´12: 14th Conference of Doctoral Students,* ISBN 978-80-227-3705-0, Bratislava, Slovak Republic.

Škultéty, J., Miklovičová, E., Bars, R. (2012). Model reference control of synchronous generator based on modified Laguerre model. *Power Engineering. Control of Power Systems: 10th International Scientifics Conference CPS,* pp. 185-186, ISBN 978-80-89402-47-2, Tatranské Matliare, Slovakia.

Škultéty, J., Miklovičová, E., Zabet, K., Haber, R., Bars, R. (2012). Predictive functional control of synchronous generator model based on Laguerre network. *Proceedings of the Automation and Applied Computer science workshop 2012 (AACS' 2012),* pp. 201-214, ISBN 978-963-313-059-9, Budapest, Hungary.

Škultéty, J., Miklovičová, E., Bars, R. Analysis of model reference control based on modified Laguerre network with integrator. *14th International Carpathian Control Conference*, pp. 350-355, Rytro, Poland.

Škultéty, J., Bars, R., Miklovičová, E., Predictive model reference control based on discrete Laguerre network with integrator. *19th International Conference on Process Control*, pp. 341-346, Štrbské Pleso, Slovakia.

Škultéty, J., Miklovičová, E., Bars, R. (2013). Predictive synchronous generator excitation control based on Laguerre model. *Journal of Electrical Engineering,* vol. 64, no. 2, pp. 170-175.

Škultéty, J., Bars, R., Miklovičová, E., (2013). Feedforward Model Reference Control Based on Laguerre Model. *Proceedings of the Automation and Applied Computer science workshop 2013 (AACS' 2013),* Budapest, Hungary.

SÚHRN

Predložená dizertačná práca sa zaoberá riadením s referenčným modelom na základe Laguerreovej siete. Pôvodný návrh riadenia je realizovaný v otvorenej slučke v spojitej oblasti, pričom regulátor je tvorený modifikovanou Laguerreovou sieťou nazvanou rozvoj do x. Výhodou tohto prístupu je jednoduchá syntéza regulátora a možnosť jednoducho ovplyvňovať dynamiku výstupu systému iba voľbou referenčného modelu pri návrhu regulátora.

Pôvodný návrh riadenia v otvorenej slučke v spojitej oblasti je v tejto dizertačnej práci odvodený pre diskrétnu oblasť, pričom sme definovali rozvoj do x v diskrétnej oblasti. V dizertačnej práci sú dané tri návrhy na realizáciu uzavretej slučky riadenia s referenčným modelom a to v spojitej a aj v diskrétnej oblasti.

Pre návrh riadenia v uzavretej slučke v spojitej oblasti bola analyzovaná stabilita a robustná stabilita na základe nepresnosti vyplývajúcej z orezania Laguerreovho modelu. Pre analýzu stability a robustnej stability bola využitá teória malého zosilnenia. Pre návrh riadenia v uzavretej slučke s integrátorom v spojitej oblasti sme navyše analyzovali stabilitu s využitím zjednodušenej verzie Nyquistovho kritéria.

V dizertačnej práci je realizovaný aj návrh riadenia s referenčným modelom na základe diskrétnych Laguerreových sietí s integrátorom s kompenzáciou poruchy.

Pre návrhy uzavretého regulačného obvodu s vnútorným modelom a s integrátorom sme realizovali ich prediktívne rozšírenia.

V práci je riešená aj otázka voľby mierky spojitej Laguerreovej siete. Pre jej voľbu bol v práci navrhnutý algoritmus využívajúci ustálené hodnoty prechodových charakteristík.

Pre výpočet koeficientov rozvoja do x sme navrhli použiť metódu najmenších štvorcov. Nami navrhnutý výpočet koeficientov rozvoja do x je vhodné použiť v prípade, keď chceme aproximovať nerýdzo dynamickú prenosovú funkciu, ktorú nie je možné aproximovať Laguerreovou sieťou alebo v prípade, keď hodnoty Laguerreových koeficientov nie sú k dispozícii.

Ďalší výskum v tejto oblasti by mohol byť zameraný na riešenie otvorených problémov, ako je napríklad otázka voľby optimálnych hodnôt ladiacich parametrov pre návrh riadenia s referenčným modelom v uzavretej slučke s integrátorom. Otvoreným problémom je tiež otázka návrhu riadenia s referenčným modelom uvažujúca obmedzenie rozsahu akčného zásahu.

SUMMARY

The dissertation thesis deals with the model reference control design based on the Laguerre network. The original control design is realized in the open loop in continuous time domain and the controller structure is expressed in the form of the modified Laguerre network called x-expansion. The advantage of this approach is the controller design simplicity and the possibility to influence the system dynamics only by the choice of the reference model dynamics.

In this thesis the original open loop control design in the continuous-time domain has been derived also in the discrete-time domain and for this purpose we have defined the x-expansion in the discrete-time domain. We also proposed three modifications of the model reference closed loop control schemes in the continuous-time as well as in the discrete-time domain.

For the model reference closed loop control design in the continuous-time domain the stability and robust stability with respect to the model uncertainty resulting from the Laguerre model truncation has been analyzed using the small gain theory. For the closed loop control design with integrator in the continuous-time domain the stability has been analyzed also using the simplified Nyquist criterion.

In the thesis we also proposed the combination of the Laguerre-based discrete-time model reference control combined with the feedforward control.

For the closed loop control designs we realized their predictive extensions.

We have also dealt with the choice of the time scaling factor for the continuous-time Laguerre network. We have proposed an algorithm using the steady states of step responses.

For calculation of x-expansion coefficients we have proposed the least-squares method. The proposed method is appropriate in case of the non-proper transfer functions that cannot be approximated by the Laguerre network or in case that the Laguerre coefficients are not available.

The future research in this area can focus on open issues, such as the choice of optimal values of tuning parameters for the model reference control with integrator, or the model reference control design taking into account the control signal constraints.