SRETEN B. STOJANOVIĆ[1]
DRAGUTIN LJ. DEBELJKOVIĆ[2]
ILIJA MLADENOVIĆ[1]

[1]**Tehnološki fakultet, Univerzitet u Nišu, Leskovac**

[2]**Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd**

NAUČNI RAD

53.082.76:512.763:66.022.362:519.6

ROBUSNA STABILNOST PERTURBOVANIH LINEARNIH DISKRETNIH SISTEMA SA VIŠE KAŠNJENJA

U radu su prezentovani novi kriterijumi asimptotske stabilnosti nezavisni od kašnjenja za linearne perturbovane diskretne sisteme sa kašnjenjem. Kriterijumi su dati u obliku dovoljnih uslova stabilnosti i veoma su jednostavni za matematički proračun. Numerički primeri su dati da bi ilustrovali dobijene rezultate.

Analiza robusne stabilnosti perturbovanih diskretnih sistema istraživana je od strane mnogih autora, Kolla et al. [1], Rachid [2–3], Yaz et al. [4], Chou [5], Niu et al. [6], Horng et al. [7], Lee et al. [8] and Yedavalli [9].

Trinh et al. [10] su prezentovali dovoljne uslove za D–stabilnost perturbovanih diskretnih sistema sa kašnjenjem. Oni su pokazali da su ovi uslovi manje konzervativni od dotad predloženih uslova.

U poslednjih desetak godina, problemi robusne stabilnosti linearnih sistema sa kašnjenjem pobudili su veliku pažnju istraživača. Mahmoud et al. [11], Phoojaruenchanachai et al. [12], Shen et al. [13] and Xie et al. [14] predložili su kriterijume robusne stabilnosti nezavisne od kašnjenja, dok su Niculescu et al. [15] and Su et al. [16] razvili kriterijume stabilnosti zavisne od kašnjenja koristeći Riccati–jevu ili Lyapuno–vu jednačinu i time redukovali konzervatizam prethodnih rezultata.

Posebno, Li et al. [17] su predložili robusne kriterijume zavisne od kašnjenja za neodređene sisteme sa promenljivim vremenskim kašnjenjem pomoću linearnih matričnih nejednakosti (LMI).

U ovom radu razmatrana je asimptotska stabilnost linearnih perturbovanih diskretnih sistema sa kašnjenjem. Izvedeno je nekoliko dovoljnih uslova stabilnosti ove klase sistema. Prvi predloženi kriterijum stabilnosti iskazan je pomoću spektralnog radijusa matrice odgovarajućeg ekvivalentnog sistema bez kašnjenja. Do drugog kriterijuma došlo se fiktivnim razlaganjem matrica sistema na realni i imaginarni deo i koristeći se principom komparacije sistema, Mori et al. [18]. Poslednji kriterijum predstavlja generalizaciju uslova stabilnosti koji su izvedeni u radu Trinh et al. [19].

Rad je saopšten na Skupu "Savremene tehnologije i privredni razvoj", Leskovac, oktobar 21–22, 2005.

Adresa autora: S.B. Stojanović, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Nišu, 16000 Leskovac, E-mail: ssreten@ptt.yu

Rad primljen: Septembar 20, 2005
Rad prihvaćen: Mart 23, 2006

OZNAKE I PRELIMINARNA RAZMATRANJA

$\Re$	Realni vektorski prostor
F^T	Transponovanje matrice
$F > 0$	Pozitivno definitna matrica
$F \geq 0$	Pozitivno semidefinitna matrica
$\lambda(F)$	Sopstvena vrednost matrice
$\rho(F)$	Spektralni radijus matrice
$\sigma(F)$	Singularna vrednost matrice
$\|F\|$	Euklidska norma matrice

Posmatra se sledeći linearni, nestacionarni, vremenski diskretni sistem:

$$x(k+1) = \sum_{j=0}^{N} A_j(k)\, x(k - h_j). \tag{1}$$

gde su $0 = h_0 \leq h_1 \leq h_2 \leq ... \leq h_N$ celi brojevi koji predstavljaju kašnjenja u sistemu. Nestacionarne matrice $A_j(k) \in \Re^{n\times n}$, j = 0, 1, 2, ..., N, koje su posledica perturbacija u sistemu kao i netačnosti matematičkog modeliranja, su nepoznate, ali se pretpostavlja da su poznate maksimalne devijacije njihovih elemenata: $\max\limits_{k} |a^j_{il}(k)| \leq a^j_{il}$.

U poređenju sa [7], gde je jedino dopušteno da se sa vremenom menja matrica $A_1(k)$, ovde se pretpostavlja da sve matrice $A_j(k)$, $0 \leq j \leq 1$, poseduju ovo svojstvo.

Perturbacije u sistemu mogu se opisati na sledeći način. Sa a^j_{il} označen je (i, l)–ti element matrice A_j. Ako se definišu nove matrice U_j, j = 0, 1, 2, ..., N kao:

$$\alpha_j = \underset{i,l}{m}\, \alpha^j_{il},\ u^j_{il} = \frac{\alpha^j_{il}}{\alpha_j},\ 0 \leq u^j_{il} \leq 1,\ U_j = \left[u^j_{il}\right], \tag{2}$$

onda je:

$$|A_j(k)| \leq \alpha_j U_j,\ j = 0, 1, 2, ..., N,\ \forall\, k. \tag{3}$$

Lema 1. [20] Za bilo koje kvadratne matrice $X \in \Re^{nxn}$ i $Y \in \Re^{nxn}$, važi sledeće:

$$|X| \leq |Y| \Rightarrow \rho(X) \leq \rho(|X|) \leq \rho(Y) \tag{4}$$

Lema 2. [21] Linearni diskretni sistem sa kašnjenjem, opisan sledećom diferencnom jednačinom

$$x(k+1) = \sum_{j=0}^{N} A_j x(k-h_j) \tag{5}$$

asimptotski je stabilan ako je zadovoljen uslov:

$$\sum_{j=0}^{N} \rho(H_j) < 1,\ H_j \triangleq \frac{A_j + A_j^T}{2},\ j = 1, ..., N \tag{6}$$

Lema 3. [21] Linearni diskretni sistem sa kašnjenjem, opisan jed. (5), asimptotski je stabilan ako je zadovoljen sledeći uslov:

$$\sum_{j=0}^{N} \|A_j\| < 1. \tag{7}$$

Lema 4. [10] Za bilo koju kvadratnu matricu X, važi sledeće:

$$\rho(X) < 1 \Rightarrow \det(I_n - X) \neq 0 \tag{8}$$

Lema 5. [10] Neka je:

$$\Gamma(z) \triangleq (zI_n - A)^{-1} \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} G(k) z^{-k} \tag{9}$$

Tada važi:

$$|\Gamma(z)\, z^{-h}| \le \sum_{k=0}^{\infty} \left| G(k) \right| \triangleq L,\ |z| \ge 1 \tag{10}$$

pri čemu G(k) je matrica impulsnih povorki od $\Gamma(z)$ i $G(0) = 0$.

GLAVNI REZULTATI

Teorema 1. Sistem dat jed. (1) asimptotski je stabilan ako važi:

$$\rho(\hat{A}_{eq}) < 1. \tag{11}$$

gde su:

$$\hat{A}_{eq} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0\hat{U}_0 & \hat{\alpha}\hat{U}_1 & \cdots & \hat{\alpha}_{h_N-1}\hat{U}_{h_N-1} & \hat{\alpha}_{h_N}\hat{U}_{h_N} \\ I_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I_n & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_n & 0 \end{bmatrix} \in$$

$$\in \Re^{n(h_N+1)xn(h_N+1)} \tag{12}$$

$$\hat{\alpha}\hat{U}_i = \begin{cases} \alpha_j U_j,\ i = h_j,\ j = 0,1,...,N \\ 0,\ i \neq h_j,\ j = 0,1,\ldots,N \end{cases},\ i = 0,1,..., h_N \tag{13}$$

Dokaz. Ako se definiše novi vektor stanja:

$$\hat{x}(k) \triangleq \left[x^T(k)\ x^T(k-1) \ldots x^T(k-h_N)\right]^T \Re^{nx(h_N+1)}, \tag{14}$$

onda se perturbovani sistem dat jed. (1) može izraziti bez vremenskog kašnjenja koristeći ekvivalentnu matricu, kao što sledi:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}_{eq}\hat{x}(k), \tag{15}$$

gde je :

$$A_{eq}(k) = \begin{bmatrix} \hat{A}_0(k) & \hat{A}_1(k) & \cdots & \hat{A}_{h_N-1}(k) & \hat{A}_{h_N}(k) \\ I_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I_n & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_n & 0 \end{bmatrix} \in$$

$$\in \Re^{n(h_N+1)xn(h_N+1)} \tag{16}$$

$$\hat{A}_i(k) = \begin{cases} A_j(k),\ i = h_j,\ j = 0,1,...,N \\ 0,\quad i \neq h_j,\quad j = 0,1,...,N \end{cases},\ i = 0,1,...,N \tag{17}$$

Potreban i dovoljan uslov za asimptotsku stabilnost ekvivalentnog sistema data je sledećim izrazom:

$$\rho\,(A_{eq}\,(k)\,) < 1,\ \forall k \tag{18}$$

Primenjujući rezultat Leme 1, sledi:

$$\rho\left[A_{eq}(k)\right] \le \rho\left(\begin{bmatrix} |\hat{A}_0(k)| & \cdots & |\hat{A}_{h_N-1}(k)| & |\hat{A}_{h_N(k)}| \\ I_n & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & I_n & 0 \end{bmatrix}\right)$$

$$\le \rho\left(\begin{bmatrix} \hat{\alpha}\hat{U}_0 & \cdots & \hat{\alpha}\hat{U}_{h_N-1} & \hat{\alpha}_{h_N}\hat{U}_{h_N} \\ I_n & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & I_n & 0 \end{bmatrix}\right) \tag{19}$$

Ako je ispunjen uslov dat jed. (11), onda je uslov iz jed. (18) takođe ispunjen, tako da je diskretni perturbovani sistem dat jed. (1) asimptotski stabilan.

Teorema 2. Sistem dat jed. (1) je asimptotski stabilan ako je ispunjen jedan od sledećih uslova:

$$\sum_{j=0}^{N} \alpha_j \rho(H_j) <,\ H_j = \frac{U_j + U_j^T}{2}, \tag{20}$$

$$\sum_{j=0}^{N} \alpha_j \|U_j\| < 1 \tag{21}$$

Dokaz. Na osnovu osobina matričnih modula, može da se napiše:

$$|x(k+1)| \le |A_0(k)x(k)| + \sum_{j=1}^{N} |A_j(k)x(k-h_j)|$$

$$\le |A_0(k)||x(k)| + \sum_{j=1}^{N} |A_j(k)||x(k-h_j)|. \tag{22}$$

$$\le \alpha_0 U_0 |x(k)| + \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j |x(k-h_j)|$$

Ako je:

$$\nu(k) = |\,x(k)\,|,\ \upsilon_{(0)} = \nu_0 = |\,x(0)\,|, \tag{23}$$

važi:

$$\nu(k+1) \le \alpha_0 U_0 \nu(k) + \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j \nu(k-h_j). \quad (24)$$

Ukoliko se definiše novi vektor stanja w(k):

$$w(k+1) = \alpha_0 U_0 w(k) + \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j w(k-h_j), \quad (25)$$

onda je:

$$w(k) \ge \nu(k) \ge x(k). \quad (26)$$

Ovaj sistem nazivamo komparacioni sistem. Očigledno je da iz stabilnosti komparacionog sistema proističe stabilnost sistema (1).

Primenom Leme 2 na (25) dobija se uslov (20), dok uslov (21) sledi iz Leme 3.

Teorema 3. Sistem dat jed. (1) asimptotski je stabilan ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$\alpha_0\, \rho\,(U_0) < 1, \quad (27)$$

$$\rho\left(L_\alpha \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j\right) < 1,$$

$$L_\alpha = \sum_{k=0}^{\infty} (\alpha_0 U_0)^k = (I_n - \alpha_0 U_o)^{-1}, \quad (28)$$

Dokaz. Pretpostavimo da je sistem dat jed. (25) asimptotski stabilan, što je ekvivalentno sledećem uslovu:

$$\det\left(zI_n - \alpha_0 U_0 - \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j z^{-h_j}\right) \ne 0, \ |z| \ge 1. \quad (29)$$

Dalje se ima:

$$\det\left((zI_n - \alpha_0 U_0)\left(I_n - (zI_n - \alpha_0 U_0)^{-1} \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j z^{-h_j}\right)\right) \ne 0,$$

$$|z| \ge 1, \quad (30)$$

$$z^n \det(I_n - \alpha_0 U_0 z^{-1}) \det\left(I_n - (zI_n - \alpha_0 U_0)^{-1} \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j z^{-h_j}\right) \ne 0,$$

$$|z| \ge 1. \quad (31)$$

Neka je:

$$G(z) \triangleq (zI_n - \alpha_0 U_0)^{-1}. \quad (32)$$

Primenjujući rezultat Leme 4, poslednja nejednakost postaje:

$$\rho(\alpha_0 U_0 z^{-1}) < 1 \wedge \rho\left(G(z) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j z^{-h_j}\right) < 1, \ |z| \ge 1. \quad (33)$$

Na osnovu Lema 1 i 5, dobija se:

$$\rho\,(\alpha_0 U_0 z^{-1}) \le \rho\,(|\alpha_0 U_0 z^{-1}|) \le$$

$$\le \rho\,(\alpha_0 U_0 |z^{-1}|) \le \alpha_0\, \rho\,(U_0), \ |z| \ge 1. \quad (34)$$

$$\rho\left(G(z) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j z^{-h_j}\right) \le \rho\left(G(z) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j \left|z^{-h_j}\right|\right), \ |z| \ge 1$$

$$\le \rho\left(\sum_{k=0}^{\infty} |(\alpha_0 A_0)^k| \sum_{j=1}^{N} |\alpha_j U_j|\right) \quad (35)$$

$$= \rho\left(\sum_{k=0}^{\infty} (\alpha_0 A_0)^k \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j\right) = \rho\left(L_\alpha \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j\right)$$

gde je:

$$L_\alpha = \sum_{k=0}^{\infty} (\alpha_0 A_0)^k. \quad (36)$$

Ako su sledeći uslovi zadovoljeni:

$$\alpha_0 \rho(U_0) < 1, \ \rho\left(L_\alpha \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j\right) < 1, \quad (37)$$

onda je sistem dat jed. (25) asimptotski stabilan kao i sistem, dat jed. (1).

Primedba 1. Za linearan, vremenski diskretan sistem bez kašnjenja, sa matricom sistema $\alpha_0 U_0$ fundamentalna matrica iznosi:

$$\Phi(z) = z\,(zI_n - \alpha_0 U_0)^{-1} = zG_0(z), \quad (38)$$

odakle sledi:

$$G_0(z) = z^{-1}\, \Phi(z), \quad (39)$$

pa je:

$$G_0(k) = \Phi(k-1)\, (\alpha_0 U_0)^{k-1}, \ G_0(0) = 0. \quad (40)$$

Ako je matrica $\alpha_0 U_0$ diskretno stabilna, tj. $\rho\,(\alpha_0 U_0) = \alpha_0 \rho(U_0) < 1$, onda je beskonačni niz:

$$L_\alpha = \sum_{k=0}^{\infty} |G_0(k)| = \sum_{k=1}^{\infty} |\alpha_0 U_0|^{k-1} =$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} (\alpha_0 U_0)^k = (I_n - \alpha_0 U_0)^{-1}, \quad (41)$$

konvergentan, tako da se matrica L_α može direktno sračunati.

NUMERIČKI PRIMERI

Primer 1. Razmotrimo stabilnost linearnog perturbovanog vremenski diskretnog sistema sa kašnjenjem opisanog sa:

$$x(k+1) = A_0(k)\, x(k) + A_1\, x(k-1) + A_2(k)\, x(k-2),$$

gde su:

$$\max_k |A_0(k)| \le \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.1 & 0.15 \end{bmatrix} = \alpha_0 U_0,$$

$$\max_k |A_1(k)| \le \gamma \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} = \gamma \alpha_1 U_1,$$

$$\max_k |A_2(k)| \le \gamma \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.15 & 0.1 \end{bmatrix} = \alpha_2 U_2.$$

Tabela 1. Rezultati stabilnosti sistema za $\gamma = 1$
Table 1. Results of the stability of the system for $\gamma = 1$

Teorema (Kriterijum)	Matematički izraz	Vrednost leve strane kriterijuma za $\gamma = 1$	Vrednost parametra γ_b
1, (11)	$\rho(\hat{A}_{eq}) < 1$	0.9817	1.1055
2, (20)	$\sum_{j=0}^{N} \alpha_j \rho(H_j) < 1$	0.9930	1.0206
2, (21)	$\sum_{j=0}^{N} \alpha_j \lVert U_j \rVert < 1$	1.0462	0.8734
3, (28)	$\alpha_0 \rho(U_o) < 1$, $\rho\left(L_\alpha \sum_{j=1}^{N} \alpha_j U_j\right) < 1$	0.9453	1.1055

Koristeći Teoreme 1–3 ispitana je stabilnost posmatranog sistema za slučaj $\gamma = 1$. Takođe, određena je i gornja granica parametra γ_b pri kojoj se posmatrani sistem nalazi na granici stabilnosti. Rezultati su prikazani u tabeli 1.

Na osnovu vrednosti levih strana navedenih kriterijumima stabilnosti, koje se upoređuju sa jedinicom, zaključujemo da svi kriterijumi, izuzev kriterijuma (21), potvrđuju asimptotsku stabilnost datog sistema za $\gamma = 1$. Na osnovu kriterijuma (21) iz Teoreme 2 ne može se proceniti stabilnosti datog sistema pošto vrednost njegove leve strane prelazi jedinicu. U odnosu na vrednost leve strane kriterijuma, najmanju konzervativnost pokazuje kriterijum (28) a najveću kriterijum (21). Međutim, u odnosu na parametar γ_b, pregledom poslednje kolone u tabeli 1, zaključujemo da su kriterijumi (11) i (28) podjednako konzervativni, što se može i dokazati:

Za $\gamma = \gamma_b$ jed. (11) postaje

$$\rho(\hat{A}_{eq}(\gamma_b)) = 1 \Leftrightarrow \det(1 \cdot I - \hat{A}_{eq}(\gamma_b)) =$$

$$= \det(I - \alpha_0 U_0 - \alpha_1(\gamma_b) U_1 - \alpha_2 U_2)$$

$$= \det(I - \alpha_0 U_0) \cdot \det(I - (I - \alpha_0 U_0)^{-1} (\alpha_1(\gamma_b) U_1 + \alpha_2 U_2)) = 0$$

Odavde, primenom Leme 4, slede uslovi:

$$\alpha_0 \rho(U_0) < 0, \quad \rho\left[L_\alpha(\gamma_b \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2)\right] = 1$$

koji u stvari predstavljaju kriterijum (28) za $\gamma = \gamma_b$. Time je dokazano da kriterijumi (11) i (28) daju istu gornju granicu za γ_b, te poseduju istu konzervativnost.

ZAKLJUČAK

U radu su prezentovani novi kriterijumi za asimptotsku stabilnost linearnih perturbovanih diskretnih sistema sa kašnjenjem. Ovi kriterijumi su nezavisni od kašnjenja i iskazani su u obliku dovoljnih uslova stabilnosti. Dat je numerički primer kojim se ilustruje primenljivost dobijenih rezultata.

LITERATURA

[1] S.R. Kolla, R.K. Yedavalli and, J.B. Farison, Robust stability bounds on time–varying perturbations for state–space models of linear discrete–time systems, International Journal of Control, **50** (1989)151–159.

[2] Rachid, Robustness of discrete systems under structured uncertainties, International Journal of Control, **50** (1989) 1563–1566.

[3] Rachid, Robustness of pole assignment in a specified region for perturbed systems, International Journal of Systems Science, **21** (1990) 579–585.

[4] E. Yaz and X. Niu, Stability robustness of linear discrete–time systems in the presence of uncertainty, International Journal of Control, **50** (1989) 173–182.

[5] J.H. Chou, Pole–assignment robustness in a specified disk, Systems and Control Letters, **16** (1991) 41–44.

[6] X. Niu, J. A De Abreu–Garcia and E. Yaz, Improved bounds for linear discrete–time systems with structured perturbations, IEEE Trans. Automat. Control, **37** (1992) 1170–1173.

[7] H.Y. Horng, J.H. Chou and I.R. Horng, Robustness of eigenvalue clustering in various regions of the complex plane for perturbed systems, International Journal of Control, **57** (1993) 1469–1484.

[8] H. Lee, T.H.S. Li, and F.C. Kung, D–stability analysis for discrete systems with a time delay, Systems and Control Letters, **19** (1992) 213–219.

[9] R.K. Yedavalli, Robust root clustering for linear uncertain systems using generalized Lyapunov theory, Automatica, **29** (1993) 237–240.

[10] H. Trinh and M. Aldeen, D–Stability Analysis of Discrete–Delay Perturbed Systems, International Journal of Control, **61** (2) (1995) 493–505.

[11] M.S. Mahmoud and N. F Al–Muthairi, Quadratic stabilization of continuous time systems with state–delay and norm–bounded time–varying uncertainties, IEEE Trans. Automat. Control, **39** (1994) 2135–2139.

[12] S. Phoojaruenchanachai and K Furuta, Memoryless stabilization of uncertain linear systems including time–varying state delays. IEEE Trans. Automat. Control, **37**(1992) 375–379.

[13] J.C. Shen, B.S. Chen and F.C. Kung, Memoryless stabilization of uncertain dynamic delay systems: Riccati equation approach. IEEE Trans. Automat. Control, **36** (1991) 638–640.

[14] L. Xie and C. E. de Souza, Robust stabilization and disturbance attenuation for uncertain delay systems. Proc. 1993 European Control Conf., Groningen, The Netherlands (1993).

[15] S.I. Niculescu, C.E. de Souza, J.M. Dion and L. Dugrad, Robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay: Single delay case (I). Proc. IFAC Symp. Robust Control Design, Rio de Janerio, Brazil, September (1994).

[16] T.J. Su and C.G. Huang, Robust stability of delay dependence for linear uncertain systems. IEEE Trans. Automat. Control, **37** (1992) 1656–1159.

[17] X. Li and C.E. de Souza, Delay–dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A linear matrix inequality approach. IEEE Trans. Automat. Control, **42** (1997) 1144–1148.

[18] T. Mori, N. Fukuma. and M. Kuwahara, Simple stability criteria for single and composite linear systems with time de-

lay, International Journal of Control, **34** (6) (1981) 1175–1184.

[19] H. Trinh and M. Aldeen, D–Stability Analysis of Discrete–Delay Perturbed Systems, International Journal of Control, **61** (2) (1995) 493–505.

[20] C.D. Meyer, Matrix analysis and applied linear algebra, SIAM, (2001).

[21] S.B. Stojanović, D.Lj. Debeljković, On the Asymptotic Stability of Linear Discrete Time Delay Systems, Facta Universitatis (YU), Series Mechanical Engineering, Vol. 2, No **1** (2004) pp. 35–48.

SUMMARY

ROBUST STABILITY OF LINEAR PERTURBED DISCRETE SYSTEMS WITH MULTIPLE TIME–DELAY

(Scientific paper)

Sreten B. Stojanović[1], Dragutin Lj. Debeljković[2], Ilija Mladenović[1]
[1]Faculty of Technology, University of Niš, Leskovac, [2]Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade

The paper presents some new sufficient conditions, independent of delay, for the asymptotic stability of a particular class of linear perturbed time–delay systems with multiple delays. The proposed criteria introduce a smaller number of assumptions and are expressed in more natural and simpler mathematical forms. Numerical results are presented to support and illustrate the derived results.

Key words: Asymptotic stability • robustness • Time delay systems • Sufficient conditions •

Ključne reči: Robusna stabilnost • Perturbovani sistemi • Sistemi sa kašnjenjem •