NASTAVOVANIE PARAMETROV REGULÁTORA PRE REÁLNE OBJEKTY

V. Veselý, M. Hypiusová a Ľ. Grman

Katedra automatizovaných systémov riadenia
Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.
E-mail: vesely@kasr.elf.stuba.sk

Cieľom tohto príspevku je osloviť inžinierov projektantov, ktorí sa venujú návrhom riadiacich systémov a nastavovaniu parametrov regulátorov v praxi. V súčasnosti okrem známych metód z teórie automatického riadenia ako sú analytické metódy a v praxi využívané tzv. inžinierske metódy sa objavila celá skupina metód, ktoré sa venujú návrhu parametrov regulátorov pre reálne objekty t.j. objekty, v ktorých sa menia parametre. V príspevku sú uvedené modely reálnych objektov, pre ktoré sú rozpracované metódy návrhu robustných regulátorov zaručujúce stabilitu a kvalitu riadenia pre predpísané zmeny parametrov reálnych objektoch.

Kľúčové slová: robustné riadenie, multilineárna neurčitosť, intervalový systém.

ÚVOD

Jednou zo základných podmienok činnosti automatizovaného systému riadenia technologických procesov je zabezpečenie stability príslušných regulačných obvodov. Zabezpečením stability, prípadne aj kvality riadenia dynamického režimu riadeného objektu sa vytvoria základné podmienky pre realizáciu vyšších foriem riadenia ako sú napr. zabezpečenie vzájomnej spolupráce jednotlivých objektov, optimalizácia činnosti celého technologického procesu a pod. Zabezpečenie stability a kvality riadenia príslušných regulačných obvodov je spojené s návrhom parametrov jednotlivých regulátorov alebo použitím adaptívnych regulátorov, ktoré na základe vhodných nimi realizovaných experimentov sú schopné nastaviť parametre napr. PID regulátora. Použitie analytických, inžinierskych alebo adaptívnych metód určovanie parametrov regulátorov je priamo alebo nepriamo spojené so znalosťou matematického modelu objektu. Napr. použitím inžinierskej metódy nastavovania parametrov regulátora známej ako metóda Zieglera-Nicholsa, ktorú používajú v prevažnej miere aj adaptívne regulátory typu PID na základe uskutočnených experimentov sa identifikuje jeden dôležitý bod frekvenčnej charakteristiky objektu a pomocou neho sa zo známych tabuliek Zieglera-Nicholsa určujú parametre PID regulátora. Obdobne aj analytické metódy návrhu parametrov regulátora vyžadujú dostatočne presnú znalosť matematického modelu, objektu, napr. znalosť prenosovej funkcie objektu. V reálnej praxi je možné nájsť desiatky dôvodov, prečo sa parametre objektu menia napr. zmenou režimu technologického procesu, zmenou veľkosti technologických premenných, zmenou štruktúry regulovaného objektu, atď. Tieto zmeny vyvolávajú zmenu parametrov modelu regulovaného objektu a tie zase môžu aj destabilizovať celý regulačný obvod. V tomto prípade je nevyhnutné znova prestaviť parametre regulátora tak, aby bola zabezpečená základná podmienka činnosti systému a to riadenie dynamického režimu. Aby sa parametre regulátora nemuseli neustále prestavovať alebo, aby v procese činnosti automatizovaného systému sa kvalita regulácie výraznejšie nemenila je potrebné zabezpečiť „robustnosť systému“. Spätnoväzobný regulačný obvod je robustný vtedy, ak sa zachovajú jeho základné vlastnosti ako je stabilita, kvalita regulácie ako pri pôsobení rôznych porúch, tak aj pri zmene parametrov objektu. Zvláštnosťou teórie robustného riadenia dynamických systémov je v tom, že modelovanie procesu, analýza vlastností objektu ako aj návrh parametrov regulátora sa uskutočňuje pomocou neúplného a nepresného matematického modelu riadeného procesu. V tomto prípade cieľ identifikácie riadeného procesu nespočíva len v zistení modelu objektu, ale aj v zistení toho, ako sa menia parametre objektu v procese reálnej činnosti. V ďalšom uvedieme niektoré typy modelov reálnych procesov aj s určením príslušných neurčití modelu.

1. LINEÁRNE MODELY REÁLNYCH PROCESOV

Budeme predpokladať, že výsledkom experimentálnej identifikácie reálneho objektu je prenosová funkcia objektu. Parametre prenosovej funkcie objektu sa môžu meniť rôznymi spôsobmi, v princípe tieto zmeny je možné zhrnúť do niekoľkých tried.

1.1 Intervalové systémy

Pod lineárne intervalovými systémami rozumieme také systémy, ktorých koeficienty prenosovej funkcie objektu sa menia nezávisle od seba a v zadanom intervale. Výsledkom identifikácie objektu nech je prenosová funkcia objektu v tvare

$$G(s)=\frac{b_0+b_1s+b_2s^2+\ldots+b_ms^m}{a_0+a_1s+a_2s^2+\ldots+a_{n-1}s^{n-1}+s_n} \tag{1}$$

kde $b_i \in \langle \underline{b}_i, \bar{b}_i \rangle \quad i=0,1,\ldots,m$

$a_j \in \langle \underline{a}_j, \bar{a}_j \rangle \quad j=0,1,\ldots,n-1$

$\underline{b}_i, \bar{b}_i, \underline{a}_j, \bar{a}_j$ sú dolné resp. horné ohraničenia zmien koeficientov prenosovej funkcie objektu.

Ako z rovnice (1) vyplýva, počet prenosových funkcií objektu je nekonečne veľký a preto návrh parametrov regulátora, ktorý by súčasne stabilizoval len niekoľko prenosových funkcií z celej množiny, principiálne nemôže splniť podmienku zabezpečenia stability a kvality regulácie pre objekt (1).

V praxi, sa veľmi často stretávame s prípadom, keď niekoľko lineárnych intervalových systémov sú zapojené do série. V tomto prípade celkový objekt riadenia patrí už do triedy multilineárnych systémov

$$G(s)=\frac{B_1(s)B_2(s)\ldots B_p(s)}{A_1(s)A_2(s)\ldots A_p(s)} \tag{2}$$

kde $\dfrac{B_i(s)}{A_i(s)}, \quad i=1,2,\ldots,p$ predstavuje lineárny intervalový systém.

Multilineárny intervalový systém môžeme dostať aj v prípade, keď regulovaný objekt má premenlivé dopravné oneskorenie

$$G(s)=\frac{B(s)}{A(s)}e^{-\tau s} \tag{3}$$

kde $B(s), A(s)$ sú intervalové polynómy a $\tau \in \langle \underline{\tau}, \overline{\tau} \rangle$. Keď nahradíme člen $e^{-\tau s}$ Padeho rozvojom

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2} s}{1 + \frac{\tau}{2} s} \tag{4}$$

z prenosovej funkcie (3) a (4) vidno, že obdržíme multilineárny systém.

Návrh parametra regulátora pre intervalové systémy uskutočníme nasledovným spôsobom. Na základe metód návrhu robustných regulátorov sa pre jednotlivé typy prenosových funkcií (1)-(3) navrhne tzv. hraničný prenos. Hraničný prenos objektu predstavuje konečný počet prenosových funkcií objektu s konštantnými parametrami, ktoré jednoznačne s navrhovaným regulátorom, s prenosovou funkciou $R(s)$, určujú stabilitu celej množiny prenosových funkcií (1) – (3). Parametre regulátora $R(s)$ je potrebné vybrať tak, aby súčasne stabilizovali určený konečný počet prenosových funkcií, ktoré tvoria hraničný prenos objektu.

1.2 Polytopické systémy

Predpokladajme, že experimentálnou identifikáciou objektu riadenia sa zistilo, že časť koeficientov v prenosovej funkcii objektu sa menia spolu. Prenos takéhoto objektu možno zapísať v tvare

$$G(s) = \frac{b_0(s) + \sum_{i=1}^{p} q_i b_i(s)}{a_0(s) + \sum_{i=1}^{p} q_i a_i(s)} \tag{5}$$

kde $b_0(s), b_i(s), a_0(s), a_i(s), i = 1,2,...,p$ sú známe polynómy s konštantnými koeficientami a koeficienty q_i sú neznáme, ale vieme, že sa menia v zadanom intervale $q_i \in \langle \underline{q}_i, \overline{q}_i \rangle$, $i = 1,2,...,p$ kde $\underline{q}_i, \overline{q}_i$ sú dolné a horné ohraničenia zmien koeficientov q_i. Keď necháme meniť koeficienty $q_i = \underline{q}_i$ alebo $q_i = \overline{q}_i$ vo všeobecnosti je možné získať 2^p prenosových funkcií objektu s konštantnými koeficientami. Tieto prenosové funkcie je možné „umiestniť“ do vrcholu p rozmerného kvádra neurčitostí a preto prenosová funkcia (5) opisuje tzv. polytopické systémy. Aby prenosová funkcia (5) bola v uzavretom regulačnom obvode s regulátorom $R(s)$ stabilná, regulátor musí zabezpečiť stabilitu ako 2^p prenosových funkcií objektu, tak aj stabilitu na každej hrane kvádra, ktorá spája dva vrcholy. Náročnosť návrhu takéhoto regulátora je zrejmá, ale súčasné výsledky teórie robustného riadenia umožňujú túto úlohu úspešne riešiť. Navrhnutý regulátor zabezpečí ako stabilitu, tak aj kvalitu regulácie v celom rozsahu zmien všetkých koeficientov q_i, $i = 1,2,...,p$.

1.3 Systémy s neštruktúrovanými neurčitosťami

V prvých dvoch prípadoch sa experimentálnou identifikáciou určili možné zmeny jednotlivých koeficientov prenosovej funkcie objektu. Niekedy nie je možné ale tieto zmeny parametrov určiť. V tomto prípade sa zavedie do systému tzv. neštruktúrovaná neurčitosť a prenosovú funkciu objektu zapisujeme v tvare

$$G(s) = G_0(s) + \delta G(s) \tag{6}$$

kde $G_0(s)$ predstavuje prenos nominálneho modelu objektu a $\delta G(s)$ je neznáma prenosová funkcia, ktorej modul je ohraničený, t.j.

$$|\delta G(j\omega)| \leq l_a(\omega) \tag{7}$$

Cieľom návrhu regulátora je, aby zabezpečil stabilitu regulačného obvodu ako pre nominálny model, tak aj pre ľubovolnú stabilnú prenosovú funkciu $\delta G(s)$, ktorá vyhovuje podmienke (7). Riešenie postavenej úlohy je náročné, ale uskutočniteľné aj pre prípady zabezpečenia nielen stability, ale aj kvality regulácie.

1.4 Mnohorozmerné objekty s dopravným oneskorením

Pod pojmom mnohorozmerné objekty rozumieme také objekty, na ktorom sa redukuje viacej výstupných riadených veličín. Tieto objekty sú z hľadiska riadenia veľmi náročné, lebo medzi regulovanými veličinami existujú interakčné väzby. Interakčné väzby nedovoľujú navrhovať parametre regulátorov pre každú regulovanú výstupnú veličinu samostatne. Takýto objekt je opísaný maticou prenosových funkcií, napr. pre systém s dvoma vstupmi a výstupmi máme

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} = G(s)u(s) \tag{8}$$

kde y_1, y_2 sú výstupné regulované veličiny
u_1, u_2 - akčné veličiny
Napr. pre prvú výstupnú veličinu platí:

$$y_1(s) = G_{11}(s)u_1(s) + G_{12}(s)u_2(s) \tag{9}$$

Z rovnice vidno, že druhá akčná veličina $u_2(s)$ vplýva cez prenosovú funkciu $G_{12}(s)$ na prvú výstupnú veličinu. V mnohorozmerných systémoch v jednotlivých prenosových funkciách $G_{ij}(s)$ v (8) veľmi často sa nachádzajú aj členy s dopravným oneskorením. Neurčitosti v modeloch mnohorozmerných systémoch môžu byť zahrnuté buď v tvare polytopického opisu alebo neštruktúrovanej neurčitosti. Pre obidva prípady problematika návrhu decentralizovaných regulátorov (jeden regulátor riadi jeden výstup s jednou akčnou veličinou) je úspešne vyriešená a je možné zabezpečiť nielen stabilitu, ale aj kvalitu regulácie.

2. PRÍKLAD

Cieľom tejto časti je demonštrovať návrh robustného regulátora pomocou amplitúdovej a fázovej logaritmickej frekvenčnej charakteristiky pre polytopický objekt (5) a s premenlivým dopravným oneskorením

$$G(s)=\frac{0.1s^2+s+0.4+q_1(0.1s+0.2)+q_2(0.2s+0.1)}{s^3+2.5s^2+s+0.3+q_1\left(0.4s^2+0.3s+0.1\right)+q_2\left(0.2s^2+0.3s+0.1\right)}e^{-\tau s}$$

kde $q_i \in \langle -1, 1\rangle, \quad i=1, 2$

$\tau \in \langle 0.5, 1\rangle$.

Na obr. 1 sú znázornené logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu. Vo frekvenčnej oblasti sme navrhli PI regulátor v tvare

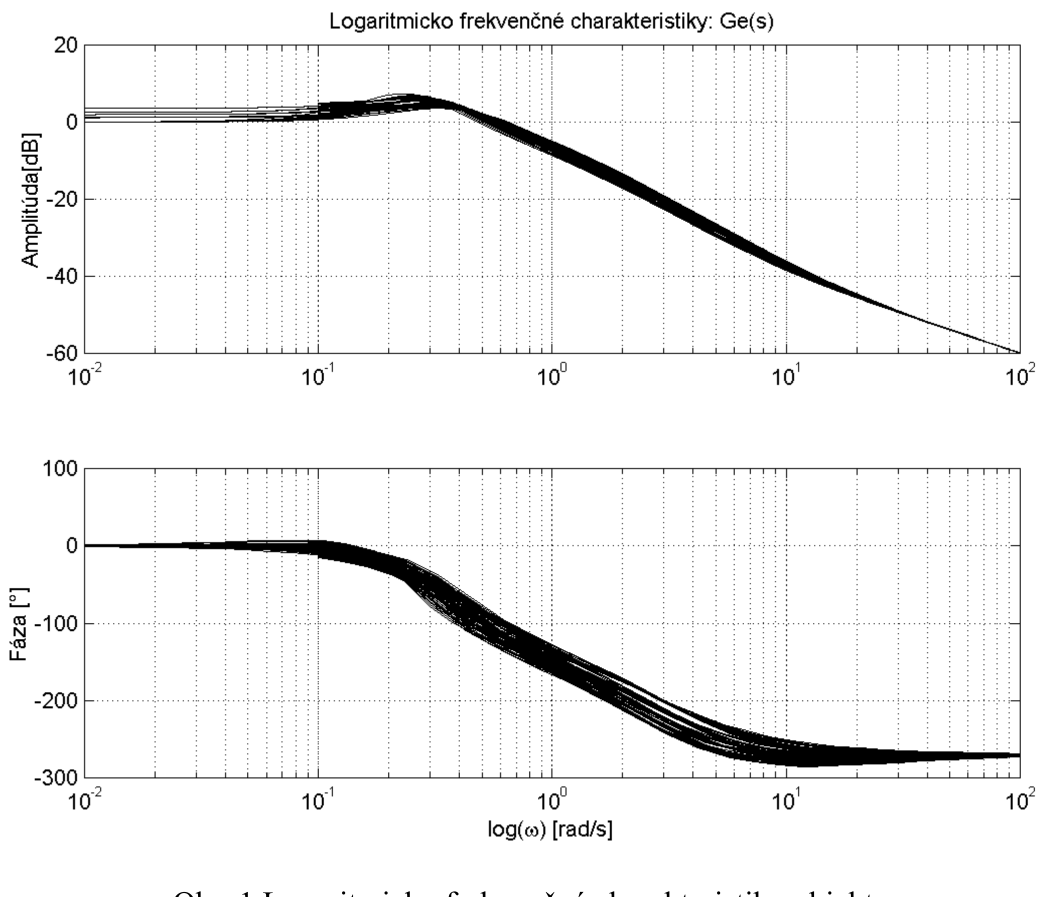
$$G_R(s)=K\left(1+\frac{1}{T_i s}\right)$$

aby bezpečnosť vo fáze bola minimálne 40°. Výsledkom návrhu sú nasledovné koeficienty regulátora: $K=0.8$, $T_i=20$ [s].

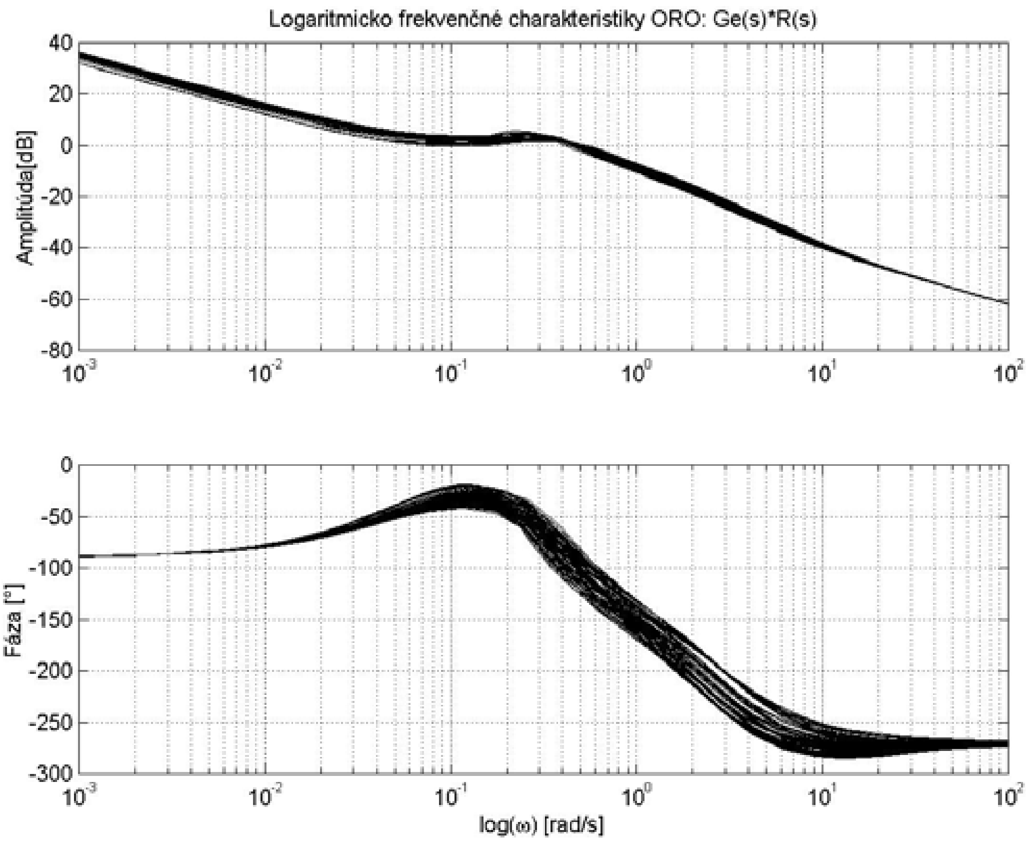
Na obr. 2 sú znázornené logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu s regulátorom, z ktorých je odčítaná fázová a amplitúdová bezpečnosť:

$$\Delta\varphi \in \langle 43, 70\rangle^\circ$$

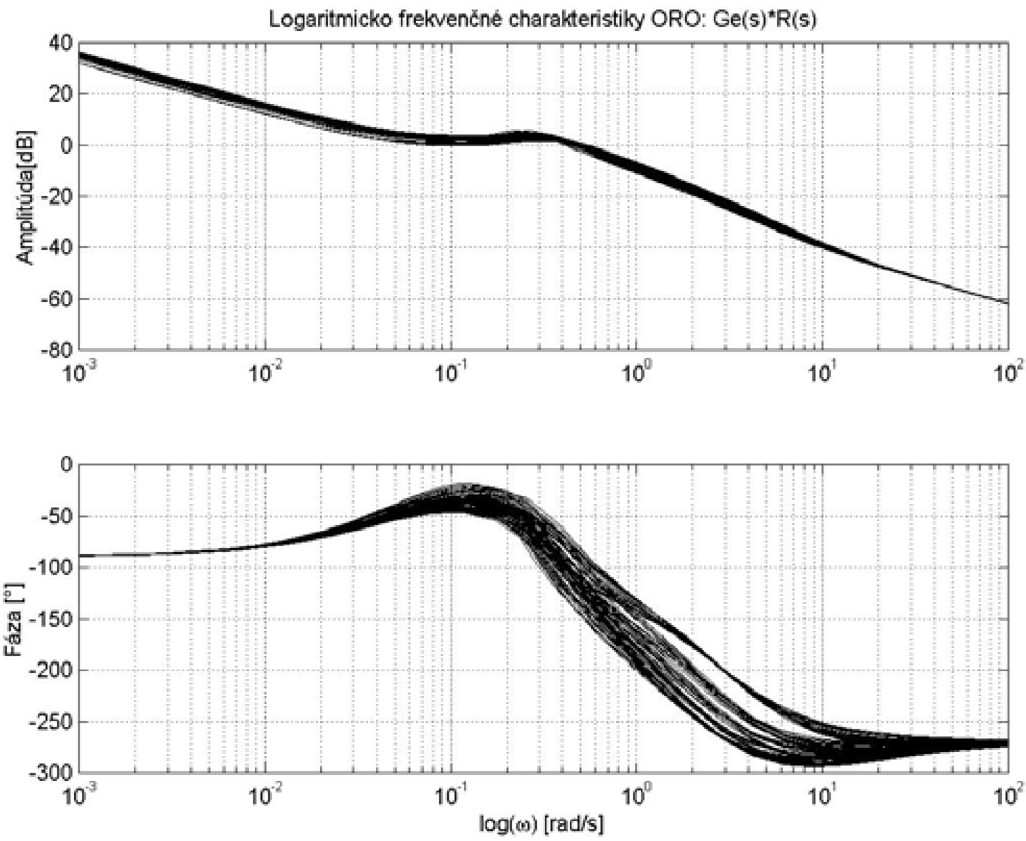
$$\Delta K \in \langle 10, 18\rangle\ dB$$



Obr. 1 Logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu



Obr. 2 Logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu s dopravným oneskorením $\tau \in \langle 0.5,1 \rangle$ a s regulátorom



Obr. 3 Logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu s dopravným oneskorením $\tau \in \langle 0.5,1.8 \rangle$ a s regulátorom

Na obr. 3 sú znázornené logaritmicko frekvenčné charakteristiky objektu s regulátorom, kde dopravné oneskorenie objektu je z intervalu $\tau \in \langle 0.5, 1.8 \rangle$. Opäť je odčítaná fázová a amplitúdová bezpečnosť:

$$\Delta\varphi \in \langle 27, 55 \rangle^{\circ}$$
$$\Delta K \in \langle 5, 17 \rangle \; dB$$

Z logaritmicko frekvenčných charakteristík je vidieť, že nastavený PI regulátor zabezpečuje stabilitu a kvalitu riadenia nielen pre pôvodné dopravné oneskorenie objektu $\tau \in \langle 0.5, 1 \rangle$, ale aj pre väčší interval dopravného oneskorenia $\tau = \langle 0.5, 1.8 \rangle$. Ďalej je vidieť, že kvalita riadenia pri väčšom intervale dopravného oneskorenia je horšia.

ZÁVER

Cieľom príspevku bolo ukázať vybrané modely reálnych objektov, pre ktoré existujú metódy a programové vybavenie na návrh robustných regulátorov. Tieto metódy sú každodenne overované študentmi a výsledky ukazujú, že môžu úspešne nahradiť doteraz v praxi používané inžinierske ako aj analytické metódy, lebo zohľadňujú reálnu situáciu v praxi - zmenu parametrov objektu.

LITERATÚRA

BARTLETT, A.C., HOLLOT, C.V., LIN, H.: Root location of an entire polytope of polynomials: it suffices to check the edges. *Mathematics of Controls, Signals and Systems*, vol.1, pp. 61-71, 1988.

BHATTACHARYYA, S.P., CHAPELLAT, H., KEEL, L.H.: Robust Control: The Parametric Approach, *Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.*, 1995.

CHAPELLAT, H., BHATTACHARYYA, S.P.: A generalization of Kharitonov´s theorem: robust stability of interval plants. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-34, No. 3, pp. 306-311, 1989.

KHARITONOV, V. L: Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations, *Differential Equations*, vol. 14, pp. 1483-1485, 1979.