

UOT 6250/519.7:816

P.S. CƏFƏROV, E.R. ZEYNALOV, A.M. MUSTAFAYEVA, S.M. CƏFƏROV

QEYRİ-REQULYAR HƏRƏKƏTLİ DİNAMİK OBYEKT, BİHE MOBİL ROBOTU ÜÇÜN ROBAST İDARƏETMƏNİN-TƏNZİMLƏYİCİNİN ANALİTİK SİNTEZİ

Təqdim edilən məqalədə parametrik qeyri-müəyyənliyə malik qeyri-requlyar hərəkətli dinamik obyektlər üçün dayanıqlıq dərəcəsinə görə robastlığı təmin edən qeyri-səlis T-S modeli tənzimləyicilərin analitik sintezi üsulu təklif edilmişdir. Təklif edilmiş üsulun səmərəliliyi bilavasitə BİHE mobil robotu üçün qeyri-səlis tənzimləyicilərin analitik sintezinin təmsalında nümayiş edilmişdir.

Açar sözlər: qeyri-səlis T-S (Tagaki-Sugeno) modeli tənzimləyici, robastlıq, dayanıqlıq dərəcəsi, qeyri-requlyar hərəkətli obyekt, parametrik qeyri müəyyənlik

1. Giriş. Bir sıra texniki qurğular, məsələn, manipulyasiyalı robotlar [1, 3], mexatron modullar, texnoloji proseslər dinamik idarəetmə obyektləri kimi qeyri-requlyar hərəkətli olub qeyri-müəyyənliklərə malikdirlər. Belə idarəetmə obyektləri əsasən mürəkkəb qeyri-xətti differensial tənliklərlə yazılırlar [1-5]. Bundan başqa bu tip idarəetmə obyektlərində qarşılıqlı əlaqələr və sadələşdirmələr səbəbindən onların riyazi modelləri xətalara malik ola bilərlər. Bu səbəblərdən də məlum üsullarla, məsələn, xətti matris bərabərsizliyi (XMB) üsulu, Lyapunovun kvadratik funksiyası ($V(t) = x^T(t)Px(t) - P$ – müsbət təyin olunmuş kvadratik matris) əsasında qeyri-xətti riyazi modellərlə yazılan dinamik obyektlər üçün sintez edilmiş avtomatik idarəetmə sistemləri (AİS) bəzən keyfiyyət göstəricilərinə olan tələbləri, o cümlədən də? robastlığı ödəyə bilmirlər [3-9].

Qeyri-xətti və qeyri-müəyyənliklərə malik modellərlə yazılan dinamik obyektlərin-mobil robotların idarə olunması üçün tənzimləyicilərin sintezi qeyri-səlis məntiq nəzəriyyəsinin tətbiqi əsasında sintez edilmiş tənzimləyicilər biliyə əsaslandığından onların digər obyektlərə - robotlara tətbiqi məhduddur. Bundan başqa belə sistemlərdə AİS-in keyfiyyət göstəriciləri ilə dayanıqlığı və obyektin parametrləri arasındakı asılıqları müəyyənləşdirmək ya çətin, yaxud da heç mümkün olmur. Qeyd olunanları nəzərə alaraq, aşağıda bir sinif qeyri-səlis T-S (Tagaki-Sugeno) tipli riyazi modellərə gətirilə bilən qeyri-xətti çoxəlaqəli diferensial tənliklərlə yazılan dinamik obyektlər, məsələn, bütün istiqamətlərə hərəkət edən (BİHE) mobil robotlar, üçün layihələndirilən AİS-lərdə tələb olunan dayanıqlıq dərəcəsi və dəqiqlik təmin edən tənzimləyicilərin analitik olaraq parametrik sintezi üsulu təklif edilir.

Analitik olaraq parametrik sintez edilmiş T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyicinin BİHE mobil robotun idarəedilməsində tətbiqi və həmin AİS-in modelləşdirilməsi təklif olunmuş analitik sintez üsulunun səmərəli olduğunu təsdiq etmişdir. Belə ki, bütün istiqamətlərə hərəkət edən (BİHE) mobil robotun idarəetmə sistemi robast olub, mümkün maksimal dayanıqlıq dərəcəsinə və cəld işləməni həm sürətə, həm də koordinatlara görə təmin edir.

2. Çoxəlaqəli qeyri-səlis T-S tipli modellə yazıla bilinən qeyri müəyyənlikli dinamik obyektlər üçün robast tənzimləyicinin sintezi məsələsinin qoyuluşu. Bir çox mobil və manipulyasiyalı robotların kinematik bəndlərinin (birləşmələrinin) dinamik hərəkəti n -tərtibli çoxəlaqəli qeyri-xətti diferensial tənliklərlə yazılırlar [1-9]. Robotların qeyri-xətti riyazi modelləri əksər hallarda qeyri-səlis T-S tipli modellərə transformasiya etmək mümkündür [3-9].

Məlum [3-9] işlərində qeyri-səlis T-S tipli modellə yazılan sistemlərdə tənzimləyicinin sintezi məsələsinin həlli əsasən dayanıqlığın (stabilliyin) ödənilməsi şərtlərindən istifadə olunur, dayanıqlığın dərəcəsinin yüksək olub-olmaması müəyyənləşdirilmir. Bundan başqa, məlum üsullarda bütövlükdə idarəetmə sisteminin digər keyfiyyət meyarlarına olan tələblərin nə dərəcədə ödənilməsi tənzimləyicinin sintezi prosesində nəzərə almaq mümkün olmur. Məsələn, qeyri xətti dinamik obyektlər üçün idarəetmənin-tənzimləyicinin sintezi məsələsinin həllində istifadə olunan

xətti matris bərabərsizliyi – XMB (LMİ-linear matrix inequalities) üsulunda yalnız sistemin dayanıqlı olması şərtləri nəzərə alınır. XMB üsulunda sintez məsələsi ardıcıl iterativ prosedurlu olub, sistemin digər keyfiyyət göctəricilərini nəzərə almaq mümkün deyil. Bundan başqa, XMB üsulunda tənzimləyicinin təyin olunmuş parametrləri kifayət qədər böyük olmaqla, həm də, müxtəlif işarəli ola bilərlər ki, praktikada bunu realizə etmək həmişə mümkün olmur. Başqa sözlə, tənzimləyicinin sazlanma parametrlərinə məhdudiyətlər qoyulmur, bu isə praktiki realizasiya baxımından yolverilməzdir.

Bir sıra qeyri müəyyənlikli qeyri-requlyar hərəkətli dinamik obyektlər, məsələn, robotlar [1-7], ümumi şəkildə qeyri-səlis diferensiallara daxiletmə (tənliyi) şəklində yazıla bilər:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &\in f(x(t), u(t), p), \\ y(t) &\in \varphi(x(t), u(t)), \\ x &\in R^{n_x}, \quad u \in R^{n_u}, \quad t \in [t_0, t_n], \quad p \in P \end{aligned} \quad (2.1)$$

Burada x -obyekti xarakterizə edən $n_x = \dim x$ -ölçülü, $u - n_u = \dim u$ - ölçülü, $p - n_p = \dim p$ -ölçülü qeyri müəyyənlikli (qeyri dəqiq) parametrlər olub, obyektin texniki parametrlərini (bəzən də bir qisim xarici həyacanlandırıcı təsirləri) xarakterizə edən vektordur, $y(t)$ – obyektin $m_y = \dim y$ ölçülü çıxış dəyişənləridir. P - isə qeyri müəyyənlikli p parametrlərin dəyişmə oblastını (çoxluluğunu) xarakterizə edir, $[t_0, t_n]$ – idarəetmə prosesinin zaman intervalıdır.

Obyektin parametrik qeyri-müəyyənliyini açarkən, başqa sözlə. idarəetməni-tənzimləyicini sintez edərkən, adətən. əksər hallarda p vektorunu qeyri-səlis ədədlər- çoxluqlar $\tilde{p} = [\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_{np}]$, yaxud da interval ədədlər-çoxluqlar şəklində təsvir olunurlar

$$p_i = \text{Supp } \tilde{p}_i = [p_i^{\alpha_1}, p_i^{\alpha_2}], \quad i = \overline{1, n_p}. \quad (2.2)$$

Burada $p_i^{\alpha_1}$ və $p_i^{\alpha_2}$ – uyğun olaraq interval ədədlərin sol və sağ sərhədlərinin qiymətləridir. Əgər (2.1) modelindəki funksiya $f(\cdot)$ məlum olarsa, onda obyektin vəziyyət koordinatlarının dəyişməsi bilavasitə parametrlərin variasiyasından asılı olacaqdır.

Bir çox praktiki idarəetmə sistemlərini layihələndirərkən-sintez edərkən p parametrləri daxil olan vektorunun variasiya etdiyi interval ehtimal edilən nominal qiymətlər kimi qəbul edilir. Bu isə konstruktörün subyektiv qiymətləndirməsidir. Qeyri dəqiq və qeyri müəyyənlikli interval parametrlərin yalnız nominal qiymətləri ilə appoksimasiya olunması əsasən qeyri-səlis çoxluqlar, yəni “Soft Computing” konsepsiyaları əsasında doğrudur.

Qeyri müəyyənlikli dinamik obyektləri bir neçə cür formalı riyazi modellə təsvir etmək olar, məsələn, [1-3, 9, 10]:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) \\ \tilde{y}(t) &= C\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

yaxud

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \tilde{A}x + \tilde{B}u \\ y(t) &= \tilde{C}x \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.3) şəklindəki modeldə A, B və C uyğun ölçülü səlis-adi əmsallar matrisləridir. (2.4) modelində isə $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ uyğun ölçülü qeyri-səlis ədədlər matrisləridir. Bu tip obyektləri interval əmsallı adi differensial tənliklərdə təsvir etməklə, bütövlükdə, idarəetmə sisteminin dayanıqlı hərəkətini təmin edən tənzimləyicinin interval qiymətli parametrlərini [10]-da təklif edilmiş üsulla analitik olaraq sintez etmək mümkündür.

Bir sıra qeyri müəyyənlikli, qeyri xətti dinamik obyektlər, o cümlədən. manipulyatorlar və mobil robotlar, məsələn, bütün istiqamətlərə hərəkət edən (BİHE) robotların hərəkəti aşağıdakı kimi Takagi-Sugeno (T-S) tipli qeyri səlis modellə təsvir oluna bilər:

$$Q_i: \quad \text{Əgər } z_1(t) M_1^i\text{-dir} \text{ s} \text{ə } \mathbf{V} \text{Ə } z_2(t) M_2^i\text{-dir} \text{ s} \text{ə} \dots \mathbf{V} \text{Ə } z_n(t) M_n^i\text{-dir} \text{ s} \text{ə}$$

Onda,

$$\dot{x}=A_i x(t)+B_i u(t) \quad , \quad y(t)=C_i x(t) \quad , \quad i=\overline{1, q} \quad (2.5)$$

Burada M_j^i - obyektin j -cu vəziyyət dəyişməsinin qeyri-səlis term çoxluğu olub, κ_j^i mənsubiyyət funksiyasına malikdir. A_i, B_i və C_i uyğun olaraq, i -ci liqivistik qaydaya uyğun olan ($A - nxn$ - ölçülü, $B nxm$ ölçülü, $C_i - r \times n$ - ölçülü) parametrlər matrisləridir, $i = \overline{1, q}$ -liqivistik qaydaların sira nomrəsidir.

Qeyri müəyyənlikli, qeyri xətti obyektin vəziyyət və çıxış dəyişənləri vektoru, (2.5) modeli, kifayət qədər dəqiqliklə aşağıdakı kimi diferensial tənliklə təsvir oluna bilər:

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^q \mu_i(x) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad , \quad y(t) = \sum_{i=1}^q \mu_i(x) C_i x(t) \quad (2.6)$$

Buradakı $\mu_i(x)$ – funksiyaları [1-3] əsasən aşağıdakı kimi təyin olunurlar

$$\mu_i(x) = \omega_i(x) / \sum_{i=1}^q \omega_i(x) \quad , \quad \omega_i(x) = \prod_{j=1}^q \kappa_j^i \quad , \quad i=\overline{1, q} \quad (2.7)$$

Obyektin (məsələn, BİHE robotun) idarə edilməsinin bir xüsusiyyəti də ondan ibarətdir ki, sistem həm vəziyyət dəyişənlərinin (sürətin), həm də çıxış dəyişənlərinin tapşırığının izlənməsini (xətaya görə astatik olaraq idarə edilməsini) təmin etsin. Bu tələbin ödənilməsi üçün idarəetmənin-tənzimləyicinin strukturunu aşağıdakı kimi formallaşdırılmaq lazımdır:

$$T_i: \quad \text{\textbf{Əgər}} \quad x_1(t) \quad \mathbf{M}_1^i\text{-dirsə} \quad \mathbf{VƏ} \quad x_2(t) \quad \mathbf{M}_2^i\text{-dirsə} \quad \mathbf{VƏ} \quad x_n(t) \quad \mathbf{M}_n^i\text{-dirsə}$$

Onda,

$$u_i=K_i x(t)+G_i e(t), \quad i=\overline{1, q} \quad (2.8)$$

Burada $e(t)$ – obyektin çıxış $y(t)$ – dəyişənləri vektorunun tapşırıq $y_{tap}(t)$ – qiymətlərindən meyletməsi (xətası) olub, aşağıdakı kimi təyin olunurlar:

$$\dot{e}(t) = y_{tap}(t) - y(t) = y_{tap}(t) - \sum_{i=1}^q \mu_i(x) C_i x(t) \quad (2.9)$$

(2.6), (2.8) və (2.9) ifadələrinə əsasən qapalı-əks əlaqəli idarəetmə sisteminin riyazi modelini aşağıdakı kimi yazmaq olar [9]

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^q \mu_i(x) A_i x(t) + \sum_{i=1}^q \mu_i(x) B_i (\sum_{j=1}^q \mu_j(x) (K_j x(t) + G_j e(t))) \quad (2.10)$$

(2.9) nəzərə almaqla və (2.10) ifadəsində bir neçə sadə çevirmələr apararaq qapalı qeyri-səlis idarəetmə sisteminin riyazi modelini aşağıdakı kimi yazmaq olar [9]:

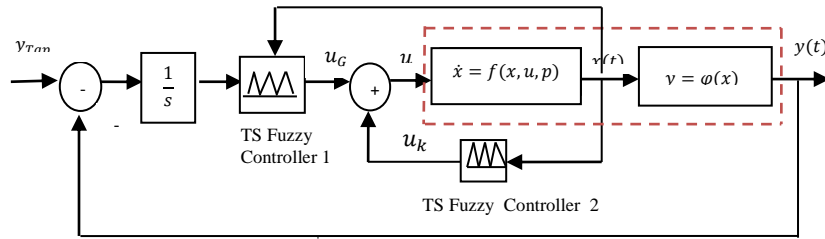
$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \sum_{i=1}^q \mu_i \sum_{j=1}^q \mu_j \tilde{A}_{ij}(p) \tilde{x}(t) + N y_{tap}(t) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^q \mu_i \tilde{C}_i \tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Burada

$$\tilde{A}_{ij}(p) = \begin{bmatrix} A_i(p) + B_i(p)K_j & B_i(p)G_j \\ -C_i & 0 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0 \\ - \\ E \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}_i = [C_i \quad 0], \quad \tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}, \quad i, j = \overline{1, q}$$

$A_i(p) = A_i + \Delta A_i$, $B_i(p) = B_i + \Delta B_i$, $0 \leq \Delta A_i \ll A_{inom}$, $0 \leq \Delta B_i \ll B_{inom}$ (2.12)
 $\tilde{x}(t) - 2n_x$ ölçülü, $y_{tap}(t) - n_y = n_x$ ölçülü vektorlardır, $E - n_x \times n_x$ ölçülü vahid matricdir, $0 - n_x \times n_x$ ölçülü sıfır matrisidir .

(2.5), (2.8), (2.9) ifadələrini nəzərə almaqla T-S tipli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin struktur sxemini şəkil 2.1. kimi təsvir etmək olar.



Şəkil 2.1 Vəziyyətə və xəyata görə astatik qeri-səlis T-S modeli idarəetmə sisteminin ümimiləşdirilmiş struktur sxemi

ΔA_i və ΔB_i – obyektin parametrik qeyri-müəyyənliklərinin nəzərə alınmasını xarakterizə edir. Bu parametrik meyletmələr qiymətcə bir sıra hallarda uyğun nominal qiymətin 0,1-2.0%-nə bərabər götürmək olar.

Sintez məsələsinin qoyuluşu. Qeyri-müəyyənlikli çoxəlaqəli idarə etmə sisteminin (2.6)-(2.9) idarə olunan dəyişənlərə nəzərən astatiklik xüsusiyyətinə malik olması və vəziyyət (aralıq) dəyişənlərinə nəzərən isə dayanıqlıq dərəcəsinə görə roplastlığın ödənilməsi tələbini nəzərə alaraq, tənzimləyicinin sintezi məsələsini aşağıdakı kimi formalizə etmək olar. (2.6) ifadəsi ilə yazıla bilən qeyri-müəyyənliklərə malik obyekt üçün elə roplast T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyici sintez etmək lazımdır ki, çoxəlaqəli və çoxölçülü qapalı idarəetmə sistemi çıxış koordinatları tapşırıq təsirlərini $y_{tap}(t)$ (planlaşdırılmış hərəkət trayektoriyasını) yüksək dəqiqliklə izləsin, başqa sözlə, xəyata görə astatiklik

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad (2.13)$$

və parametrik qeyri-müəyyənliklər (2.12) şəraitində vəziyyət koordinatlarına görə mümkün-maksimal dayanıqlıq dərəcəsinə ödəsin

$$J_1^i = \max_{K, G} (-\text{Re}(\lambda^i(A_i(p), K_i, G_i)) = \delta_i + \max_{K, G} (-\text{Re}(\check{\lambda}^i(A_i, K_i, G_i))), \quad (2.14a)$$

$$J_2^i = \min_{K, G} \|e(A_i, K_i, G_i)\|, \quad (2.14b)$$

$$J_3^i = \max_{K, G} \left\{ m^i = \frac{|(-\text{Re}(\lambda^i(A_i(p), K_i, G_i)))|}{|\text{Im}(\lambda^i(A_i(p), K_i, G_i))|} \right\}, \quad (2.14c)$$

$$K_i \in \mathbf{K}, \quad G_i \in \mathbf{G}, \quad i = \overline{1, q}$$

Burada $\delta_i > 0, \forall i \in \overline{1, q}$ -hər bir linqvistik qaydaya uyğun olan halda sistemin dayanıqlıq dərəcəsinin mümkün-maksimal qiymətini xarakterizə edir.

İdarəetmə sisteminin arxitekturasını ((2.6)-(2.9) strukturunu) nəzərə alaraq, hər bir linqvistik qayda üçün xarakteristik tənliyi tərtib edib,

$$D_i(\lambda) = (s + \lambda_{1i}) \dots (s + \lambda_{ni}) = (s + \delta_i + \check{\lambda}_{1i}) \dots (s + \delta_i + \check{\lambda}_{ni}) = 0, \quad i = \overline{1, q} \quad (2.15)$$

hərəkətin dayanıqlılığının ödənməsi şərtlərindən roplast T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyicinin K_i və G_i , (K^i və G^i) $i = \overline{1, q}$ parametrlərini (səzləmə əmsalları matrislərini) [2, 10]-də verilmiş üsulla analitik olaraq təyin etmək olar.

3. Robast idarəetmənin sintezi məsələsinin həlli. T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyicinin sintezi məsələsinin həlli üsulunu konkret idarəetmə obyektinin bütün istiqamətlərə hərəkət edən (BİHE) mobil robotun [5] təmsalında verək. BİHE mobil robot dörd təkərə malik olub üç vəziyyət dəyişəninə $x(t) = [\dot{x}_w(t), \dot{y}_w(t), \dot{\phi}_w(t)]$ və $u(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)]$ idarəedici təsirlərə malik olub qeyri-xətti modellə yazılır [5]. Bu modelin üzərində bir sıra sadə çevirmələr ($u(t) = \bar{B}\bar{u}(t), \bar{u}(t) = [\bar{u}_1(t) \bar{u}_2(t) \bar{u}_3(t)]$) aparıldıqdan sonra BİHE mobil robotu aşağıdakı kimi qeyri-müəyyənlikli qeyri-xətti modelə yazmaq olar

$$Q_i: \quad \text{Əgər } \dot{\phi}_w(t) M^i\text{-dirsə} \quad \text{Onda, } \dot{x} = A_i x(t) + B_i \bar{u}(t), \quad y(t) = C_i x(t), \quad i = \overline{1, q} \quad (3.1)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 d & 0 \\ a_2 d & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 d & 0 \\ -a_2 d & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, B_i = I, C_i = I$$

Yaxud

$$\begin{aligned} \ddot{x}_w(t) &= a_1 \dot{x}_w(t) + \ddot{\bar{u}}_{11}(t), & y_w(t) &= a_1 \dot{y}_w(t) + \bar{u}_{2i}(t), \\ \ddot{\phi}_w(t) &= a_3 \dot{\phi}_w(t) + \ddot{\bar{u}}_{3i}(t), & i &= 1 \end{aligned} \quad (3.1a)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_w(t) &= a_1 \dot{x}_w(t) - a_2 d \ddot{y}_w + \ddot{\bar{u}}_{11}(t), & y_w(t) &= a_2 d \dot{x}_w(t) + a_1 \dot{y}_w(t) + \bar{u}_{2i}(t), \\ \ddot{\phi}_w(t) &= a_3 \dot{\phi}_w(t) + \ddot{\bar{u}}_{3i}(t), & i &= 2 \end{aligned} \quad (3.1b)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_w(t) &= a_1 \dot{x}_w(t) + a_2 d \ddot{y}_w + \ddot{\bar{u}}_{11}(t), & y_w(t) &= -a_2 d \dot{x}_w(t) + a_1 \dot{y}_w(t) + \bar{u}_{2i}(t), \\ \ddot{\phi}_w(t) &= a_3 \dot{\phi}_w(t) + \ddot{\bar{u}}_{3i}(t), & i &= 3 \end{aligned} \quad (3.1c)$$

Burada I - üç ölçülç vahid matrisdir, a_1, a_2, a_3 - əmsalları BİHE mobil robotun fiziki və həndəsi parametrlərdən asılı olaraq təyin olunurlar [5]:

$$a_1 = -2J/(mr^2 + 2I_w), \quad a_2 = 2I_w/(mr^2 + 2I_w), \quad a_3 = -4cL^2/(4I_w mL^2 + I_v r^2) \quad (3.2)$$

Parametrik qeyri-müəyyənlik əsasən (3.1) modelindəki $a_2 \dot{\phi}_w(t) = a_2 d$ ilə bağlıdır, yəni

$$a_{2i} = a_2 \dot{\phi}_{nom}(t) + \Delta a_2 = a_2 d + \Delta a_2, \quad \Delta a_2 \in [0, \sigma], \quad \sigma = 0.01 a_2 \dot{\phi}_{nom}(t) \quad (3.3)$$

(3.1) obyektinin strukturunu (x_3 -ün digər vəziyyət dəyişənlərindən $-x_1, x_2$ asılı olmadığını) və (2.8) nəzərə alaraq, hər bir liqvisitik qayda üçün idarəetmənin (tənzimləmənin) strukturunu aşağıdakı kimi müəyyənləşdirmək olar:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{1i}(t) &= k_{11i} \dot{x}_1(t) + g_{11i}(y_{1T} - x_1), \quad \bar{u}_{2i}(t) = k_{22i} \dot{x}_2(t) + g_{22i}(y_{1T} - x_2), \\ \bar{u}_{3i}(t) &= k_{33i} \dot{x}_3(t) + g_{33i}(y_{1T} - x_3), \quad i = 1 \\ \bar{u}_{1i}(t) &= k_{11i} \dot{x}_1(t) + k_{12i} \dot{x}_2(t) + g_{11i}(y_{1T} - x_1), \quad \bar{u}_{2i}(t) = k_{21i} \dot{x}_1(t) + k_{22i} \dot{x}_2(t) + g_{22i}(y_{1T} - \\ & \quad x_2), \quad \bar{u}_{3i}(t) = -k_{33i} \dot{x}_3(t) + g_{33i}(y_{1T} - x_3), \quad i = 2 \\ \bar{u}_{1i}(t) &= k_{11i} \dot{x}_1(t) + k_{12i} \dot{x}_2(t) + g_{11i}(y_{1T} - x_1), \quad \bar{u}_{2i}(t) = k_{21i} \dot{x}_1(t) + k_{22i} \dot{x}_2(t) + g_{22i}(y_{1T} - \\ & \quad x_2), \quad \bar{u}_{3i}(t) = k_{33i} \dot{x}_3(t) + g_{33i}(y_{1T} - x_3), \quad i = 3 \\ \bar{u}_{1i}(t) &= k_{11i} \dot{x}_1(t) + k_{12i} \dot{x}_2(t) + g_{11i}(y_{1Tap} - c_{11} x_1) \\ \bar{u}_{2i}(t) &= k_{21i} \dot{x}_1(t) + k_{22i} \dot{x}_2(t) + g_{22i}(y_{1Tap} - c_{22} x_2) \\ \bar{u}_{3i}(t) &= k_{33i} \dot{x}_3(t) + g_{33i}(y_{1Tap} - c_{33} x_3), \quad i = \overline{1, q} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Qeyd olunmuş xüsusiyyətləri və (3.1)-(3.4) nəzərə alaraq, onda hər bir liqvisitik qayda üçün sistemin sərbəst hərəkətini aşağıdakı tənliklərlə yazmaq olar (sadəlik üçün liqvisitik qaydaların nömrəsinin indekslərini $i = \overline{1, q}$ göstərmirik):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= (a_1 - k_{11}) \dot{x}_1 - (a_2 d + \Delta a_2 + k_{12}) \dot{x}_2 + g_{11} x_1 \\ \dot{x}_2(t) &= (a_2 d + \Delta a_2 - k_{21}) \dot{x}_1 + (a_1 - k_{22}) \dot{x}_2 + g_{22} x_2 \\ \dot{x}_3(t) &= -k_{33} \dot{x}_3 + g_{33} x_3 \end{aligned} \quad (3.5a)$$

yaxud

$$\begin{aligned} [s^2 + (k_{11} - a_1) s - g_{11}] X_1(s) &= -[s(a_2 d + \Delta a_2 + k_{12})] X_2(s) \\ [s^2 + (k_{22} - a_1) s - g_{22}] X_2(s) &= -[s(k_{21} - (a_2 d + \Delta a_2))] X_1(s) \\ [s^2 + k_{33} s - g_{33}] X_3(s) &= 0 \end{aligned} \quad (3.5b)$$

$|k_{12}| = |k_{21}|$ və $|g_{11}| = |g_{22}|$, $c_{11} = c_{22} = c_{33} = 1$ qəbul etmək olar. Sistemin (3.5) modelinə əsasən x_3 -koordinatı bilavasitə digər koordinatlardan asılı olmadığı görünür və bu halda sistemin xarakteristik tənliyi bir 4 tərtibli, digəri isə 2 tərtibli tənliklə təsvir olunur:

$$\begin{aligned} s^4 + s^3[k_{11i} + k_{22i} - 2a_1] + s^2[(k_{11i} - a_1)(k_{22i} - a_1) - 2g_{11i} + (a_2 d + \Delta a_{2i})^2 - k_{12i}^2] + \\ + s[2a_1 g_{11i} - (k_{11i} + k_{22i})] + g_{11i}^2 = 0, \\ s^2 + s k_{33i} - g_{33i} = 0, \quad i = \overline{1, q} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Xarakteristik tənliyi (3.6) şəklində yazılan sistemdə köklərin paylanması parametrlərindən asılılıq ifadələrini [1,2] təklif olunmuş analitik sintez üsulu ilə təyin edirik. Məsələn iki variantda, yəni, köklər mənfi həqiqi və kompleks olduğu hallar üçün analitik şəkildə həlli məqsədə uyğundur.

[1, 2]-də olduğu kimi sistemin parametrik xarakteristik tənliklərinin $D(\lambda) = 0$; və törəmələrinin $\dot{D}(\lambda)$, $\ddot{D}(\lambda)$ köklərlə ifadə olunmuş uyğun xarakteristik tənliyin $\Phi(\lambda) = 0$; və onun uyğun törəmələrinin $\dot{\Phi}(\lambda)$, $\ddot{\Phi}(\lambda)$ bərabərliyi şərtlərindən vəziyyət dəyişənlərinə və xəyata görə olan tənzimləyicilərin K^i və G^i parametrlərinin analitik ifadələri təyin olunur. Birinci variantda, yəni xarakteristik tənliyin köklərinin mənfi və bərabər olduğu halda tənzimləyicinin sazlama parametrlərinin dayanıqlıq dərəcəsiindən və obyektin parametrlərindən-əmsallarından asılılıqları aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\begin{aligned} J^i + \delta &= \frac{-k_{11}^i - a_{11}^i}{2}; \quad g_{11}^i = (-k_{11}^i - a_{11}^i)^2/4 \quad i = \overline{1, q} \\ k_{11}^i &= k_{22}^i = -2(J^i + \delta^i) - a_{11}^i \quad g_{22}^i = (-k_{22}^i - a_{11}^i)^2/4 \\ k_{11}^i &= k_{21}^i = 0 \quad g_{33}^i = (-k_{33}^i + a_{33}^i)^2/4 \end{aligned} \quad (3.7)$$

İkinci variantda sistemin xarakteristik tənliyin köklərinin kompleks olduğu hal üçün, yəni

$$\lambda_{r12}^i = -(J_r^i + \delta_r) \pm j(J_r^i + \delta_r) \frac{1}{m_{ri}}, \quad i = \overline{1, q} \quad r=1,2$$

qəbul edib, uyğun çevirmə əməliyyatları həyata keçirdikdən sonra aşağıdakı analitik ifadələri alırıq:

$$\begin{aligned} k_{11}^i &= -2(J_r^i + \delta_r^i) - a_{11}^i \quad r=1 \quad g_{11}^i = (-k_{11}^i + a_{11}^i)^2 (1 + \frac{1}{m_{r1}^2})/4 \\ k_{22}^i &= -2(J_r^i + \delta_r^i) - a_{11}^i \quad r=2 \quad g_{22}^i = (-k_{22}^i + a_{11}^i)^2 (1 + \frac{1}{m_{r2}^2})/4 \\ k_{33}^i &= -2(J_r^i + \delta_r^i) - a_{11}^i \quad r=3 \quad g_{33}^i = (-k_{33}^i + a_{11}^i)^2 (1 + \frac{1}{m_{r3}^2})/4 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Vəziyyət (faza) dəyişənlərinə görə tənzimləyicilərin parametrlərinin, yəni, K^i və G^i matrislərinin təyində (3.7) yaxud (3.8) ifadələrindən istifadə olunması bilavasitə dayanıqlıq dərəcələrinə qoyulan tələblərdən və obyektin uyğun lingvistik qaydalardakı riyazi modellərindən asılı olaraq müəyyənləşdirilir.

4. Eksperimental realizasiya. Qeyri-xəttiliyə və qeyri müəyyənliyə malik obyekt üçün robast idarəetmənin sintezi üsulunun səmərəliliyini eksperimental olaraq göstərmək (nümayişi) üçün konkret bir misala baxaq.

Tutaq ki, idarəetmə obyektinin-BİHE mobil robotun fiziki və həndəsi parametrləri aşağıdakı qiymətlərə malikdir: $m = 16.9 \text{ kg}, L = 0.193m, r = 0.04m,$

$$I_v = 0.2518 \text{ kgm}^2, \quad I_w = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2, \quad J = 8.1633 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2/s \quad (4.1)$$

Verilmiş bu qiymətlərə görə (3.1) obyektinin-BİHE mobil robotun parametrlərini (3.2) düsturu əsasında qiymətləri aşağıdakı kimi təyin edilmişdir:

$$a_1 = -0.0599, \quad a_2 = 0.0081, \quad a_3 = -0.2901, \quad \Delta a_2 \in [0, \sigma], \quad \sigma \cong 0.01 a_2 \dot{\phi}_{nom}(t) = 0.00012.$$

Təklif edilmiş üsul əsasında sintez edilmiş idarəetmə sisteminin məxsusi ədədini (tezliyini) $\omega \cong 15 \text{ rad/san}$ və $m = 0.5$ qəbul etsək, onda T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyicinin parametrləri 1-ci linqvictik qayda üçün

$$\begin{aligned} k_{11}^1 &= -21.9, \quad k_{22}^1 = k_{11}^1 = -21.9, \quad k_{33}^1 = -20.1, \quad k_{12}^1 = k_{21}^1 = 0, \quad J^1 + \delta^1 \cong 11, \\ g_{22}^1 &= g_{11}^1 = 239, \quad g_{33}^1 = 201, \end{aligned}$$

ikinci linqvictik qayda üçün

$$\begin{aligned} k_{11}^2 &= -21.9, \quad k_{22}^2 = k_{11}^2 = -27.9, \quad k_{33}^2 = -28.6, \quad k_{21}^2 = -k_{12}^2 = -20.6, \\ g_{22}^2 &= g_{11}^2 = g_{33}^2 = 196, \end{aligned} \quad (4.2)$$

üçüncü linqvictik qayda üçün K və G matrisləri əsasən ikinci linqvictik qaydadakı ilə eynidir və yalnız $k_{21}^3 = 20.6$.

Beləliklə (2.8)-dəki kimi riyazi modellə yazılan, yəni,

$$T_i: \quad \text{Əgər } x_1(t) = \dot{\phi}_w(t) \quad M_1^i \text{-dirsə } \text{Onda, } u^i = K^i x(t) + G^i e(t), \quad i = \overline{1, q} \quad (4.3)$$

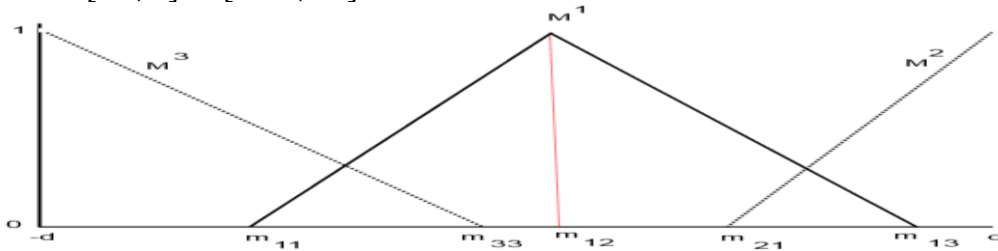
vəziyyətə və xəyata görə qeyri-səlis T-S tənzimləyicilərin sazlama parametrləri matrisləri üçün aşağıdakı qiymətləri təyin edilmişdir:

$$K^1 = \begin{bmatrix} -21.9 & 0 & 0 \\ 0 & -21.9 & 0 \\ 0 & 0 & -20.1 \end{bmatrix}, K^2 = \begin{bmatrix} -27.9 & 20.6 & 0 \\ -20.6 & -27.9 & 0 \\ 0 & 0 & -28.6 \end{bmatrix},$$

$$K^3 = \begin{bmatrix} -27.9 & -20.6 & 0 \\ 20.6 & -27.9 & 0 \\ 0 & 0 & -28.6 \end{bmatrix},$$

$$G^1 = \begin{bmatrix} 239 & 0 & 0 \\ 0 & 239 & 0 \\ 0 & 0 & 201 \end{bmatrix}, G^2 = G^3 = \begin{bmatrix} 196 & 0 & 0 \\ 0 & 196 & 0 \\ 0 & 0 & 196 \end{bmatrix}, \quad (4.2b)$$

M_1^i – qeyri-səlis term çoxluqlar olub, mənsubiyyət funksiyaları şəkil 4.1-dəki kimidir. Burada $\phi_w(t)$ üçün universium $[-d, d] = [-1.5, 1.5]$ -dir.



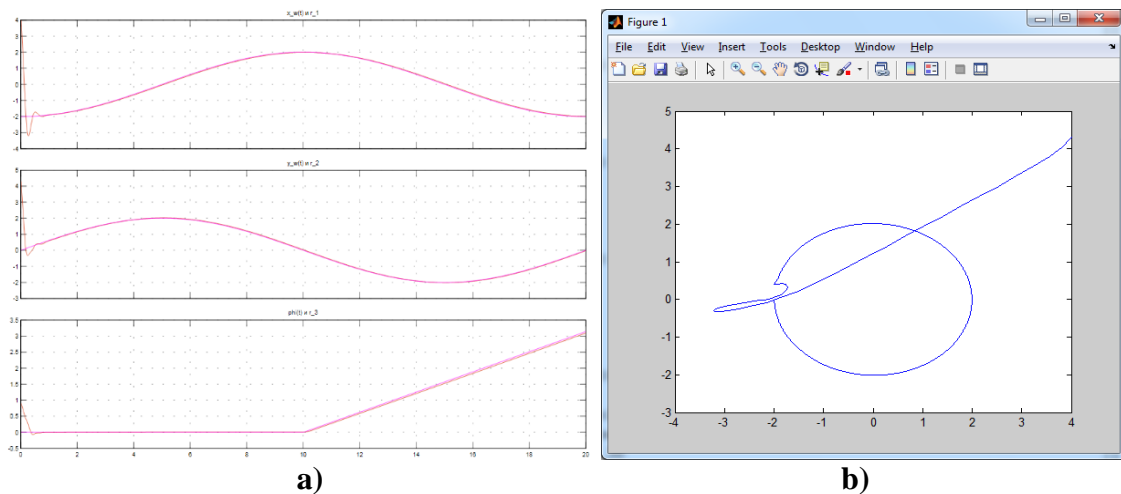
Şəkil 4.1 Qeyri-səlis term çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları

Qeyd edək ki, yuxarıda sintez etdiyimiz T-S tipli qeyri-səlis idarəetmə sisteminin qlobal olaraq dayanıqlı olması üçün aşağıdakı XMB-ni

$$A_{ij}P + PA_{ij}^T < 0, \quad A_{ij} = \begin{bmatrix} A_i + B_i K^j & B_i G_i^j \\ -C_i & 0 \end{bmatrix}, \quad C_1 = C_2 = C_3 = I$$

ödəyən müsbət təyin olunmuş P matrisi olmalıdır.

Sintez edilmiş idarəetmə sisteminin modelləşdirməsinin nəticələri - keçid prosesləri və faz trayektoriyası şəkil 4.2a və b-də verilmişdir. BİHE mobil robotun MATLAB mühitində (Fuzzy Logic Toolbox və Simulink paketləri əsasında) kompüter modelləşdirməsində tapşırıq təsirləri $x_1 = -2 \cos \alpha t$, $x_2 = 2 \sin \alpha t$, $x_3 = \exp(-10 - t) + 0.3t$; başlanğıc vəziyyət kimi $(x_1(0), x_2(0), x_3(0)) = (3, 3, 1)$ götürülmüşdür. Şəkil 4.2-dən görüldüyü kimi, BİHE mobil robotun idarə olunması dayanıqlı olmaqla yanaşı həm də yüksək keyfiyyət göstəriciləri təmin edir, məsələn, tənzimləmə müddəti 0.3 saniyəni aşmır.



Şəkil 4.2 BİHE mobil robotun idarə olunmasının keçid prosesləri və faz trayektoriyası

5. Nəticə. Təklif edilmiş T-S tipli qeyri-səlis tənzimləyicinin parametrik sintezinin analitik üsulu qeyri xətti obyektlərin, məsələn, BİHE mobil robotun, vəziyyət koordinatlarına və çıxış dəyişənlərinə nəzərən dayanıqlığa görə robastlığı, idarəetmə prosesində yüksək dinamik dəqiqliyi və cəldl işləməni təmin edir.

Ədəbiyyat

1. Нусратов О.К., Джафаров П.С., Зейналов Э.Р., Мустафаева А.М., Джафаров С.М. Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой T-S моделью для управления нелинейным динамическим объектом-манипулятора робота с гибким соединением. Жур. Мехатроника, Автоматизация и управления-Москва, 2011, №8, с.54-61
2. Jafarov P.S., Zeynalov E.R., Jafarov S.M., Mustafayeva A.M. The Analytical Method of Synthesis of a Controller with a Fuzzy T-S model for Control of a Flexible Joint Robot Arm. Prosigingns Sixth International Conference on Soft Computing with Words and Perceptions in Sistem Analysis, Decision and Control, Turkey, Antliya, 1-2 September, 2011. P.107-113
3. Zhong Li. Fuzzy Chaotic Sistsms. Springer , 2006, 299 p.
4. Chung-Hsun Suu, Yien-Tien Wang, Cheng-Chung Chang. Switching T-S Fuzzy model-based guaranteed Cost control for two-wheeled Mobile robots. International Journal of innovative Computing, information and Control. Vol.8, №5 (A), May 2012 pp.3015-3028
5. Chong-Cheng Shing, Yee-Chang Lin, and Pau-Lo Hsu The T-S Fuzzy Design and Implementation for Nonlinear Motion Systems with Control Redundancy. Proseedings of the 17th Word Congress the International Federation of Automatc Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp. 6867-6872
6. Цюй Дуньюэ разработка нечеткой модели для управления колесными мобильными роботами/ X научная конференция МГТУ «станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ» «Станкин» -ИММ РАН: Сборник докладов, 2007, с. 247-249
7. Hsiao M.Y., Wang C.T. A finite –time convergent interval type-2 fuzzy sliding-mode controller design for omindirectional mobile robots. International Conference on Advanced Robotics and Intelligent systems (ARIS). 2013
8. Мартыненко Ю.Г.Управления движением мобильных колесных роботов. Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том11,№8,с.29-80.
9. Сиек Ю.Л.,Сакович С.Ю. Робастный подход к синтезу нечетких законов управления движением подводного робота. X11 Всероссийское совещание по проблемам управления.Просидинги ВСПУ-2014,Москва 16-19 июня , 2014, стр.3844-3852.
10. Zeynalov E. R., Jafarov P. S., Jafarov S. M. Synthesis of Fuzzy Controllers for Astatic Objects, Described by Differential Equations with Fuzzy Coefficients. Proceedings Fourth Intern. Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System. Antalya, Turkey, August 27-28, 2007, p. 316-324.

P.S. Jafarov, E.R. Zeynalov, A.M. Mustafayeva, S.M. Jafarov

Analytical synthesis of the robust regulator with fuzzy T-S model for object control – OD mobile robot with irregular movement

A technique of analytical synthesis of a fuzzy controller with T-S model providing the robust stability for nonlinear control system for an object with parametric uncertainty is proposed. The efficiency of the proposed methodology of analytical synthesis of a fuzzy controller on the example of the development of an OD mobile robot management system is shown.

Keywords: fuzzy controller with T-S model, robustness, degree of stability, object with irregular movement, parametric uncertainty

УДК 6250/519.7:816

П.С. Джафаров, Е.Р. Зейналов, А.М. Мустафаева, С.М. Джафаров

**Аналитический синтез робастного нечеткого регулятора с T-S моделью для управления объектом -
мобильным роботом ДПВН с нерегулярным движением**

Предложена методика аналитического синтеза нечеткого регулятора с T-S моделью, обеспечивающая робастность по устойчивости в системе управления нелинейным объектом с параметрической неопределенностью. Показана эффективность предложенной методики аналитического синтеза нечеткого регулятора на примере разработки системы управления мобильным роботом ДПВН.

Ключевые слова: нечеткий регулятор с T-S (Tagaki-Sugeno) моделью, робастность, степень устойчивости, объект с нерегулярным движением, параметрическая неопределенность

AMEA-nın İdarəetmə Sistemləri İnstitutu

Təqdim olunub 04.04.2016