

## Сравнително изследване на робастни системи за управление на манипулатор с еластично звено

Георги Георгиев

*Comparative study of robust control systems for a flexible-link manipulator: A comparative analysis of robust control systems for tip-position control problem of a single-link flexible manipulator moving in the horizontal plane is presented. Two types systems, using piezo-actuator with  $\mu$ -controllers, synthesized with and without consideration of the uncertainty of the payload mass are compared. Also management systems with a single-link flexible manipulator with and without piezo-actuator are compared.*

**Key Words:** Flexible-Link Manipulator, Piezoelectric Actuator, Robust Control,  $\mu$ -controller.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Манипулаторите с олекотена конструкция притежават редица предимства пред традиционните масивни манипулатори. При извършване на бързи движения обаче повишената гъвкавост на звената е причина за поява на нежелани механични трептения. Това налага при синтеза на системата за управление да се отчита влиянието на еластичността. Динамичните модели на манипулаторите с еластично звено се характеризират с наличие на слабо демпферирани собствени честоти, неминимално-фазовост и неопределеност в параметрите. Тези особености на моделите съществено затрудняват потискането на механичните трептения при бързи движения на манипулаторите. За по-добро потискане на механичните трептения на еластичното звено може да се използва пиезо-актуатор, закрепен върху звеното [1, 3, 6, 7, 9].

Поради силното влияние на неопределеността в параметрите на модела върху устойчивостта и качеството на затворената система, за синтеза на регулатори на манипулатори с еластично звено е подходящо да се използва  $\mu$ -синтез [2, 3] при параметрична неопределеност на модела на манипулатора [1] с помощта на MATLAB функцията `dksyn` от Robust Control Toolbox [5]. При синтез на  $\mu$ -регулатор на манипулатор с еластично звено е желателно в модела на манипулатора да се отчита както неопределеността в коефициента на триене в задвижването и относителните коефициенти на демпфиране на еластичното звено, така и неопределеността в масата на товара. Тази неопределеност е подходящо да се отчита чрез въвеждане на входна мултипликативна неопределеност, както при използване [3], така и без използване на пиезо-актуатор [2].

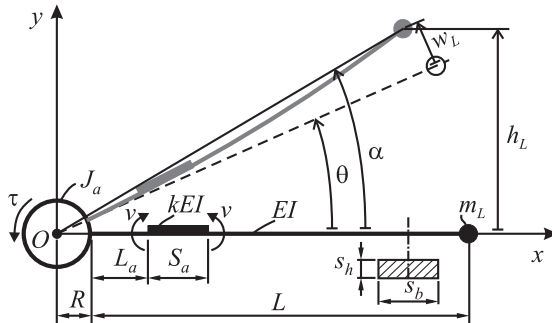
В зависимост от използваните сензори методите за управление на манипулатори с еластично звено се разделят на две групи: съсредоточено управление и разсредоточено управление [2].

Интерес представлява сравнението на качеството на затворените системи за управление на позиционирането на манипулатор с еластично звено при използване на различни  $\mu$ -регулатори, а също и сравняване със системи за управление при използване на конвенционални регулатори. В [4, 8] е представено сравнение на система за управление с  $\mu$ -регулатор от съсредоточен тип с две степени на свобода със система, използваща ПД регулатор също с две степени на свобода.

В настоящата статия е представено сравнение на системи за управление на позиционирането на движещ се в хоризонтална равнина манипулатор с еластично звено. Сравнени са системи, използващи пиезо-актуатор с  $\mu$ -регулатори от разсредоточен тип с две степени на свобода, синтезирани със и без отчитане на неопределеността в масата на товара. Освен това са сравнени и системи за управление на манипулатор с еластично звено с  $\mu$ -регулатори от разсредоточен тип с две степени на свобода със и без използване на пиезо-актуатор.

ОПИСАНИЕ НА МАНИПУЛАТОРА

На фиг. 1 схематично е представен манипулатор с еластично звено и пиезо-актуатор, който се завърта в хоризонталната равнина  $xOy$  около ос в точката  $O$ .



Фиг. 1. Схема на манипулатор с еластично звено и пиезо-актуатор

Въртящият момент и масовият инерционен момент на задвижващото устройство, приведени към оста  $O$ , са съответно  $\tau$  и  $J_a$ . Манипулаторът се разглежда като механична система, съставена от идеално твърдо тяло с радиус  $R$  и еластично звено. Еластичното звено представлява тънък праволинеен хомогенен прът с постоянно правоъгълно напречно сечение, имащо размери  $s_b$  и  $s_h$  ( $s_h$  е в равнината на движение), дължина  $L$ , плътност  $\rho$ , модул на еластичност на материала  $E$ , инерционен момент на напречното сечение  $I = s_b s_h^3 / 12$  и коравина на огъване  $EI$ . Позицията на пиезо-актуатора върху еластичното звено и неговата дължина са съответно  $L_a$  и  $S_a$ . Коравината на огъване на еластичното звено на участъка, където е поставен пиезо-актуаторът, е  $kEI$ ,  $k > 1$ . Под въздействие на подадено към пиезо-актуатора управляващо напрежение той се деформира и поражда двойка огъващи моменти  $v$ , пропорционални на напрежението и противопоставящи се на деформациите на звеното. Полезният товар, хващачът и модулът за локалните движения се моделират като материална точка с маса  $m_L$ . Положението на оста на недеформираното звено на манипулатора в координатната система  $xOy$  се определя от ставния ъгъл  $\theta$ . Приема се, че еластичните отклонения на отделните точки от звеното са перпендикулярни на тази ос, лежат в хоризонталната равнина и са малки в сравнение с  $L$ . Еластичното отклонение на товара (свободния край на манипулатора) е означено с  $w_L$ , а положението на товара се определя от ъгъла  $\alpha$ .

Числените стойности на параметрите на манипулатора са:  $R = 0.04$  m,  $L = 1$  m,  $s_b = 0.05$  m,  $s_h = 0.0032$  m,  $\rho = 2700$  kg/m<sup>3</sup>,  $E = 6.9 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,  $I = 1.37 \times 10^{-10}$  m<sup>4</sup>,  $J_a = 0.1$  kgm<sup>2</sup>,  $L_a = 0.005 \times L$ ,  $S_a = 0.05$  m и  $k = 1.05$ .

Уравненията, описващи динамиката на манипулатора, са получени с използване на метода на крайните елементи [1]:

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = b_{a_i} \tau + b_{s_i} v, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

където  $q_i$  са модални координати,  $\xi_i$  – относителни коефициенти на демпфиране на еластичното звено, а  $\omega_i$  са собствените честоти на манипулатора. Величините  $\theta$ ,  $\alpha$  и  $w_L$  се определят чрез зависимостите:

$$\theta = b_a^T q, \quad h_L = a^T q, \quad \alpha = \arctg \frac{h_L}{R+L}, \quad w_L = (R+L) \text{tg}(\alpha - \theta). \quad (2)$$

В (1) и (2)  $b_a$ ,  $b_s$  и  $a$  са вектори от коефициенти. Собствените честоти  $\omega_i$  на манипулатора и векторите  $b_a$ ,  $b_s$  и  $a$  се определят чрез програмата ABAQUS™.

Входни величини за модела на манипулатора са двигателният момент  $\tau$ , създаван от електрозадвижването, и двойката огъващи моменти  $v$ , създавани от пиезо-актуатора. Управляема величина е ъгловото положение  $\alpha$  на свободния край на манипулатора. В изходните величини на модела са включени и ставният ъгъл  $\theta$ , ускорението  $\ddot{\alpha}$  и еластичното отклонение  $w_L$  на свободния край.

Първите три собствени честоти на манипулатора, изчислени за номиналната стойност на масата на товара  $m_L = 0.24 \text{ kg}$ , са  $\omega_1 = 0 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_2 = 19.8 \text{ rad/s}$  и  $\omega_3 = 81.9 \text{ rad/s}$ . Понеже четвъртата ( $\omega_4 = 242.8 \text{ rad/s}$ ) и останалите собствени честоти имат стойности, много по-високи от честотната лента на затворената система, в модела са включени само първите три модални координати на манипулатора.

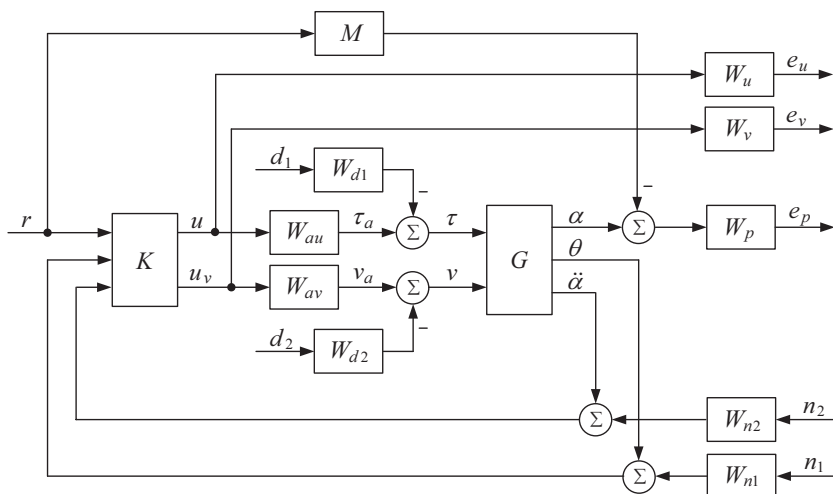
За отчитане на триенето в електрозадвижването в първото от уравненията (1) е въведено събираемото  $d_r \dot{q}_1$ , където  $d_r$  е коефициент на триене, при което поради  $\omega_1 = 0 \text{ rad/s}$  и  $b_{s1} = 0$  уравнението се преобразува във вида

$$\ddot{q}_1 + d_r \dot{q}_1 = b_{a1} \tau. \quad (3)$$

Разглежда се задачата за позициониране на свободния край на манипулатора в желано положение. Предполага се, че при извършване на дадено движение масата на товара има постоянна, но неизвестна стойност в интервала от  $0.12 \text{ kg}$  до  $0.36 \text{ kg}$ , т.е. масата на товара е неопределен параметър с номинална стойност  $m_L = 0.24 \text{ kg}$  и максимална относителна неопределеност 50 %. Приема се също, че коефициентът на триене в задвижването е неопределен параметър с номинална стойност  $d_r = 0.15 \text{ s}^{-1}$  и относителна неопределеност 20 %, а коефициентите на демпфериране на еластичното звено са неопределени параметри с номинални стойности  $\xi_2 = \xi_3 = 0.04$  и относителна неопределеност 40 %. Трябва да се отбележи, че тези параметри са основният източник на неопределеност при описание на движението на манипулатори с еластично звено.

### БЛОКОВА СХЕМА НА СИСТЕМАТА ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Блокова схема на системата за управление, включваща блоковете  $M$ ,  $W_p$ ,  $W_u$ ,  $W_v$ ,  $W_{d1}$ ,  $W_{d2}$ ,  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$ , с чиято помощ се формулират изискванията към качеството при  $\mu$ -синтеза, е показана на фиг. 2. Управляема величина е ъгловото положение  $\alpha$ . Измерват се ставният ъгъл  $\theta$  и ускорението  $\ddot{\alpha}$ . Задаващата величина, управляващите величини и моментите, създавани от двигателя и пиезо-актуатора, са означени съответно с  $r$ ,  $u$ ,  $u_v$ ,  $\tau_a$  и  $v_a$ . Сигналите  $d_1$  и  $d_2$  се използват за формиране на съпротивителни моменти, служещи за входни смущаващи въздействия. Сигналите  $n_1$  и  $n_2$  се използват за формиране на измервателните шумове, а  $e_p$ ,  $e_u$  и  $e_v$  са изходни величини, характеризиращи качеството. С  $G$  е означен моделът с неопределени параметри на еластичния манипулатор, с  $W_{au}$  и  $W_{av}$  – моделите съответно на токовия контур на електрозадвижването и на блока за управление на пиезо-актуатора. Регулаторът  $K$  е с две степени на свобода, с което се постига по-добро качество на системата за управление. Той има три входа, на които постъпват задаващата величина и двете измервани величини, и два изхода, чрез които се осъществява управление на електрозадвижването и пиезо-актуатора.



Фиг. 2. Блокова схема на затворената система с изисквания към качеството

Блокът  $M$  е еталонният модел, към който трябва да се доближава затворената система с вход  $r$  и изход  $\alpha$ . Тегловните предавателни функции  $W_p$ ,  $W_u$  и  $W_v$  се използват за отразяване на относителното значение на различните честотни диапазони, за които се изисква качеството. Входните смущаващи въздействия се получават при преминаване на сигналите с единична норма  $d_1$  и  $d_2$  през формиращите филтри съответно  $W_{d1}$  и  $W_{d2}$ . Измервателните шумове се получават при преминаване на сигналите с единична норма  $n_1$  и  $n_2$  през формиращите филтри съответно  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$ .

Критерият за качество на затворената система за управление е

$$\|\Phi(s)\|_{\infty} < 1, \quad (4)$$

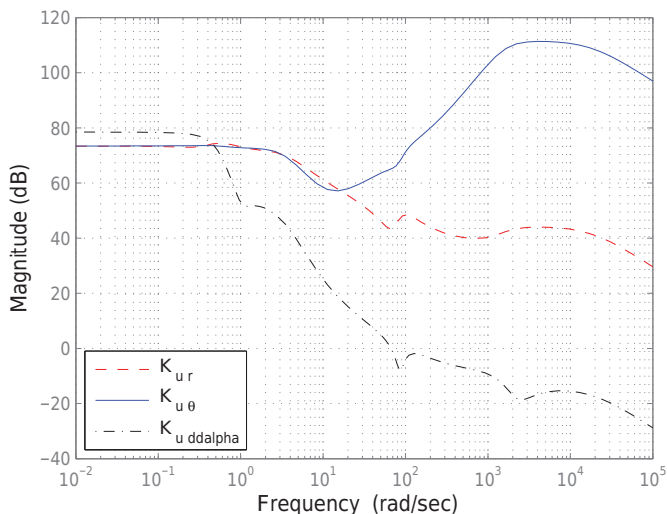
където  $\Phi(s)$  е предавателната матрица на системата с входове  $r$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $n_1$  и  $n_2$  и изходи  $e_p$ ,  $e_u$  и  $e_v$ .

При синтеза се определя линеен регулатор  $K$ , който стабилизира затворената система и осигурява изпълнение на критерия за качество (4) за всички допустими стойности на неопределените параметри в модела на манипулатора.

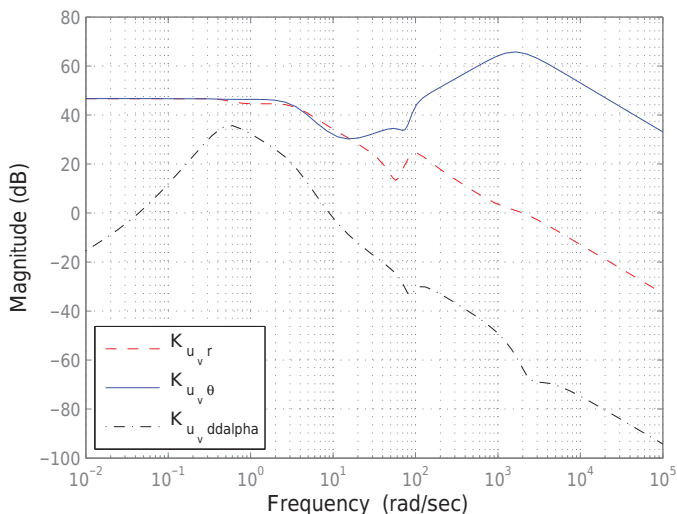
Синтезът на  $\mu$ -регулатор с отчитане на неопределеността в масата на товара  $m_L$ , означен за удобство  $K_{m\mu 1}$ , моделът  $M$  и тегловните предавателни функции  $W_p$ ,  $W_u$ ,  $W_v$ ,  $W_{d1}$ ,  $W_{d2}$ ,  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$  са представени в [3].  $\mu$ -регулаторът, синтезиран без отчитане на неопределеността в масата на товара, е означен  $\bar{K}_{m\mu 1}$ . За регулаторите  $K_{m\mu 1}$  и  $\bar{K}_{m\mu 1}$  са определени балансирани реализации в пространството на състоянията, с които се извършват изследванията на системата.

### ЧЕСТОТНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РЕГУЛАТОРА $K_{m\mu 1}$ И ЧУВСТВИТЕЛНОСТИ НА ЗАТВОРЕНАТА СИСТЕМА

Логаритмичните амплитудно-честотни характеристики на регулатора  $K_{m\mu 1}$  с изходни величини  $u$  и  $u_v$  са показани съответно на фигури 3 и 4. Те коригират честотните характеристики на затворената система при промяна на параметрите на еластичния манипулатор.

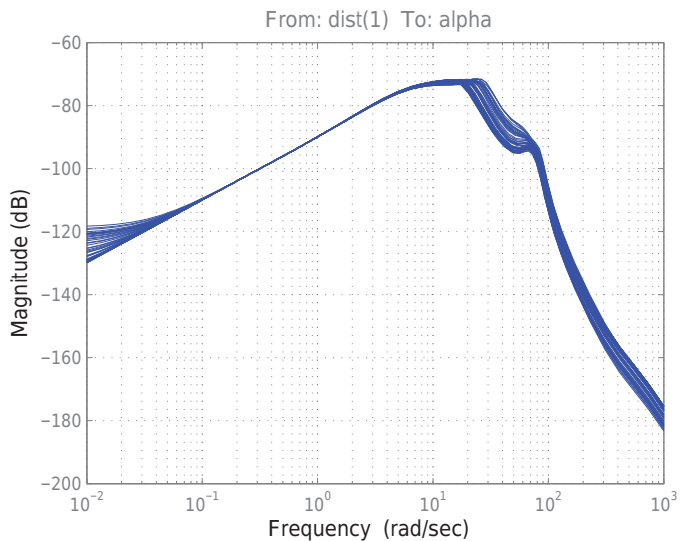


Фиг. 3. Амплитудно-честотни характеристики на  $K_{\mu 1}$  с изход  $u$

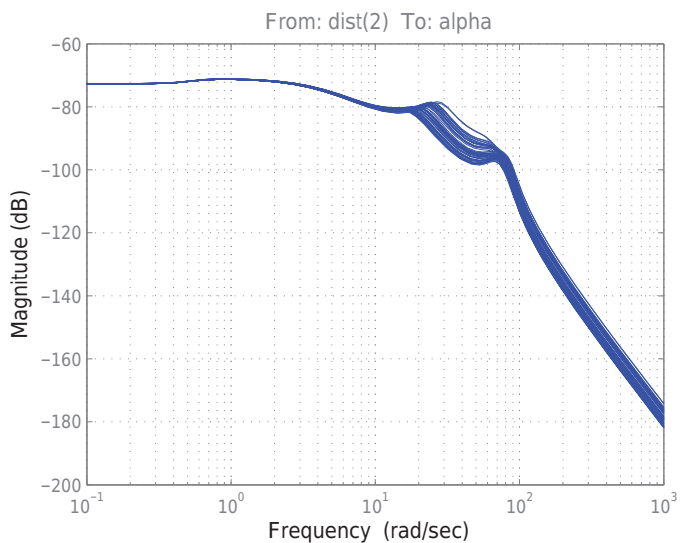


Фиг. 4. Амплитудно-честотни характеристики на  $K_{\mu 1}$  с изход  $u_v$

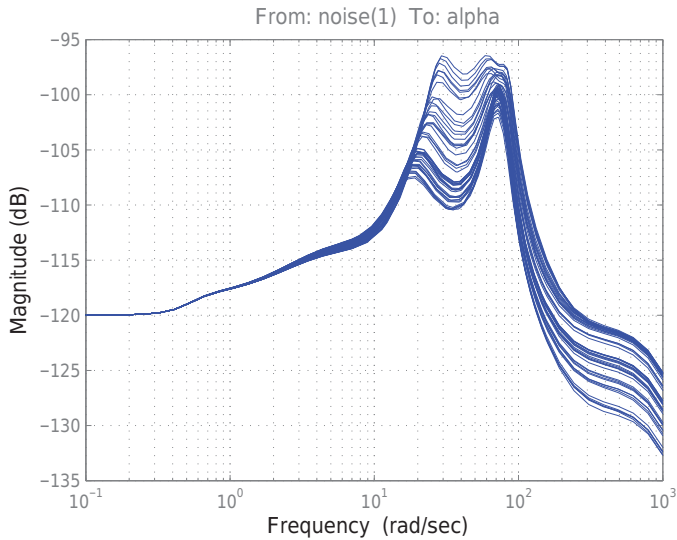
Логаритмичните амплитудно-честотни характеристики на затворената система с  $K_{\mu 1}$ , за 50 случайни комбинации от стойности на неопределените параметри, по отношение на смущенията  $d_1$  и  $d_2$  и шумовете  $n_1$  и  $n_2$  са показани съответно на фигури 5, 6, 7 и 8. Входни величини на системата са съответно  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $n_1$  и  $n_2$ , а



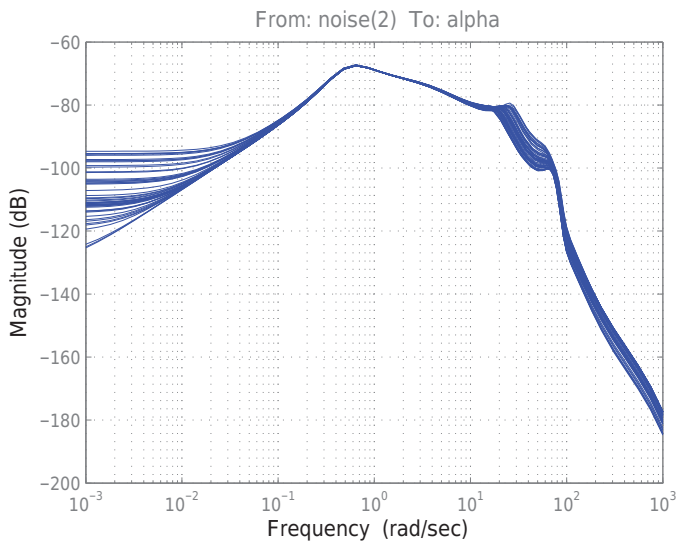
Фиг. 5. Чувствителност на затворената система с  $K_{mul}$  към смущаващото въздействие  $d_1$



Фиг. 6. Чувствителност на затворената система с  $K_{mul}$  към смущаващото въздействие  $d_2$



Фиг. 7. Чувствителност на затворената система с  $K_{mul}$  към шума  $n_1$



Фиг. 8. Чувствителност на затворената система с  $K_{mul}$  към шума  $n_2$

изходна – ъгловото положение  $\alpha$  на свободния край на манипулатора. От фигурите се вижда, че характеристиките имат максимуми около втората и третата собствени честоти на манипулатора. От фиг. 5 следва, че регулаторът  $K_{mul}$  много добре потиска основното за системата нисочестотно смущаващо въздействие  $d_1$ . От

фиг. 7 следва, че чувствителността към измервателния шум  $n_i$  се променя съществено в интервала между собствените честоти на манипулатора.

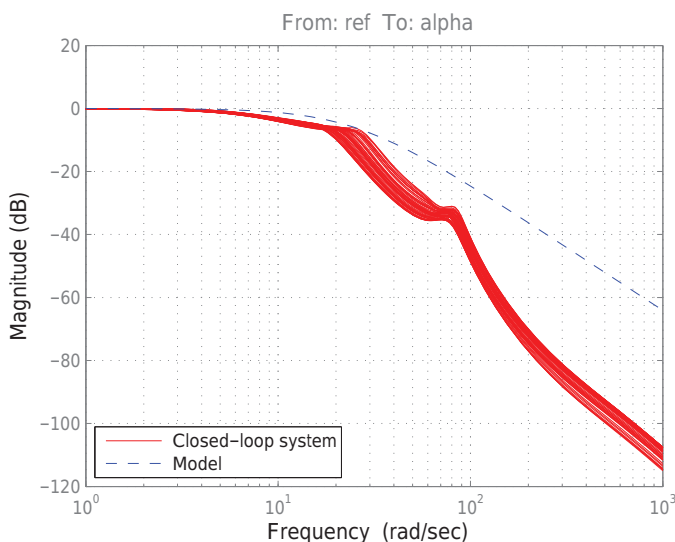
**СРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИТЕ С  $K_{mu1}$  И  $\bar{K}_{mu1}$**

В табл. 1 са представени максималните стойности на  $\mu$ , определящи робастната устойчивост и робастното качество на системите за управление с регулаторите  $K_{mu1}$  и  $\bar{K}_{mu1}$ . Вижда се, че робастната устойчивост и робастното качество са по-добри при използване на регулатора  $K_{mu1}$ , синтезиран с отчитане на неопределеността в масата на товара.

Табл. 1. Робастна устойчивост и робастно качество на системите за управление с регулаторите  $K_{mu1}$  и  $\bar{K}_{mu1}$

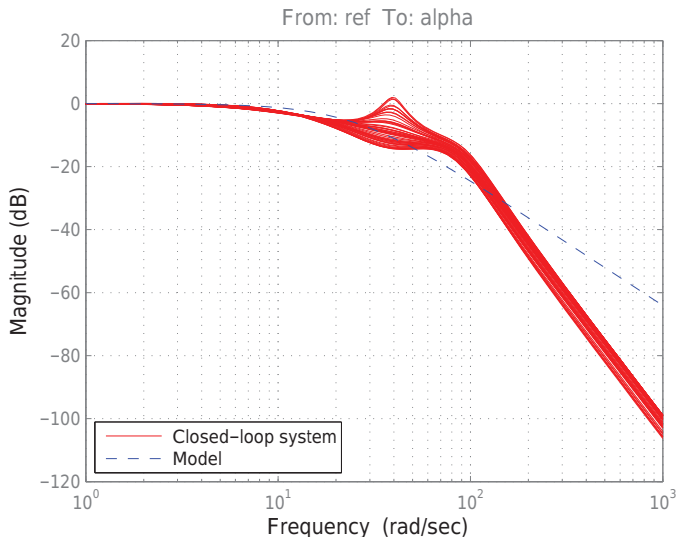
Регулатор	Робастна устойчивост	Робастно качество
	$\mu_{max}$	$\mu_{max}$
$K_{mu1}$	0.617	1.07
$\bar{K}_{mu1}$	0.828	1.19

Логаритмичните амплитудно-честотни характеристики на затворените системи с  $K_{mu1}$  и  $\bar{K}_{mu1}$  за 50 случайни комбинации от стойности на неопределените параметри са показани съответно на фигури 9 и 10. Използва се модел с параметрична неопределеност на манипулатора с еластично звено и пиезо-актуатор [1], в който като неопределени параметри се разглеждат масата на товара  $m_L$ , коефициентът на триене в задвижването  $d_r$  и относителните коефициенти на демпфиране  $\xi_i, i = 2,3$  на еластичното звено. Входна величина на системата е



Фиг. 9. Амплитудно-честотни характеристики на затворената система с  $K_{mu1}$





Фиг. 10. Амплитудно-честотни характеристики на затворената система с  $\bar{K}_{mul}$

задаващото въздействие  $r$ , а изходна – ъгловото положение  $\alpha$  на свободния край на манипулатора. С прекъснатата линия е дадена честотната характеристика на еталонния модел  $M$  с честотна лента 16 rad/s. Вижда се, че двата регулатора успяват да потиснат резонансните пикове в честотната лента на системата и осигуряват близки до модела честотни характеристики на системата в достатъчно широк честотен интервал. Амплитудно-честотните характеристики на затворената система с регулатора  $\bar{K}_{mul}$  имат пик при честота около 40 rad/s и са по-лоши от характеристиките на системата с регулатора  $K_{mul}$ .

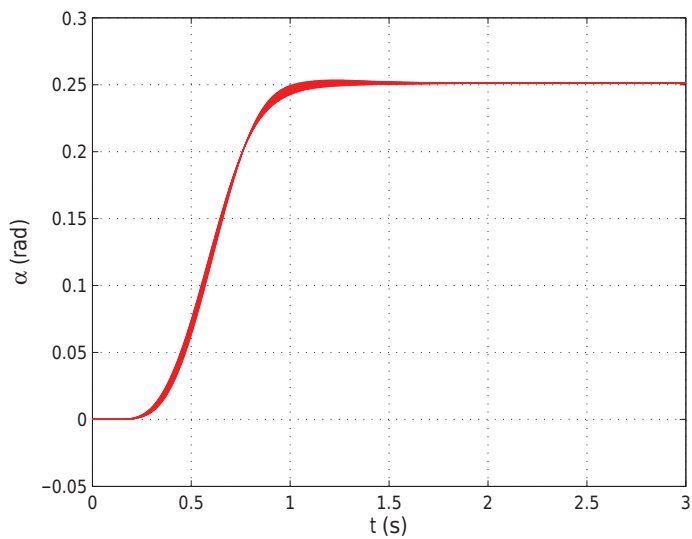
Системите за управление със синтезираните  $\mu$ -регулатори са изследвани с помощта на Simulink<sup>TM</sup>. Симулирането е проведено за 21 стойности на масата на товара  $m_L$ , равномерно разпределени в интервала от 0.12 kg до 0.36 kg. Стойностите на неопределените коефициенти на триене в задвижването и относителни коефициенти на демпфериране на еластичното звено са взети равни на долните им граници, отговарящи на възможно най-слабото демпфериране на механичната система. Използвано е бързоизменящо се задаващо въздействие, което се установява в желаното крайно положение  $\pi/12.5$  rad за 0.8 s. То се формира по зависимостта

$$r = \begin{cases} a_r t - (a_r / \omega_r) \sin(\omega_r t) + r_0, & 0 \leq t \leq t_m \\ r(t_m), & t_m < t \leq t_f \end{cases}, \quad (5)$$

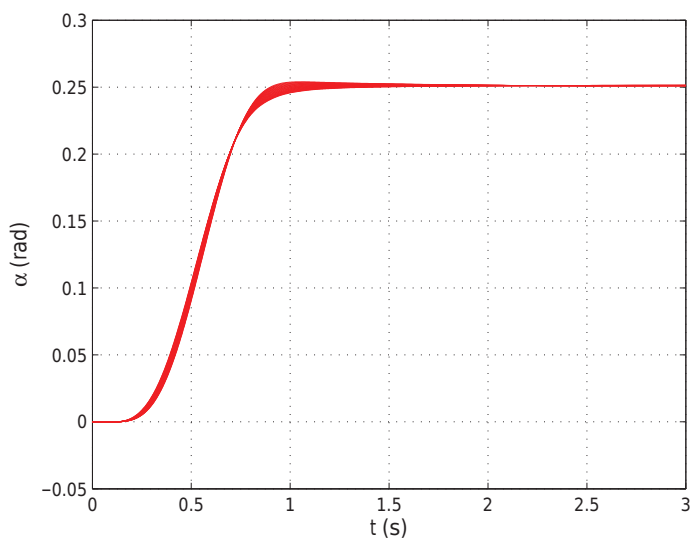
където параметрите са  $a_r = 0.1\pi$  rad/s,  $\omega_r = 2.5\pi$  s<sup>-1</sup>,  $r_0 = 0$  rad,  $t_m = 0.8$  s и  $t_f = 3$  s.

Преходните процеси на затворените системи за 21 стойности на масата на товара, равномерно разпределени в интервала от 0.12 kg до 0.36 kg, на ъгловото положение  $\alpha$  с регулаторите  $K_{mul}$  и  $\bar{K}_{mul}$  са представени чрез двумерни графики съответно на фигури 11 и 12. Вижда се, че реализациите на процесите при различните стойности на  $m_L$  в интервала от 0.12 kg до 0.36 kg са близки помежду си, като при използване на регулатора  $K_{mul}$  близостта е по-голяма и процесите

затихват по-бързо. Следователно системата с  $K_{mul}$  има по-добро робастно качество.



Фиг. 11. Ъглово положение  $\alpha$  за  $K_{mul}$



Фиг. 12. Ъглово положение  $\alpha$  за  $\bar{K}_{mul}$

## СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МАНИПУЛАТОР С ЕЛАСТИЧНО ЗВЕНО БЕЗ ПИЕЗО-АКТУАТОР

Схемата на манипулатора е подобна на представената на фиг. 1, като пиезо-актуаторът отсъства. Моделът на манипулатора без пиезо-актуатор се получава от (1), (2) и (3), като се положи  $b_{s_i} = 0$  и  $b_{a_i} = b_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . Входна величина за модела на манипулатора е двигателният момент  $\tau$ , създаван от електрозадвижването. Управляема величина е ъгловото положение  $\alpha$  на свободния край на манипулатора. Числените стойности на параметрите на манипулатора са същите, както за манипулатора на фиг. 1, като се изключат  $L_a$ ,  $S_a$  и  $k$ . За удобство  $\mu$ -регулаторът, при който не се използва пиезо-актуатор е означен  $K_{mu2}$ . Блоквата схема на затворената система за управление с  $K_{mu2}$  е подобна на схемата на фиг. 2, като регулаторът  $K$  също е с три входа, но има само една управляваща величина  $u$ , т.е. елементите  $W_v$ ,  $W_{av}$  и  $W_{d2}$  са отстранени и се приема, че  $W_{au} = W_a$ ,  $d_1 = d$  и  $W_{d1} = W_d$ .

Синтез на  $\mu$ -регулатор  $K_{mu2}$  с отчитане на неопределеността в масата на товара  $m_L$ , моделът  $M$  и тегловните предавателни функции  $W_p$ ,  $W_u$ ,  $W_d$ ,  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$  са представени в [2]. За  $K_{mu2}$  е определена балансирана реализация в пространството на състоянията, с която се извършват изследванията на системата.

### СРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИСТЕМИТЕ С $K_{mu1}$ И $K_{mu2}$

Максимумите на структурираната сингулярни стойности  $\mu$ , определящи робастната устойчивост на системите за управление с регулаторите  $K_{mu1}$  и  $K_{mu2}$ , са представени в табл. 2 и са приблизително равни, като робастната устойчивост на системата с използване на регулатора  $K_{mu1}$  е по-добра.

Табл. 2. Робастна устойчивост на системите за управление с регулаторите  $K_{mu1}$  и  $K_{mu2}$

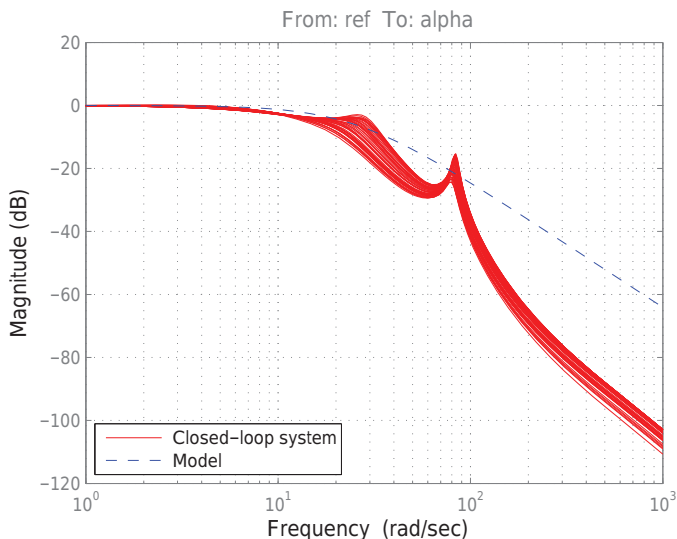
Регулатор	Робастна устойчивост $\mu_{max}$
$K_{mu1}$	0.617
$K_{mu2}$	0.626

Максимумите на структурираните сингулярни стойности  $\mu$  за случая на робастно качество на системите за управление с регулаторите  $K_{mu1}$  и  $K_{mu2}$ , са съответно 1.07 и 1.05, като са получени при различни условия.

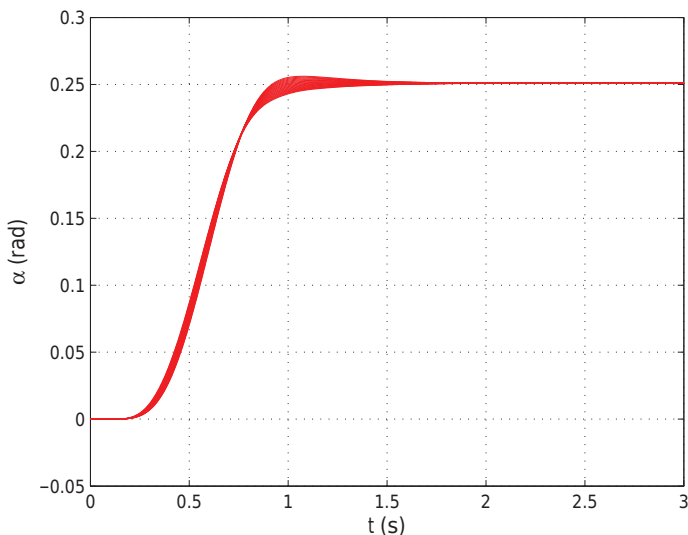
Логаритмичните амплитудно-честотни характеристики на затворената система с  $K_{mu2}$ , с вход  $r$  и изход  $\alpha$ , за 50 случайни комбинации от стойности на неопределените параметри са показани на фиг. 13. Вижда се, че се появяват пикове около втората и третата собствени честоти на манипулатора.

От сравняването на фигури 9 и 13 следва, че затворената система с  $K_{mu1}$  е малко по-бавна, но честотните характеристики са „събрани“ за по-широка честотна лента, поради което преходните процеси на системата с  $K_{mu1}$  са по-близки помежду си, отколкото преходните процеси на системата с  $K_{mu2}$ .

Системата за управление с  $\mu$ -регулатора  $K_{mu2}$  е изследвана с помощта на Simulink™ при  $d_r = 0.12 \text{ s}^{-1}$ ,  $\xi_2 = \xi_3 = 0.024$  и заданието (5). Двумерна графика, представяща преходните процеси за 21 стойности на масата на товара  $m_L$ , равномерно разпределени в интервала от 0.12 kg до 0.36 kg, на ъгловото положение  $\alpha$ , получени при симулиране на затворената система с регулатора  $K_{mu2}$  е показана на фиг. 14.



Фиг. 13. Амплитудно-честотни характеристики на затворената система с  $K_{mu2}$



Фиг. 14. Ъглово положение  $\alpha$  за  $K_{mu2}$

Вижда, че реализациите на процесите за  $\alpha$  при различните стойности на  $m_L$  са близки помежду си. От сравняването на фигури 11 и 14 се вижда, че при използване на регулатора  $K_{mu1}$  близостта е по-голяма, т.е. системата с  $K_{mu1}$  има по-добро робастно качество и процесите затихват по-бързо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представена е система за управление с  $\mu$ -регулатор от разсредоточен тип с две степени на свобода на манипулатор с еластично звено, движещ се в хоризонтална равнина. Сравнени са случаите с използване на пиезо-актуатор и  $\mu$ -регулатори, синтезирани със и без отчитане на масата на товара, като е показано, че при използване на  $\mu$ -регулатор, синтезиран с отчитане на неопределеността в масата на товара системата има по-добро робастно качество. Освен това са сравнени и случаите с  $\mu$ -регулатори, синтезирани с отчитане на неопределеността в масата на товара със и без пиезо-актуатор, като е показано, че при използване на  $\mu$ -регулатор с пиезо-актуатор системата има по-добро робастно качество.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Георгиев, Г. Ст., Г. Л. Лехов, И. В. Иванов. Модел с параметрична неопределеност на манипулатор с еластично звено и пиезо-актуатор. Механика на машините, том 21 (100), брой 1, стр. 32 - 37, ISSN 0861-9727, 2013.
- [2] Георгиев, Г. Ст., Г. Л. Лехов. Синтез на робастен регулатор от разсредоточен тип на манипулатор с еластично звено. Научни трудове на РУ „А. Кънчев“, том 53, серия 3.1, „Електротехника, електроника, автоматика“, подсекция „Електротехника, електроника, автоматика“, стр. 129 – 137, ISSN 1311-3321, Русе, 2014.
- [3] Георгиев, Г. Ст., Г. Л. Лехов, И. В. Иванов. Синтез на робастен регулатор на манипулатор с еластично звено и пиезо-актуатор. Механика на машините, том 23 (109), брой 1, стр. 18 - 23, ISSN 0861-9727, 2015.
- [4] Лехов, Г. Л., П. Х. Петков. Синтез на съсредоточено робастно управляващо устройство с две степени на свобода на манипулатор с еластично звено. Трудове на международната конференция „Автоматика и информатика“. София, I-201-204, 2010.
- [5] Balas, G., R. Chiang, A. Packard, M. Safonov. Robust Control Toolbox: User's Guide. Natick, MA: Math-Works, 2010.
- [6] Karkoub, M., G. Balas, K. Tamma, M. Donath. Robust Control of Flexible Manipulators via  $\mu$ -Synthesis. Control Engineering Practice, 8, 725-734, 2000.
- [7] Kerr, M., S. Jayasuriya, S. Asokanathan. QFT Based Robust Control of a Single-Link Flexible Manipulator. Journal of Vibration and Control, 13, No. 1, 3-27, 2007.
- [8] Lehov, G., P. Petkov. Design of a Collocated Robust Controller for a Flexible-Link Manipulator. 2012. Information, Communication and Control Systems and Technologies, No. 1, pp. 52-56, 2012.
- [9] Reis, J. C. P., J. Sa da Costa. Motion Planning and Actuator Specialization in the Control of Active-Flexible Link Robots. Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, 3255-3270, 2012.

### За контакти:

Ас. инж. Георги Стефанов Георгиев, Катедра „Компютърни системи и технологии“, Русенски университет „Ангел Кънчев“, Тел.: 082 888-681, 082 888-574, E-mail: gstefanov@ecs.uni-ruse.bg.

**Докладът е рецензиран.**