

Nová metodika návrhu rýchlostného servopohonu s IPD regulátorom pre dvojhmotový pružný systém

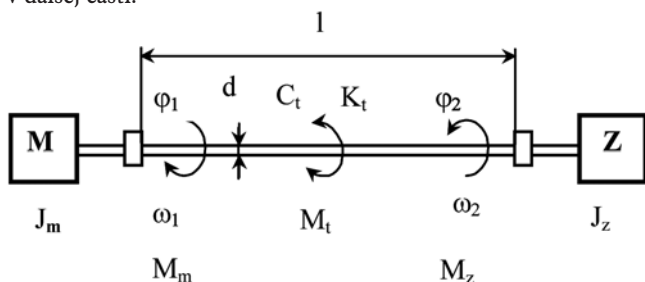
Radovan Macko, Milan Žalman

Článok sa zaoberá návrhom rýchlostného servopohonu pre dvojhmotový pružný systém bez tlmenia, pričom nie je priama merateľnosť riadenej veličiny. Metodika poskytuje ucelený spôsob návrhu IPD regulátora založený na metóde rozmiestňovania pólov. Na simulačnom modeli bola overená citlivosť na zmenu mechanických parametrov. Na pozorovanie uhlovej rýchlosti a zrýchlenia sa vyšetřili vlastnosti 2 Luenbergových pozorovateľov.

Úvod

Na riadenie a stabilitu dvojhmotového pružného systému v priemyselných aplikáciách sa v súčasnosti kladú veľmi veľké nároky. Vytvárajú sa nové štruktúry a metódy riadenia. S dvojhmotovým pružným systémom sa často stretávame v praxi. Takýto systém je napr. v priemyselnej oblasti pri výrobe plechov, kde sa vyskytuje pružný hriadeľ s veľmi nízkou vlastnou rezonančnou frekvenciou kvôli dlhej dĺžke hriadeľa a tým pádom aj s nízkou tuhosťou medzi motorom a záťažou. Toto spôsobuje náročné dosiahnutie presnej regulácie rýchlosti pre torznú vibráciu. Preto sa mnoho výskumných pracovníkov sústredilo na zníženie kmitania a vylepšenie regulácie dvojhmotového pružného systému. Regulácia rýchlosti pomocou PI a PID algoritmov, ktoré dokážu bez pozorovateľa určiť moment záťaže, bola zistená už v roku 2000 (Zhang a Furusho) [3]. Kalmanov Filter a rozklad LQ boli použité v regulátore rýchlosti na potlačenie kmitania (Zi a Sul v roku 1995). Potlačenie kmitania, ktoré využívalo spätnú väzbu z odhadovaného kritického momentu, bolo vyvinuté (Sugiura a Hori) v roku 1996. Automatické nastavovanie parametrov regulátora a pozorovateľa v riadiacom systéme s použitím genetického algoritmu bolo opísané v roku 2001 (Ito, et al.). V nasledujúcich prácach (Park, et al., 2001) bola opísaná systémová analýza a metódy návrhu regulátora rýchlosti pre dvojhmotový pružný systém, ktorá zahŕňala opis určovania pólov v uzavretej regulačnej slučke pre tri druhy spôsobov návrhov regulátorov rýchlosti, ako IP, IPD a stavový spätnoväzbový regulátor.

Zovšeobecnený prístup výberu pólov uzavretého obvodu predstavuje metóda syntézy navrhnutá na našom pracovisku a uvedená v ďalšej časti.



Obr.1 Dvojhmotový pružný systém

1. Návrh riadenia dvojhmotového (pružného) systému

Rýchlostný servopohon – dvojhmotový systém bez tlmenia (najhorší prípad), regulátor IPD

Uvažujme s dvojhmotovým pružným systémom podľa obr. 1.

$$M_t = C_t(\varphi_1 - \varphi_2) \quad \text{kde} \quad M_t = \frac{\pi d^4 G}{32 l} (\Delta\varphi) \quad C_t = \frac{\pi d^4 G}{32 l} \quad (1)$$

$$M_m - M_t = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \quad (2)$$

kde M_t je torzný moment (Nm),

C_t – konštanta torznej tuhosti (Nm/rad),

G – modul pružnosti (N/m²),

l – dĺžka pružnej tyče (m),

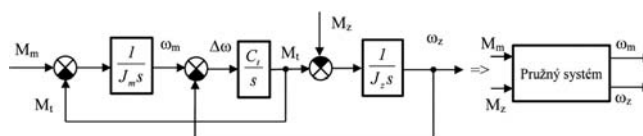
d – priemer tyče (m)

$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ je uhol deformácie (skrut)

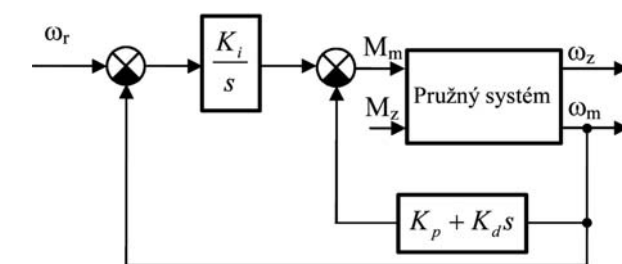
$$M_t = C_t \int (\omega_1 - \omega_2) dt \quad (3)$$

Model takéhoto pružného systému je na obr. 2. Schematické zapojenie rýchlostnej štruktúry I-PD regulácie na obr. 3.

Metóda umiestňovania pólov rýchlostného servopohonu umožňuje systematickým postupom analyticky navrhnuť regulátor



Obr.2 Model dvojhmotového pružného systému bez tlmenia



Obr.3 Bloková schéma pružného systému s IPD regulátorom

rýchlosti. Táto metóda syntézy regulátora rýchlosti motora zabezpečuje požadovanú kvalitu regulácie výstupného hriadeľa, t. j. tlmenie celého servopohonu, ktoré priamo súvisí s osciláciami (kmitaním) dvojhmotového systému.

Nech platí:

ω_a je antirezonančná uhlová rýchlosť, kde

$$\omega_a = \sqrt{\frac{C_t}{J_z}} \quad (4)$$

R je pomer momentov zotrvačnosti

$$R = \frac{J_z}{J_m} \quad (5)$$

ω_b je uhlová rýchlosť reprezentujúca vlastnú frekvenciu mechanického systému,

$$\omega_b = \omega_a \sqrt{1+R} \quad (6)$$

Dynamicke vlastnosti systému určujú len póly prenosovej funkcie ω_z/ω_r . Póly uzavretého regulačného obvodu volíme vhodne. Nech póly obsahujú jeden pár komplexne združených pólov a dvojicu jednoduchých násobných pólov:

$$(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + k\omega_0)^2 = s^4 + 2\omega_0(\xi + k)s^3 + \omega_0^2(1 + k^2 + 4k\xi)s^2 + 2\omega_0^3 k(1 + k\xi)s + k^2\omega_0^4 \quad (7)$$

Nech je ďalej:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\xi + k}{k(1 + k\xi)}} \omega_a$$

Potom parametre IPD regulátora budú:

$$K_d = J_m \frac{A - \omega_b^2}{\omega_a^2 - A} \quad \text{kde} \quad A = \omega_0^2(1 + k^2 + 4k\xi) - k^2\omega_0^4 / \omega_a^2$$

$$K_I = k^2\omega_0^4(J_m + K_d) / \omega_a^2 \quad K_p = 2\omega_0(\xi + k)(J_m + K_d) \quad (8)$$

Voliteľným parametrom je tlmenie ξ a koeficient k určujúci polohu jednoduchého pólu. Pásmo priepustnosti ω_0 nie je voliteľné.

2. Vyšetrenie vplyvu zmeny mechanických parametrov na kvalitu regulácie

Na overenie je použitá simulačná schéma z obr. 3 v diskretnej verzii. Pre stabilitu navrhnutého riadenia a jeho odolnosť je veľmi dôležitý pomer $R = J_z/J_m$. Ak je tento pomer menší ako 1, (napríklad 0,2), potom stabilita regulačného obvodu výrazne závisí od presnosti hodnoty momentu zotrvačnosti motora J_m . Už 5 % chyba môže spôsobiť nestabilitu riadenia. V praxi býva tento pomer väčší ako 1, preto sa článok zaoberá týmto prípadom. Vo všeobecnosti platí, že čím väčší je pomer R , tým je citlivosť na zmeny mechanických parametrov menšia.

Vykonal sa simulačné pokusy pre tieto parametre dvojhmotového systému:

Pre $R = 1$:

$$J_{m0} = 1,2525 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$J_{z0} = R \cdot J_{m0}$$

$$C_{r0} = 6,6 \text{ Nm/rad}$$

Voliteľné parametre regulačného obvodu rýchlosti:

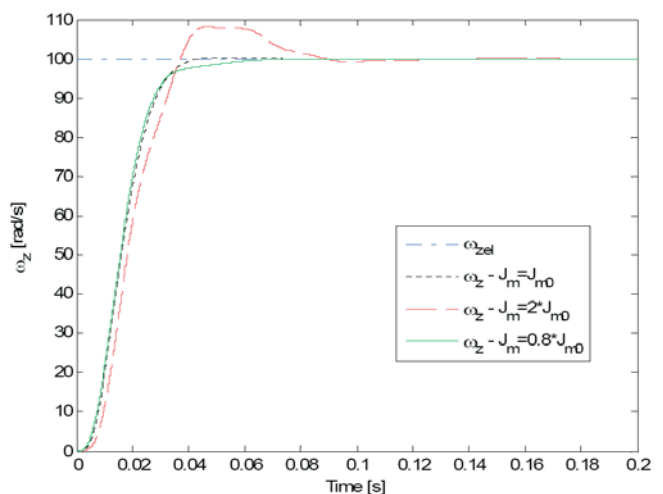
$$k = 1$$

$$\xi = 1$$

Pre $R = 1$: $J_{z0} = R \cdot J_{m0}$

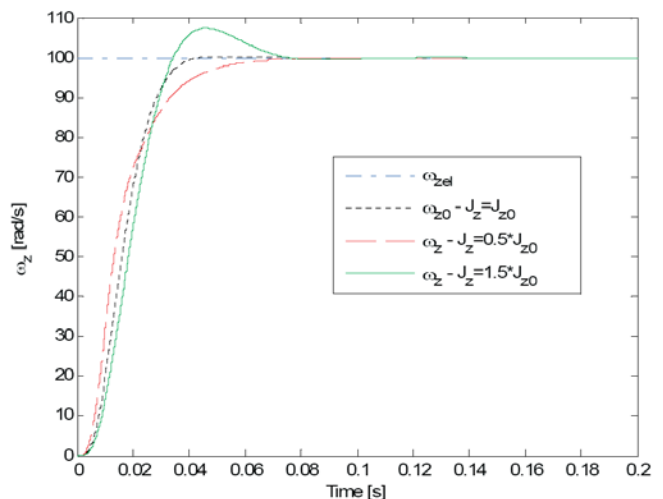
V nasledujúcom pokuse je vyšetrený vplyv zmien J_m na dvojhmotový systém s pomerom $R = 1$. Na obr. 4 vidieť vplyv zmeny $J_m = 0,8 \cdot J_{m0}$ a $2 \cdot J_{m0}$. Je zrejmé, že zmena pod skutočnú hodnotu (J_{m0}) síce nespôsobuje prekmit, ale spomalenie dobehu (a nestabilitu

Zmena J_m



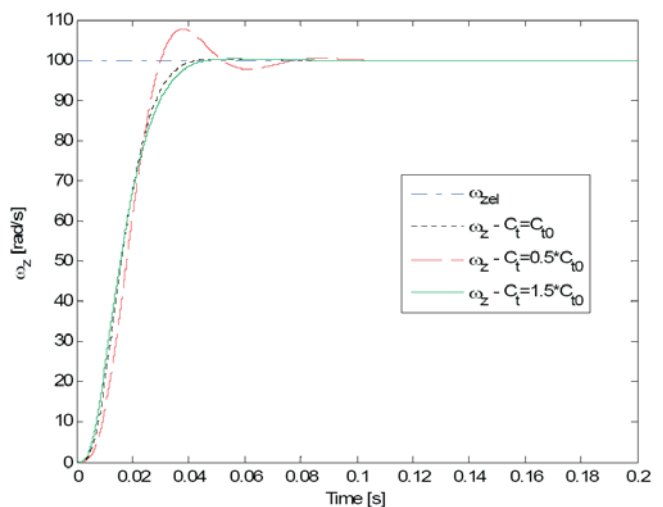
Obr.4 Regulácia rýchlosti
pre $J_m = 0,8 \cdot J_{m0}$ a $2 \cdot J_{m0}$, $J_z = J_{z0}$, $C_t = C_{r0}$

Zmena J_z



Obr. 5 Regulácia rýchlosti
pre $J_m = J_{m0}$, $J_z = 0,5 \cdot J_{z0}$ a $1,5 \cdot J_{z0}$, $C_t = C_{r0}$

Zmena C_t



Obr. 6 Regulácia rýchlosti
pre $J_m = J_{m0}$, $J_z = J_{z0}$, $C_t = 0,5 \cdot C_{r0}$ a $1,5 \cdot C_{r0}$

pri $J_m = 0,75 \cdot J_{m0}$). Naopak zmena nad skutočnú hodnotu (J_{m0}) nespôsobuje nestabilitu, iba prekmit alebo mierne kmitanie pri ustáľovaní.

V ďalšom grafe na obr. 5 je vyšetrenie vplyvu zmeny J_z o ± 50 %. Pri zmenách pod hodnotu J_{z0} sa kvalita výrazne nezhoršuje.

Pri zmene nad hodnotu J_{z0} sa však dá pozorovať prekmit, ktorý bude tým väčší, čím väčšia bude zmena J_z .

Obr. 6 dokumentuje presne opačný vplyv zmeny parametra pružnosti C_t , ak je C_t väčšie ako C_{t0} kvalita regulácie sa takmer nemení, ak je však menšie, vzniká prekmit. Priebiehy dokumentujú reguláciu skokovej zmeny želannej veličiny pri perióde vzorkovania $T_{vz} = 0,5$ ms a pri zmene jednotlivých mechanických parametrov.

Pre zväčšujúci sa pomer R sa vlastnosti zlepšujú. V poslednom pokuse nastala zmena všetkých mechanických parametrov súčasne (to sa totiž bude stávať v praxi pre nepresnosti). Vyhodnotili sa dva prípady, ktoré možno označiť ako najnepriaznivejšiu a najpriaznivejšiu kombináciu súčasných zmien všetkých mechanických parametrov pri pomere $R = 3$, teda $J_{z0} = 3 \cdot J_{m0}$. Výsledky simulácií s týmito zmenami v parametroch sú na obr. 7.

Pre $R = 3$: $J_{z0} = R \cdot J_{m0}$

Ako najnepriaznivejšia sa javí nasledujúca súčasná zmena všetkých troch parametrov:

$$J_m = 0,5 \cdot J_{m0}$$

$$J_z = 2 \cdot J_{z0}$$

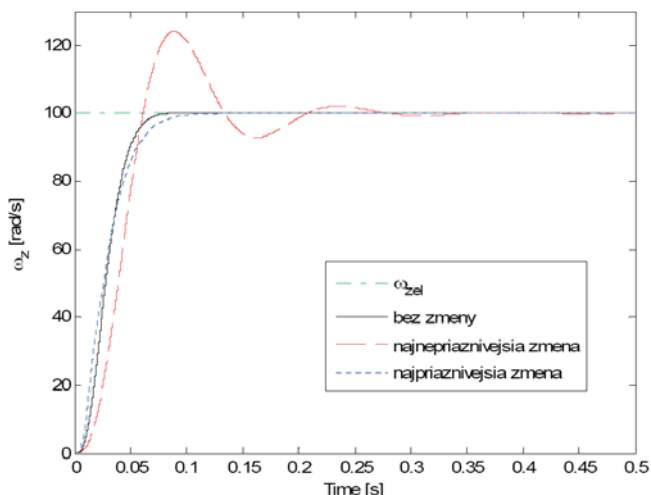
$$C_t = 0,5 \cdot C_{t0}$$

Ako najpriaznivejšia sa javí nasledujúca súčasná zmena všetkých troch parametrov:

$$J_m = 2 \cdot J_{m0}$$

$$J_z = 0,5 \cdot J_{z0}$$

$$C_t = 2 \cdot C_{t0}$$



Obr.7 Najpriaznivejšia a najnepriaznivejšia zmena všetkých troch mechanických parametrov

Z obr. 7 je zrejme to, čo už bolo povedané, že s rastúcim pomerom R rastie odolnosť proti zmenám parametrov (pri $R = 1$ a $T_{vz} = 0,5$ ms by bola regulácia pre najnepriaznivejšiu zmenu nestabilná). Ďalej je vidieť, že aj pri najnepriaznivejšej zmene parametrov je systém stabilný a ustáľuje sa pomerne rýchlo. V prípade najpriaznivejšej zmeny je kvalita regulácie uspokojivá. Ak nie sú známe presné mechanické parametre systému, je vhodné prikloniť ich smerom, ktorý naznačuje najpriaznivejšia zmena (J_m a C_t k vyšším hodnotám, J_z k nižším hodnotám).

3. Estimátor uhlovej rýchlosti ω a zrýchlenia ε

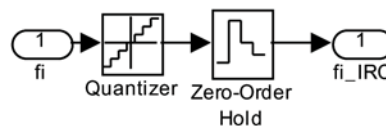
IRC snímač polohy je uvažovaný na hriadelí motora.

Parametre IRC snímača:

Perióda vzorkovania: $T_{vz} = 0,5$ ms

Rozlíšenie IRC: 10 000 imp./ot.

Perióda vzorkovania je veľmi dôležitý parameter, jej veľkosť ovplyvňuje stabilitu, kvalitu, rozsah pomerov R , pre ktoré je sú-



Obr.8 Realizácia IRC snímača

stava stabilná, ako aj realizovateľnosť. Preto sa vzhľadom na hardvérovú realizovateľnosť, ako aj vzhľadom na uspokojivé vlastnosti regulácie zvolila $T_{vz} = 0,5$ ms.

Signál IRC (poloha φ) je jediným signálom, ktorý je k dispozícii. Na reguláciu je potrebná ešte informácia o uhlovej rýchlosti a zrýchlení. Tieto dva signály sa dajú získať estimáciou podľa týchto vzťahov:

$$\omega(k) = \frac{\varphi(k) - \varphi(k-1)}{T_{vz}} \quad (9)$$

$$\varepsilon(k) = \frac{\omega(k) - \omega(k-1)}{T_{vz}} \quad (10)$$

Je zrejme, že druhá diferenciácia signálu polohy bude mimoriadne zašumená, a to tým viac, čím menšia sa zvolí perióda T_{vz} .

Vplyv IRC snímača je pomerne malý, ak ide o regulovanú uhlovú rýchlosť (ω_z), tu sa prejaví len malé oneskorenie a mierne kmitanie (menšie ako 0,01 rad/s). Estimácia spôsobí veľkú kmitavosť signálu rýchlosti motora a hlavne zrýchlenia. Aby sa obmedzil tento vysoký rozkmit zrýchlenia a následne aj momentu motora, je vhodné použiť iný spôsob vyhodnotenia rýchlosti a zrýchlenia z IRC – pozorovateľ uhlovej rýchlosti a zrýchlenia.

4. Realizácia rýchlostného servopohonu s pozorovateľom rýchlosti a zrýchlenia

Vyšetrovali sa vlastnosti Lorenzovej štruktúry a PID štruktúry pozorovateľa [10]. Oba pozorovatele patria do skupiny Luenbergerových pozorovateľov.

Lorenzova štruktúra pozorovateľa uhlovej rýchlosti a zrýchlenia motora

Lorenzova štruktúra pozorovateľa je na obr. 9. Vstupom do tejto štruktúry je aktuálna poloha motora φ_{IRC} a požadovaný moment motora Mm^* . Okrem týchto vstupov je ešte potrebná informácia o momente zotrvačnosti motora J_m . Jej zvláštnosťou je, že počíta diferenciáciu polohy φ_{IRC} . Ďalšou zvláštnosťou je, že počíta priemer z posledných dvoch vzoriek rýchlosti.

$$K_{IO} = J_m \omega_{0_nL}^3$$

$$K_{SO} = J_m \omega_{0_nL}^2 (2\xi_{nL} + 1)$$

$$b_O = J_m \omega_{0_nL} (2\xi_{nL} + 1) \quad (11)$$

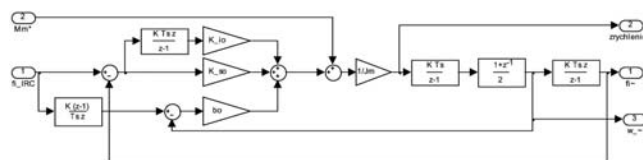
Hodnoty voliteľných parametrov pozorovateľa:

$$\omega_{0_nL} = 400 \text{ a } \xi_{nL} = 1$$

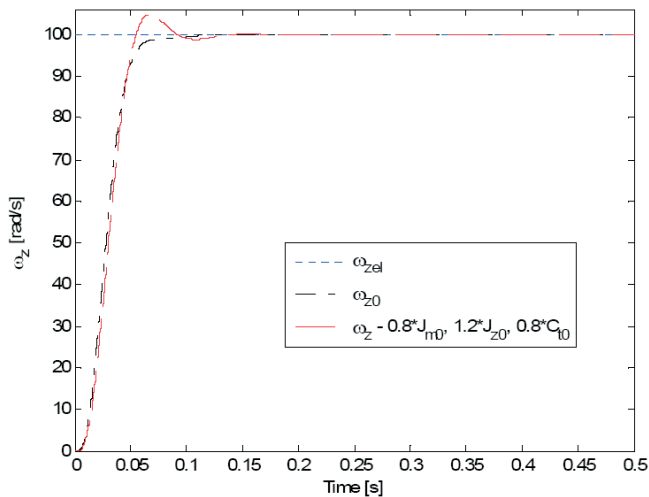
Pre $R = 3$: $J_{z0} = R \cdot J_{m0}$

Pre tieto nastavenia bol urobený pokus, v ktorom sa ukázala kvalita regulácie s Lorenzovou štruktúrou pozorovateľa, a takisto sa vyšetril vplyv súčasnej zmeny všetkých troch mechanických parametrov o 20 % tým nepriaznivejším smerom pre $T_{vz} = 0,5$ ms.

Na obr. 10 sú porovnané priebiehy uhlových rýchlostí. Z týchto priebiehov je zrejme, že regulácia s týmto pozorovateľom je uspo-



Obr.9 Schéma Lorenzovho pozorovateľa



Obr.10 Priebehy rýchlostí s použitím Lorenzovho pozorovateľa a zmenených mechanických parametrov

kojivá aj pri perióde 0,5 milisekundy (čo je realizovateľné) a zmene všetkých troch mechanických parametrov až o 20 %. Táto zmena je pomerne veľká, napriek tomu uhlová rýchlosť len mierne prekmitla. Tento prekmit možno ďalej zmenšiť, prípadne úplne eliminovať použitím referenčného signálu v tvare krivky Sz master generátora želaných veličín.

PID pozorovateľ uhlovej rýchlosti a zrychlenia

Pri tejto štruktúre je možnosť výberu medzi dvomi signálmi rýchlosti ω_1 a ω_2 , obr. 11.

Parametre PID pozorovateľa sa navrhujú podobne ako pri Lorenzovej štruktúre. PID pozorovateľ je vlastne jedna časť Lorenzovej štruktúry.

$$\begin{aligned} K_{IVO} &= J_m \omega_0^3_{pr} \\ K_{VO} &= J_m \omega_0^2_{pr} (2\xi_{pr} + 1) \\ B_{VO} &= J_m \omega_0_{pr} (2\xi_{pr} + 1) \end{aligned} \quad (12)$$

Pri porovnaní výsledkov regulačného obvodu s použitím PID štruktúry a oboch signálov rýchlosti sa zistilo, že lepšie výsledky sa dosahujú s použitím signálu ω_2 .

Voliteľné parametre pozorovateľa: Voliteľné parametre regulátora:

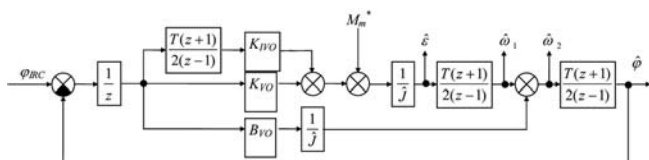
$$\begin{aligned} \omega_{0pr} &= 400 & k &= 1 \\ \xi_{pr} &= 0,8 & \xi &= 1,5 \end{aligned}$$

Pre $R = 3: J_{z0} = R \cdot J_{m0}$

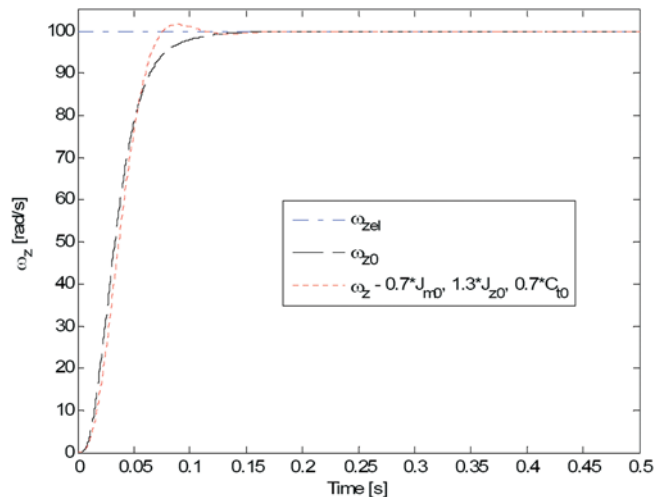
$T_{vz} = 0,5$ ms

Dynamika GM = 1 ms

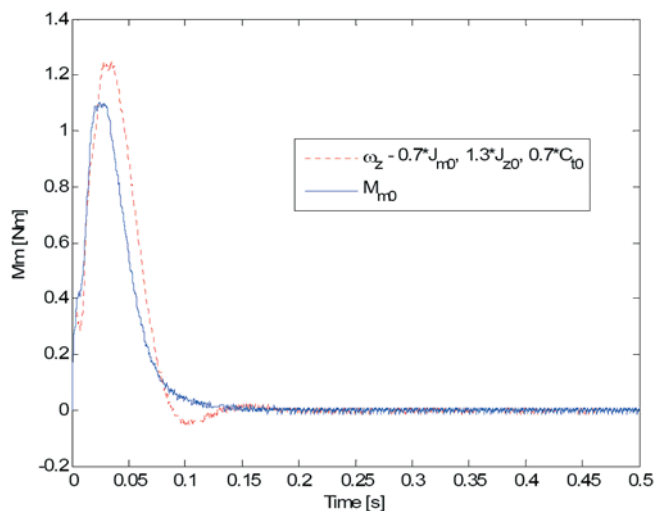
Z obr. 12 je vidieť, že regulácia s PID pozorovateľom dáva veľmi dobré výsledky aj pri súčasnej zmene všetkých troch mechanických parametrov o 30 %. Neistota v parametroch sa prejavuje len miernym prekmitom, ktorý je pri 30 % zmene dokonca menší ako v predošlom pokuse s Lorenzovým pozorovateľom a 20 % zmenou parametrov (obr. 10). Okrem toho je veľkou prednosťou pozorovateľov, že pri ich použití na pozorovanie zrychlenia sa podstatne znižuje rozkmit momentu motora, obr. 13. Pre názornosť je na obr. 14 porovnaný moment motora pri vyhodnotení zrychlenia pozorovateľom s momentom motora pri vyhodnotení estimáciou.



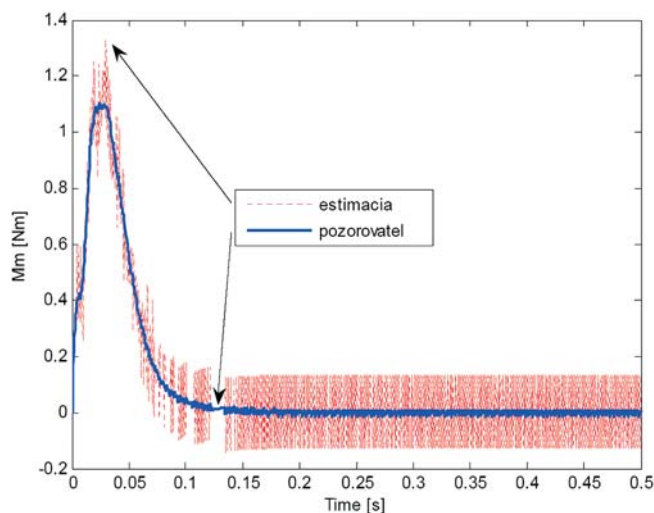
Obr.11 štruktúra PID pozorovateľa uhlovej rýchlosti a zrychlenia motora



Obr.12 Porovnanie uhlových rýchlostí realizácie s PID pozorovateľom a 30 % zmenou v mechanických parametroch



Obr.13 Porovnanie momentu motora realizácie s PID pozorovateľom a 30 % zmenou v mechanických parametroch



Obr.14 Porovnanie momentov motora M_m pri rôznych spôsoboch vyhodnotenia zrychlenia motora

Je vidieť značný pokles kmitavosti, ktorý bude ešte výraznejší pri menších periódach vzorkovania (<0,5 ms).

Zhodnotenie

Na základe uvedených výsledkov možno povedať, že táto metóda návrhu riadenia dvojhmotového pružného systému dáva uspokojivé výsledky. Zamedzuje nežiaducemu kmitaniu rýchlosti, a to aj pri systéme s čistou pružnosťou bez tlmenia. V súčasnosti s PID

pozorovateľom je metóda vhodná na realizáciu, keďže pozorovateľ poskytuje potrebnú informáciu o zrýchlení s minimálnym rozkmitom. Metóda bola simulačne overená pri vzorkovacej perióde 0,5 ms. Výsledky sú aplikovateľné v praxi aj pri súčasnej zmene všetkých troch mechanických parametrov o 30 %.

Ďalšie zvýšenie kvality možno dosiahnuť:

- znížením T_{12} , čo však môže spôsobiť problém s hardvérovou realizáciou pre výpočtovú náročnosť,
- použitím referenčného signálu rýchlosti z master generátora želaných veličín namiesto skokovej zmeny,
- dodržaním vhodného pomeru R , vhodné je $R \geq 3$.

V budúcnosti sa plánuje doplniť regulátor o identifikáciu mechanických parametrov pružného systému, čo by malo zabezpečiť ďalšie kvalitatívne zlepšenie regulácie a zvýšiť univerzálnosť riešenia pre širšiu oblasť dvojhmotových systémov.

Článok vznikol v rámci riešenia projektu VEGA 1/3089/06 Rozvoj a integrácia metód teórie nelineárnych systémov.

Literatúra

- [1] DAEDONG, GYONGSAN, KYUNGBUK: Autonomous Controller design using Genetic Algorithms in a Two-Inertia motor system. IFAC, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [2] MASAHIKO, I., SHINJI, K.: Suppression of Transient Vibration for Geared Mechanical System using Model-Based Control. Shinshu University, Nagano, Japan.
- [3] ZHANG, G., FURSHO, J.: Speed Control of Two-Inertia system by PI/PID control, IEEE. Transactions on industrial electronics, Vol. 47, NO. 3, 2000.
- [4] GUNNARSSON, S., ÖSTRING, M.: On Regulator Stability in Control of Flexible. Mechanical Systems, 32nd International Symposium on Robotics, Seoul, Korea, 2001.

[5] BROCK, S.: Application of Controller for Two – Mass – System, University of Technology, Department of Electrical Engineering, POLAND.

[6] MASASHI, K., KOICHI, H., YOSHIO, I.: Resonance Ratio Control of Two-mass System with Disturbance Observer Including Elastic Vibration. Kochi University of technology, Kochi, JAPAN.

[7] LORENZ, R., LIPO, T. A., NOVOTNY, D. W.: Motion Control with Induction Motors. Proceedings of The IEEE vol. 82, No 8, august 1994, pp. 1 215 – 1 239.

[8] LORENZ, R. D., PATTEN, V.: High resolution velocity estimation. IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 27, No 4, pp. 701 – 708, July/aug. 1991.

[9] SCHMIDT, P. B., LORENZ, R. D.: Design principles and implementation of acceleration feedback to improve performance of dc drive. IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 28, No3, pp. 594 – 599, may/june 1992.

[10] LORENZ, R. D.: Advances in Electric Drive Control. IEMDC, Seattle, May 9. – 12. 1999, pp. 9 – 18.

Ing. Radovan Macko
prof. Ing. Milan Žalman, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra automatizácie a regulácie
Ilkovičova 3, 842 47 Bratislava
e-mail: radovan.macko@stuba.sk
milan.zalman@stuba.sk