

ÚVOD DO RIADENIA ELEKTRICKÝCH SERVOPOHONOV S PRUŽNÝM SPOJENÍM – PRAVIDLÁ A LIMITY

Michal MALEK¹, Pavol MAKYŠ¹, Marek ŠTULRAJTER¹

¹Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovensko

malek@kves.uniza.sk, makys@kves.uniza.sk, stulrajter@kves.uniza.sk

Abstrakt. Elektrické servopohony sa vyznačujú presným sledovaním polohy a jej derivácií. V ceste splnenia tohto cieľa im stojí množstvo prekážok, či už odchýlok súvisiacich s konečným stupňom astatizmu, zmenami parametrov systému počas polohovania alebo so zmenami záťažového momentu ako poruchovej veličiny. Problémy nastavujú aj v situácii, kedy spojenie medzi servomotorom a záťažou, ktorú poháňa, nie je „dokonale“ tuhé. A práve základmi riadenia pohonu ovplyvneného týmto fenoménom sa venuje nasledujúci príspevok.

Kľúčové slova

Servopohon, pružné spojenie, rezonančná a antirezonančná frekvencia.

1. Úvod

Problémy súvisiace s pružným spojením v elektrických pohonoch sú známe už niekoľko desaťročí a môžu znamenať vážnu komplikáciu pri návrhu pohonu. Ide však hlavne o to, do akej miery sme ochotní vplyvy pružného spojenia akceptovať. Napr. posudzovanie tohto vplyvu pri pásovom dopravníku a presnom servopohone bude diametrálne odlišné. Miera tuhosti, ktorá u dopravníka nespôsobí žiadne prevádzkové problémy, môže u presného servopohonu znamenať veľký problém s komplikovaným riešením. Preto je u servopohonov nutné brať do úvahy aj spojenia, ktoré by sa z pohľadu menej dynamicky náročných aplikácií mohli zdať ako tuhé (napr. prevod rotačného pohybu na lineárny). Opis vplyvu pružného spojenia a možné spôsoby riešenia ponúkajú nasledujúce riadky.

2. Pružné spojenie

Z pohľadu elektrotechnika sa najjednoduchšie dá na mechanické pružné spojenie nazerať ako na sériový R-L-C obvod, a i keď ide len o jednohmotový systém (hmota

je pružne spojená s pevnou časťou), je to pomerne názorná paralela. Napätie privádzané na svorky obvodu predstavuje v mechanickom náprotivku moment, ktorým krútime hmotu. Prúd, ktorý je ako dôsledok privedeného napätia pretláčaný obvodom, je v mechanickom ponímaní uhlovou rýchlosťou spomínanej hmoty. Aj pasívne členy v obvode majú svoje mechanické náprotivky. Odporu R , ktorý v elektrickom obvode tlmí nárast nabíjacieho prúdu, prislúcha koeficient tlmenia k , ktorý má v mechanickom obvode už podľa svojho názvu rovnaký účinok. Schopnosť akumulovať energiu, ktorou v elektrickom obvode disponuje indukčnosť, má v mechanickom obvode samotná hmota (reprezentovaná momentom zotrvačnosti J), ktorá akumuluje kinetickú energiu. A nakoniec prevrátenej hodnote kapacity $1/C$ v elektrickom obvode odpovedá koeficient tuhosti c . Uvedenému odpovedajú rovnice (1) a (2):

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt, \quad (1)$$

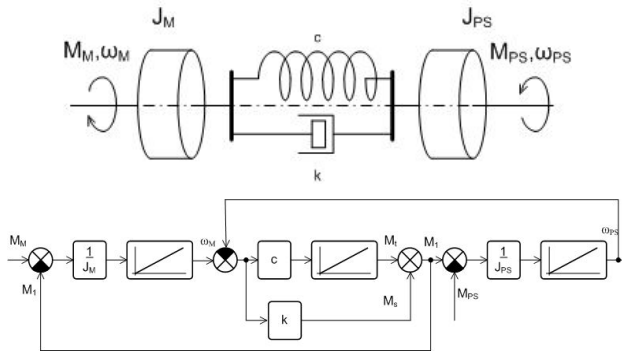
$$M = k\omega + J \frac{d\omega}{dt} + c \int \omega dt. \quad (2)$$

Rovnica (2) hovorí, že moment, ktorý pôsobí na hmotu, je tvorený tromi zložkami, a to (v poradí v akom sú uvedené): momentom viskózneho tlmenia (tlmiaci moment), dynamickým (akceleračným) momentom a torzným momentom.

Pri dvoj a viachmotovom systéme musíme brať do úvahy aj parametre ďalších hmôt. Znamená to, že uhlová rýchlosť a integrál uhlovej rýchlosti tzn. poloha sústavy (z rovnice (2)), sú dané rozdielom týchto veličín hnacej a hnanej hmoty. Moment je, v konkrétnejšom vyjadrení, elektromagnetickým momentom motora M_M . Graficky uvedené skutočnosti ozrejní Obr. 1.

Pozn. Veličiny s indexom PS súvisia s pracovným strojom, záťažou.

Pri viachmotovom systéme sa vyšetrujú jednotlivé dvojice, pričom rolu hnacej hmoty „hrá“ vždy tá, ktorá je bližšie k motoru.



Obr. 1: Dvojhmotový systém: principiálny model a bloková schéma.

Pri ďalšom vyšetrovaní si pomôžeme tým, že sústavu transformujeme pomocou Laplaceovej transformácie do frekvenčnej oblasti. Vlastnosti sústavy totiž okrem prechodových charakteristík dobre dokumentujú frekvenčné charakteristiky. Tu je vhodné si vyjadriť prenos systému. Vstupom bude moment motora M_M , ktorý spôsobí zmenu uhlovej rýchlosti motora ω_M , čo bude v tomto prípade výstupná veličina. Takže zo schémy (Obr. 1) vyplýva:

$$F(s) = \frac{\omega_M}{M_M} = \frac{1}{s} \frac{s^2 J_{PS} + sk + c}{s^2 J_M J_{PS} + sk(J_M + J_{PS}) + c(J_M + J_{PS})} \quad (3)$$

Pozn. Obdobný prenos vychádza aj pri definovaní polohy ako výstupnej veličiny s tým rozdielom, že namiesto jedného nulového koreňa bude menovateľ obsahovať dva. Tu je vidieť, že prenos obsahuje tri póly a dve nuly, ktoré majú dominantný vplyv na správanie sa systému. Najdôležitejšie sú komplexne združené póly a nuly, ktoré sú definované vlastnou frekvenciou a pomerným tlmením:

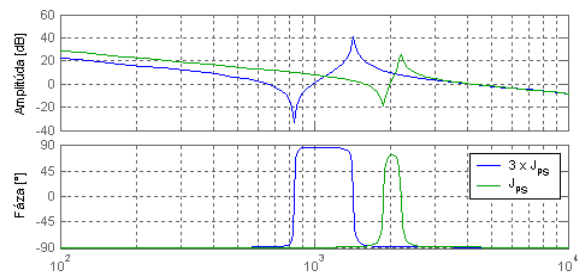
$$\omega_{0pól} = \sqrt{c \frac{J_M + J_{PS}}{J_M J_{PS}}}, \quad (4)$$

$$\xi_{pól} = \frac{k}{2} \sqrt{\frac{J_M + J_{PS}}{c J_M J_{PS}}}, \quad (5)$$

$$\omega_{0nula} = \sqrt{\frac{c}{J_{PS}}}, \quad (6)$$

$$\xi_{nula} = \frac{k}{2\sqrt{c J_{PS}}}. \quad (7)$$

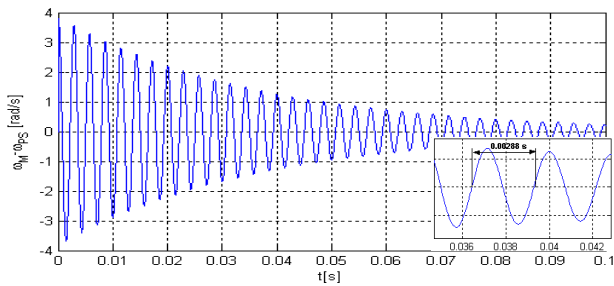
Aký majú, význam ozrejní logaritmickej amplitúdová frekvenčná charakteristika (LAFCH) na Obr. 2 a nasledovné riadky.



Obr. 2: LAFCH mechanického systému s pružným spojením.

Uvedený prenos s nulami a pólmi naznačuje, že výsledné charakteristiky budú mať sklon -40 dB. Prvá uvedená je vlastná frekvencia prislúchajúca pólom $\omega_{0pól}$. Je známejšia pod označením rezonančná frekvencia. V okolí tejto frekvencie sa charakteristika deformuje rezonančným prevýšením a táto deformácia pri tejto frekvencii dosahuje svoj vrchol. Je zrejmé, že vybudenie systému touto frekvenciou bude znamenať závažnú zmenu v chovaní systému. Ďalej charakteristickej rovnici systému (3) prislúcha pomerné tlmenie $\xi_{pól}$. To má výrazný vplyv na priebeh charakteristiky. Čím je hodnota $\xi_{pól}$ vyššia, tým „tupšie“ a „nižšie“ budú rezonančné prevýšenia. Pomerné tlmenie je priamo úmerné koeficientu tlmenia. Vlastná frekvencia prislúchajúca nulám ω_{0nula} je nazývaná ako antirezonančná frekvencia. Jej veľkosť je nezávislá na hmote motora. Pri tejto frekvencii sa zdá ako keby motor stál a oscilovala len záťaž. A nakoniec pomerné tlmenie ξ_{nula} má podobný efekt ako $\xi_{pól}$, ale dosahuje iných hodnôt a má vplyv na časť charakteristiky okolo antirezonančnej frekvencie. Fázová časť charakteristiky už podľa (3) vykazuje posun -90° , ale v oblasti prevýšenia sa preklápa do kladnej časti v závislosti na veľkosti pomerného tlmenia.

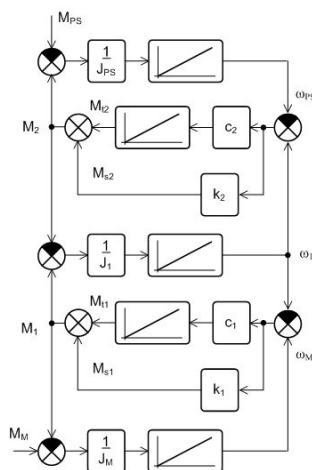
Aby sme videli aký bude mať pružné spojenie motora a záťaže vplyv na veličiny v časovej oblasti, musíme systém vybudovať impulzovým vzruchom a sledovať rýchlosti obidvoch častí sústrojenstva. Obrázok 3 zachytáva rozdiel týchto rýchlostí. Tu je vidieť, že výsledkom sú oscilácie, ktoré exponenciálne zanikajú. Rýchlosť zániku je daná pomerným tlmením systému (čím väčšie pomerné tlmenie, tým je väčšia strmota exponenciály). A nakoniec frekvencia kmitov odpovedá rezonančnej frekvencii systému čo je možné porovnať aj s Obr. 2. Vlastná frekvencia z Obr. 2 je rovná $2201,4 \text{ rads}^{-1}$ čiže 350 Hz . Perióda kmitov z Obr. 3 je $0,00288 \text{ s}$ čo odpovedá frekvencii $347,2 \text{ Hz}$. Rozdiel je spôsobený nepresným odčítaním z priebehu.



Obr. 3: Odozva rozdielu rýchlostí motora a pracovného stroja na vzruch (jednotkový impulz).

Výrazný vplyv na charakteristiky systému má však aj moment zotrvačnosti záťaže. Jeho zvýšenie spôsobí v charakteristike zväčšenie vzdialenosti medzi dotyčnicami častí pred a za rezonančnou frekvenciou ako aj zníženie frekvencií $\omega_{\text{opól}}$ a $\omega_{\text{omúla}}$ čím sa zredukuje možné pásmo priepustnosti. Spomínané skutočnosti zobrazuje Obr. 2. Zvýšenie J_{PS} spôsobí zníženie pomerného tlmenia a zníženie vlastných frekvencií a tak odozva rozdielu rýchlostí na impulz bude poznačená dlhším doznievaním s nižšou frekvenciou kmitov. Zmena J_{PS} má podľa (3) a Obr. 2 vplyv len v oblasti nižších frekvencií. V oblasti vyšších frekvencií priebeh ovplyvňuje hlavne J_M .

Z uvedeného vyplýva, že z hľadiska rezonancie, zvyšovanie J_{PS} pôsobí na systém nepriaznivo, keďže znižuje použiteľné pásmo priepustnosti. Bolo spomenuté, že v oblasti vyšších frekvencií charakteristiku ovplyvňuje len J_M . Tu sa zdá (Obr. 2), ako keby pracoval len motor samotný. Amplitúda sa zvýši a zostáva konštantne zvýšená. Znova, ako aj v horeuvedenom prípade, ide o neželaný stav, ktorému je nutné sa vyhnúť. Neželaný hlavne v dôsledku redukcie stability, ktorú v tomto prípade reprezentuje amplitúdová bezpečnosť.



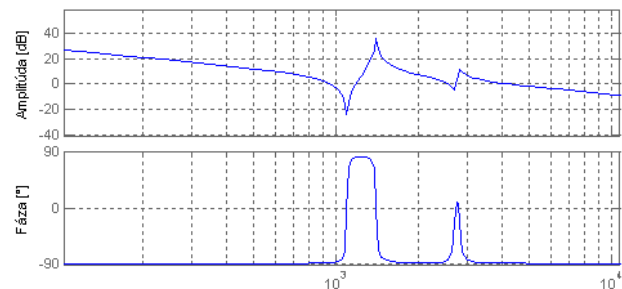
Obr. 4: Bloková schéma trojhmotového systému.

V oblasti nasadenia elektrických servopohonov nie je ničím výnimočný prípad série viacerých pružných spojení medzi motorom a záťažou. Ako už bolo spomenuté, pre druhé

pružné spojenie v poradí predstavuje pohonnú hmotu to predchádzajúce (Obr. 4).

V tomto prípade, ako je zrejme, vstúpi do hry ďalšia dvojica „pól“ a „nól“, ktorá ovplyvní správanie sa systému, čo dokazuje Obr. 5. Pribudla ďalšia dvojica rezonančnej a antirezonančnej frekvencie. Rozhodujúci vplyv na riadenie má tá, ktorá má nižšie hodnoty spomínaných frekvencií. Je vhodné pripomenúť, že poradie v akom sa nachádzajú na LAFCH nemusí korešpondovať s poradím na schéme. Rozhodujúci je pomer momentov zotrvačností a torzných tuhostí analogicky podľa vzťahu (4) (i keď tento vzťah už v tomto prípade v tejto forme neplatí). V tomto konkrétnom prípade výsledné priebehy v časovej oblasti ovplyvňuje nižšia zo zobrazených frekvencií, a oscilácie rozdielu rýchlostí budú poznačené práve touto frekvenciou.

Je vhodné pripomenúť, že nevýhoda vo forme oscilácii na výstupe systému nie je jedinou nevýhodou. Ďalšou nevýhodou a treba povedať, že úzko spätou s vyššie uvedenou je hluk, ktorý v systéme vzniká. Buď sa jedná o hluk prislúchajúci rezonančnej frekvencii alebo dochádza k takzvanej vysokofrekvenčnej „rezonancii“ (*high frequency resonance*), ktorá je závislá od zosilnenia systému a tón závisí od pomerov v regulačnom obvode. Pre skúseného technika môže byť hluk vodítkom pri identifikácii typu rezonancie a rozhodovaní sa o možnostiach jeho eliminácie.



Obr. 5: LAFCH trojhmotového systému.

Pozn. Analogicky by bolo možné spojiť teoreticky n hmôt s pružným spojením.

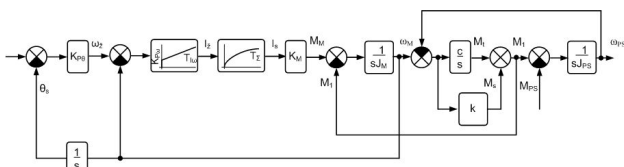
3. Servopohon s pružným spojením

Na ďalších riadkoch ozrejníme, ako sa bude chovať celá sústava, ak horeopísaný systém aplikujeme na servopohon so synchronným motorom s permanentnými magnetmi. Riadenie servopohonu bude pozostávať z klasickej kaskádnej štruktúry s nepriamym vektorovým riadením s PI regulátormi prúdu (v osi d a q), PI alebo PDF regulátorom otáčok a P regulátorom polohy.

Veľmi dôležitým faktorom sa v tomto prípade stáva umiestnenie snímača polohy. Najjednoduchšou možnosťou je umiestnenie ako súčasť motora. Ako to už býva,

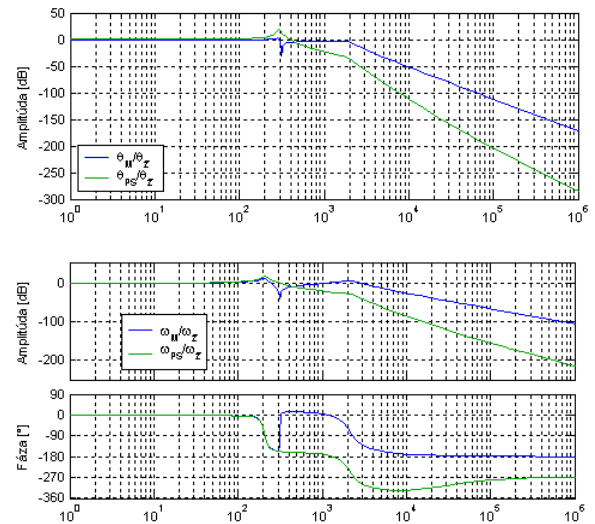
s najjednoduchšou možnosťou prichádzajú aj najväčšie komplikácie. V tomto prípade to je hlavne chyba spôsobená nerovnakými polohami (rýchlosťami) motora a záťaže vplyvom vôľ, trenia ako aj pružného spojenia. Druhou možnosťou je umiestnenie snímača na strane záťaže. Táto alternatíva neguje trvalú chybu spôsobenú vôľami v prevode, ale na druhej strane nie je vždy vhodná pre pohon s pružným spojením. Ideálnym a zároveň najdrahším riešením je použitie oboch možností a negovať tak všetky nevýhody. Avšak vzhľadom na cenu sa táto alternatíva využíva len v najnutnejších prípadoch.

Na začiatok budeme vyšetřovať vlastnosti systému z Obr. 6 s hriadeľom umiestneným na motore a s jednoduchým pružným spojením. Pri známej štruktúre bude vlastnosti systému ovplyvňovať nastavenie regulátorov a samozrejme mechanické parametre. Tie prvé môžeme ovplyvniť podstatne, tie druhé len v úzkych medziach. Je možné využiť množstvo metód nastavenia regulátorov a prispôbiť vlastnosti potrebám aplikácie. Na druhej strane výraznejší zásah do hodnôt momentu zotrvačnosti asi neprichádza v úvahu. Tuhosť spojenia ovplyvníme len výberom dostupných materiálov, zmenou geometrických rozmerov alebo precíznosťou výroby (napr. pri prevodovkách), čo v medziach tolerancie danej aplikácie nemusí znamenať veľký manévrovací priestor. Koeficient tlmenia je možné meniť len obtiažne a to napr. externým tlmičom [1], ktorý však zaberá miesto a zvyšuje cenu, čo nemusí byť akceptovateľné. Preto sa budú nasledovné riadky venovať takmer výhradne systémom, ktorých mechanické parametre sú dané a vlastnosti systému sa budú meniť zásahom do riadiacej štruktúry alebo zmenou parametrov regulačného obvodu.



Obr. 6: Principiálna bloková schéma servopohonu s pružným spojením. Vnútorňá prúdová slučka tu je nahradená proporcionálnym členom s oneskorením prvého rádu (resp. zotrvačným členom prvého rádu), s proporcionálnym zosilnením K_M a oneskorením T_z .

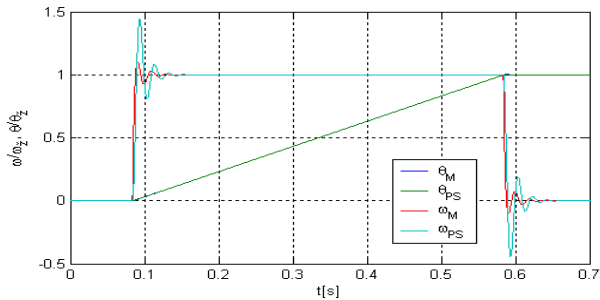
Od servopohonov sa vyžaduje vysoká dynamika a tejto požiadavke treba podriadiť aj nastavenie regulátorov. Rýchle zmeny však narážajú na problémy vyplývajúce s použitím pružného spojenia opísané v predchádzajúcej časti. Napríklad servopohon naladený pre vysoko dynamické aplikácie, ktorý pri tuhom spojení nevykazoval prekmit, môže v prípade pružného spojenia vykazovať nasledovné charakteristiky (Obr. 7):



Obr. 7: LAFCH servopohonu s pružným spojením - $\frac{\theta_M(s)}{\theta_z(s)} + \frac{\theta_{PS}(s)}{\theta_z(s)}$ a $\frac{\omega_M(s)}{\omega_z(s)} + \frac{\omega_{PS}(s)}{\omega_z(s)}$ so snímačom polohy na motore.

Tu je vidieť, že v prípade odozvy motora je charakteristika v okolí frekvencie 300 rad/s poznačená prepacom amplitúdy o cca 25 dB. Veľkosť tohto prepadu je ovplyvnená veľkosťou koeficientu tlmenia. Pri väčšom tlmení by sa dal bez vážnych následkov zanedbať a využiteľné pásmo priepustnosti by siahalo k oveľa vyšším frekvenciám. Pre danú aplikáciu je však rozhodujúcou odozva rýchlosti záťaže (na obrázku zelená). Tu je vidieť, že pri spomínanej frekvencii 300 rad/s, rezonančné prevýšenie 20 dB značne znehodnocuje odozvu, čo v časovej oblasti znamená značný prekmit a u servopohonu neakceptovateľný stav. Tento prekmit je spôsobený integračnou zložkou regulátora rýchlosti. Ak by sa použil regulátor typu P, priebeh by bol bez prevýšenia. Po tejto frekvencii nastáva pokles amplitúdy. Ako vidno, medzným stavom v oboch prípadoch je frekvencia približne 300 rad/s. Pri spätnom pohľade na Obr. 2 zistíme, že nižšou z definovaných frekvencií je antirezonančná. A práve to je tá frekvencia, na ktorú „naráža“ odozva polohy motora (a čiastočne aj záťaže) a ktorá spôsobuje deformáciu frekvenčných charakteristík. Z toho vyplýva, že aj v prípade viachmotového pružného spojenia je najkritickejšie to spojenie, ktoré vykazuje najmenšiu antirezonančnú frekvenciu.

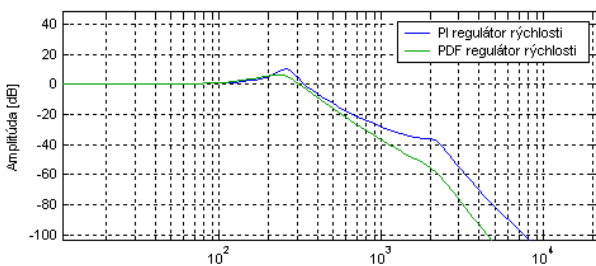
Je zrejme, že podobná situácia nastane aj pri podradenej rýchlostnej slučke. Zmeny tu nastávajúce sú však rýchlejšie, a tak výsledný prekmit bude viditeľnejší. Frekvenčná charakteristika má teda podobný priebeh ako na Obr. 7, polohovanie so skokovou zmenou rýchlosti je vidieť na Obr. 8. V detaile zobrazený priebeh polohy s prekomitom je pre presné aplikácie neprípustný a preto je potrebné vzniknutú situáciu riešiť.



Obr. 8: Priebehy polohy a rýchlosti pri polohovaní servopohonu s pružným spojením s detailom ustálenia.

Najjednoduchším spôsobom ako zredukovať prekmit je zníženie zosilnenia. V tomto konkrétnom prípade postačí trojnásobné zníženie na úplne odstránenie prekmitu (polohy), avšak za cenu zúženia pásma priepustnosti, (ktoré je už aj tak obmedzené antirezonančnou frekvenciou) a zhoršenia odolnosti voči vplyvu porúch. Vďaka neschopnosti regulátora (vplyvom nízkeho zosilnenia) zasiahnuť, začne amplitúda klesať ešte pred alebo pri antirezonančnej frekvencii.

Ak by sme zmenili štruktúru obvodu výmenou PI regulátora rýchlosti napr. za PDF regulátor, znegovali by sme nulu (nulový bod) v čitateli prenosu, čo by v praxi znamenalo odstránenie rezonančného prevýšenia (a prekmitu), ktoré je pri PI regulátore nastavenom napr. metódou symetrického optima prítomné. Žiaľ, v tomto prípade to bude mať len obmedzený efekt, keďže hraničná frekvencia, pri ktorej je tento efekt prítomný je podstatne vyššia ako antirezonančná frekvencia. Odozva bude pomalšia a prekmit sa nepatrne zredukuje. Obrázok 9 len potvrdzuje uvedené skutočnosti. (Efekt výmeny regulátora na PDF bude identický aj v nasledujúcom prípade).

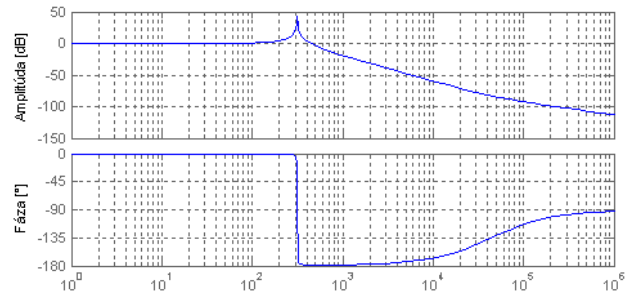


Obr. 9: Porovnanie LAFCH polohových systémov s pružným spojením s PI a PDF regulátorom rýchlosti s rovnakými parametrami.

Ďalším možnosťam redukcie vplyvu pružného spojenia bude ponechaný priestor v samostatnom článku nadväzujúcom na tu spomínanú problematiku.

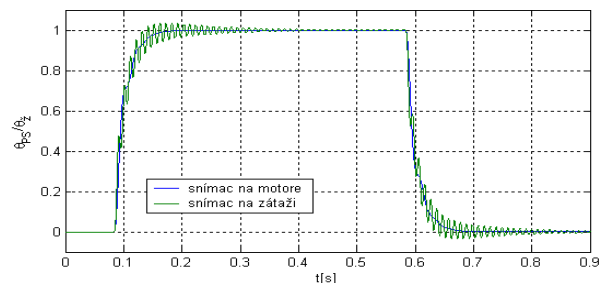
V ďalšej časti popíšeme servopohon s pružným spojením so snímačom polohy umiestnenom na samotnej záťaži. V tomto prípade už pružné spojenie ovplyvňuje stabilitu (väčšie oneskorenie signálu) a má podstatnejší vplyv na odozvu systému. Je zjavné, že aj teraz dôjde medzi motorom a záťažou k narušeniu prenosu signálu,

ako to naznačuje Obr. 10. Ako aj v predchádzajúcom prípade, dôjde k tomuto narušeniu (k rezonančnému prevýšeniu) pri antirezonančnej frekvencii, pričom výška prevýšenia je závislá od pomerného tlmenia.



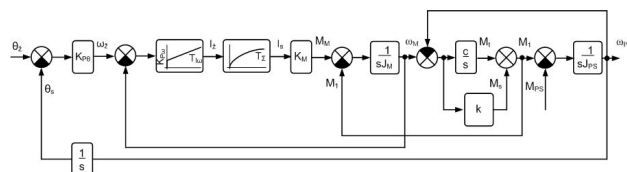
Obr. 10: LAFCH pružného spojenia $\left(\frac{\theta_{PS}(s)}{\theta_M(s)} \right)$.

Keďže sa v tomto prípade pružné spojenie stáva súčasťou spätnoväzobnej slučky, dochádza k výraznému zvýšeniu rádu systému čo má samozrejme vplyv aj na odozvu systému. Stabilita sa zhorší, čo dokumentuje aj Obr. 11, kde je vidieť porovnanie polohovania systémov so snímačom na motore a záťaži pri tých istých parametroch systému. Na druhej strane použitie samostatného snímača na záťaži má opodstatnenie v prípadoch nevýraznej antirezonančnej frekvencie, napr. pri lineárnych pohonov, ako je dokázané v [2].



Obr. 11: Porovnanie nábehu polohy pre servopohon s pružným spojením so snímačom polohy umiestneným na motore a na pracovnom stroji.

Na záver tejto časti bude spomenutý systém, ktorý kombinuje systém so snímačom na motore a na záťaži. Spätnú väzbu od snímača na motore využíva rýchlostná slučka a od snímača na pracovnom stroji polohová slučka (Obr. 12).



Obr. 12: Bloková schéma trojhmotového systému.

Tento systém využíva viacero svetových výrobcov servopohonov. Hlavným argumentom je, že „rýchla“ rýchlostná slučka by mala pohotovo reagovať na zmeny, čo jej umožní snímač na motore (zo snímača na záťaži by mohla informácia doraziť s určitým oneskorením vplyvom vólí - mŕtvych dôb v prevode alebo vplyvom obmedzenej tuhosti spojenia). Umiestnenie snímača pre rýchlostnú slučku na pracovnom stroji znamená zhoršenie fázovej a amplitúdovej bezpečnosti. Polohová slučka musí zabezpečiť presnosť a má za úlohu práve tieto nedokonalosti zachytiť a korigovať. Je tým zároveň zabezpečená aj stabilita, ktorú môžu tieto nežiaduce vplyvy ohroziť. Keďže tento prístup je primárne určený pre vysporiadanie sa s javmi typu vôle v prevodoch, jeho podrobnejší rozbor ponecháme na iné publikácie. Ďalšie využitie dvojice snímačov je v štruktúrach stavového riadenia, buď s plnou stavovou spätnou väzbou [3] alebo sa v rámci stavovej štruktúry rýchlostnej slučky (v algoritme kombinujúcom kaskádne a stavové riadenie) [4] zaväzuje rozdiel polôh motora a záťaže späť do rýchlostnej slučky. V prípade problematickeho merania jednej z polôh, je možné k jej získaniu použiť stavový pozorovateľ [5]. Ako je známe, stavové riadenie na jednej strane umožňuje ľubovoľné umiestnenie pólov a tým elimináciu nepriaznivých dôsledkov pružného spojenia, na druhej strane však je nutné systém naladiť v jednom kroku, čo pri prípadnom chybnom naladení môže znamenať zničenie celého zariadenia (napr. v prípade obrábacích strojov).

4. Záver

Článok sa venuje hlavne teoretickému rozboru a analýze problematiky pružnej väzby u servopohonov. Cieľom článku je poskytnúť nutný vedomostný základ pre pochopenie problematiky eliminácie vplyvov pružného spojenia, ktorá bude podrobnejšie rozoberaná v pokračovaní článku v jednom z najbližších čísel.

PodĎakovanie

Autori by týmto chceli vyjadriť vďaku za podporu projektu „Centrum excelentnosti výkonových elektronických

systémov a materiálov pre ich komponenty“. Operačného programu VaV, projekt je financovaný zo zdrojov ES, ERDF - Európsky fond regionálneho rozvoja.

Použitá literatúra

- [1] *Csaengineering* [online]. 2010. Moog CSA Engineering. Available at WWW: <<http://www.csaengineering.com/>>.
- [2] Brandenburg, G.; Bruckl, S.; Dormann, J.; Heinzl, J.; Schmidt, C. Comparative Investigation of Rotary and Linear Motor Feed Drive Systems for High Precision Machine Tools. *Advanced Motion Control*, 2000. In: *Proceeding of the 6th International Workshop*, pp. 384-389, Apr. 2000. ISBN 0-7803-5976-3.
- [3] Schaefer, U.; Brandenburg, G. Model Reference Position Control of an Elastic Two-Mass System With Compensation of Coulomb Friction. In: *Proceeding of the American Control Conference*, San Francisco, 1993. pp. 1937-1941. ISBN 0-7803-0860-3.
- [4] Bühler, H. *Kaskaden - zustandsregelung*. *Automatisierungstechnik* 33, 1985, no. 2, 52-61. ISSN 0340-434X.
- [5] Zboray, L.; Ďurovský, F.; Tomko, J. *Regulované pohony*, Viena Košice, 2000, ISBN 80-88922-13-5.

O autoroch

Michal MALEK sa narodil v roku 1977 v Myjave. Študoval na Žilinskej univerzite elektrickú trakciu (Ing. v roku 2000) a elektrické pohony (PhD. v roku 2009). Pracoval ako technolog výroby koľajových vozidiel, programátor PLC pre priemyselné aplikácie a ako vysokoškolský učiteľ. Venoval sa výskumu priameho riadenia momentu a toku SMPM.

Pavol MAKYŠ sa narodil v roku 1980 v Bánovciach nad Bebravou. Študoval na Žilinskej univerzite v Žiline odbor elektrické pohony ukončený titulom Ing. v roku 2003. V roku 2006 získal titul PhD. Od ukončenia štúdia pracuje na Žilinskej univerzite ako výskumný a pedagogický pracovník, zo zameraním na oblasť elektrických pohonov, hlavne aplikáciou mikropočítačov a digitálnych signálových procesorov.

Marek ŠTULRAJTER sa narodil v roku 1980 v Břežně. Študoval na Žilinskej univerzite v Žiline odbor elektrické pohony ukončený titulom Ing. v roku 2003. V roku 2006 získal titul PhD. Hlavné aktivity výskumu sú zamerané na elektrické pohony, ich riadiace štruktúry, riadenie nových typov elektrických pohonov a pod.