

Jednoduchý regulátor polohy s prepínaním nelineárnych funkcií pre polohovanie konca pásu z odvíjačky

A Simple Position Controller with Switching of Non-linear Functions for Positioning of the Web End on Uncoiler

Daniel Magura¹, Viliam Fedák², Karol Kyslan³

¹daniel.magura@gmail.com, ²viliam.fedak@tuke.sk, ³karol.kyslan@tuke.sk

^{1,2,3}Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská republika

Abstrakt—Princíp navrhovaného polohového regulátora spočíva v prepínaní vhodne zvolených nelineárnych algebraických funkcií, čím regulovaný systém získava na robustnosti. V prípade pohonárskych systémov hlavný vplyv na dynamiku systému má premenlivý moment zotrvačnosti pracovného mechanizmu. Predložený návrh regulátora polohy vychádza z praktických skúseností pri riadení polohy vozíkov, nožnic alebo iných mechanizmov, ale aj konca pásu na vstupe kontinuálnej upravárenskej linky. V tomto prípade sa požaduje prepínanie riadiaceho systému z rýchlostne regulovaného na polohovo regulovaný. Navrhnutý regulátor umožňuje jednoduché prepínanie, pričom navyše nie je potrebné riešiť počiatočné podmienky regulátora pri zmene režimu riadenia. Po objasnení vplyvu jednotlivých parametrov na dynamiku systému je v príspevku uvedené porovnanie vlastností navrhovaného regulátora polohy s klasickým riešením polohovej regulácie v kaskádnej štruktúre. Simulačné výsledky sú overené implementáciou regulátora v reálnej linke – na odvíjačke kovových pásov.

KLúčové slová—nelineárny regulátor polohy, regulácia polohy konca pásu, regulácia navíjačky

Abstract—The designed position controller is based on switching between suitably selected algebraic nonlinear functions. The control system with the implemented position controller is robust enough against the changes of plant parameters. In case of drive systems the variable moment of inertia of the load mechanism considerably influences the drive dynamics. Design of the position controller is based on practical experiences got from positioning of trolleys, shears and other mechanisms but also from positioning of a metallic web in the input section of a continuous web processing line. From technological point of view, the control system requires switching from speed controlled mode to the position one. The proposed controller makes it easy to switch among both control modes, while, moreover, there is not necessary to solve the controller initial conditions. In the paper, after explaining the impact of parameters of non-linear controller functions on system dynamics, there are compared properties of the proposed position controller solution with a classic position control in cascade structures. Simulation results are verified by implementing the controller on a real system – in the control circuit of a metal strip uncoiler.

Keywords—nonlinear position controller, web end position control, coiler control

I. ÚVOD

Regulácia polohy (uhla natočenia) sa využíva v mnohých výrobných procesoch. Ak elektrický pohon poháňa zariadenie s premenlivým momentom zotrvačnosti, pri aplikácii klasických metód návrhu lineárnych regulátorov pri meniacich sa parametroch systému dostávame týmto pri rýchlostnej a následne i pri polohovej regulácii pohonu rôzne časové odozvy.

Príkladom zariadenia s veľkou zmenou momentu zotrvačnosti je regulácia odvíjacích zariadení, kde moment zotrvačnosti zvitku narastá so štvrtou mocninou jeho priemeru. Takisto zaujímavý príklad je polohovanie vozíka na transport zvitkov, pričom zvitky môžu mať rôznu váhu, čím sa zvyšuje moment zotrvačnosti, no požiadavka na presnosť polohovania je stále rovnaká.

Ďalšou špecialitou riadenia odvíjačky je nutnosť prepínania regulácie jej pohonu z rýchlostného režimu do polohového, pričom toto prepínanie módu riadenia nesmie spôsobovať prídavné rázy momentu. Pri odvíjačkách ide napr. o riadenie polohy konca pásu pri spájaní pásov (t.j. pri spájaní začiatku jedného pásu s koncom predchádzajúceho), alebo pri zavádzaní pásu do linky [1]. Pri použití klasického polohového a rýchlostného regulátora typu PI a potrebe prepínania režimu riadenia z polohového na rýchlostný a naopak, sa pri prepínaní môžu vyskytnúť momentové rázy vyplývajúce z potreby nulovania integračnej zložky regulátora, jej zapnutia a vypnutia vo vhodnom čase.

V softvérových knižniciach priemyselných riadiacich systémoch sa nachádzajú rôzne typy regulátorov, ktorých implementácia funguje na princípe drag and drop, kde blok regulátora stačí vložiť do riadiaceho programu a nastaviť jeho parametre. Riadiaci program potom pritom automaticky identifikuje aktuálne parametre motora a na ich základe automaticky nastaví parametre regulátorov. V prípade polohových systémov s veľkým rozsahom premenlivého parametra (momentu zotrvačnosti) však uvedené riešenie nedáva uspokojiteľnú dynamiku systému v celom rozsahu zmeny parametra, a preto na kompenzáciu premenlivých parametrov sa často používajú špeciálne a zložité zapojenia.

Existuje viacero riešení uvedeného problému, ktoré sú založené na aplikácii rôznych metód riadenia, od riešenia v stavovom priestore [2], cez metódu premenlivých štruktúr [3] až po aplikácie metód umelej inteligencie – napr. genetických algoritmov [4]. Všetky tieto riešenia sú však príliš sofistikované, a pre praktické použitie veľmi zložité.

Hľadali sme preto riešenie, ktoré by vyhovovalo svojou jednoduchosťou. Navrhnuté riešenie predstavuje nelineárny regulátor bez integračnej a derivačnej zložky s premenlivým zosilnením na základe veľkosti vstupného signálu. Pri jeho použití sa rád systému nezvyšuje, ale všetky vyššie požadované vlastnosti budú zabezpečené. Regulátor umožňuje jednoducho a bez problémov prepínať medzi dvomi módmi riadenia pohonu, t.j. medzi rýchlostnou a polohovou reguláciou, čo je dôležité u navíjačiek pri zavádzaní a spájaní pásov. Jeho teoretické odvodenie a simulačné výsledky pre polohovanie pásu na výstupe navíjačky boli verifikované v praxi.

II. POPIS POLOHOVÉHO SYSTÉMU S NELINEÁRNYM REGULÁTOROM

Vstupný úsek kontinuálnej linky pozostáva z odvíjačky, nožnice, spájacieho zariadenia a vstupného zásobníka pásu (Obr. 1). Pri spájaní pásov je potrebné zabezpečiť polohovú reguláciu pásu a v normálnej prevádzke funguje ťahová regulácia, t.j. regulácia na konštantný ťah. Pri riešení vychádzame z kaskádnej štruktúry pohonu s prúdovou, rýchlostnou a polohovou regulačnou slučkou, ktorej štruktúrálna schéma je uvedená na Obr. 3. Na vstupe sa nachádza nelineárny regulátor polohy, ktorého výstup označíme Y . Jeho činnosť je popísaná dvoma nelineárnymi matematickými funkciami Y_1 a Y_2 :

$$Y_1 = \sqrt{a_{cc} f_k (U_w - U_x)} \quad (1)$$

$$Y_2 = (\sqrt{p_{ob} f_k K_p}) ((U_w - U_x) / p_{ob}) \quad (2)$$

kde:

U_w – požadovaná hodnota polohy pásu

U_x – skutočná hodnota polohy pásu

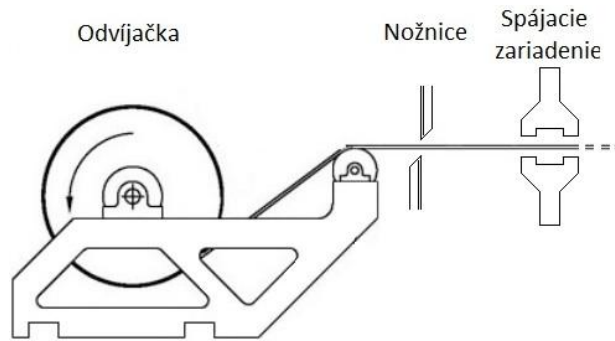
a_{cc} – zrýchlenie regulátora, ktoré ovplyvňuje priebeh funkcie Y_1

f_k – faktor ovplyvňujúci priebeh oboch funkcií Y_1, Y_2

p_{ob} – oblasť dopolohovania, v tejto oblasti sa prepína funkcia Y_1 na priebeh Y_2

K_p – zosilnenie regulátora, dobeh pohonu (tzv. dopolohovanie pohonu), ktoré ovplyvňuje priebeh funkcie Y_2

Podmienkou správneho návrhu zosilnenia nelineárneho regulátora polohy je, aby sa funkcie Y_1 a Y_2 vhodne pretínali, pričom vzájomne majú byť umiestnené tak, aby priebeh výstupu regulátora Y pri monotónnom náraste al. poklese rozdielu ($U_w - U_x$)



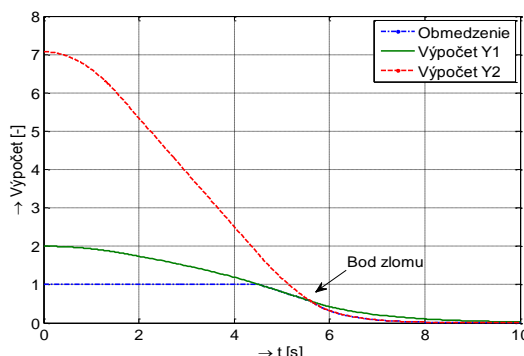
Obr. 1. Odvíjačka so spájacím zariadením na vstupe kontinuálnej linky pre spracovanie pásov

tvoril relatívne hladkú funkciu (presnejšie – aby skok prvej derivácie pri prechode zástupného bodu z jednej funkcie na druhú v oblasti ich pretínania bol čo najmenší).

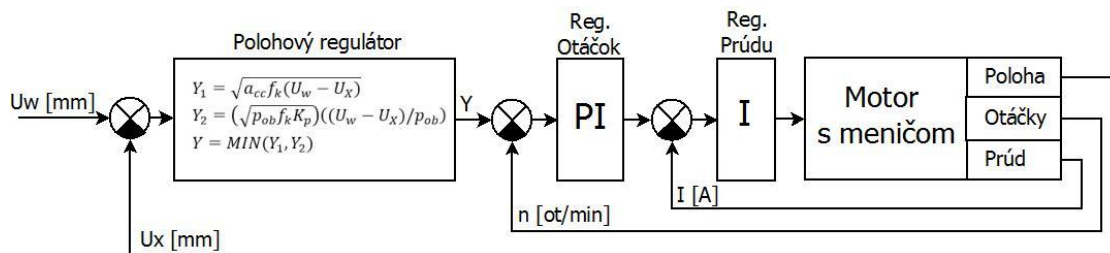
Konštanta a_{cc} ovplyvňuje priebeh veličiny Y_1 , t.j. priebeh vykreslený plnou (zelenou) čiarou, ktorý zabezpečuje hrubé priblíženie sa k požadovanej vzdialenosti. Konštanta K_p ovplyvňuje Y_2 , t.j. priebeh vykreslený bodkovanou (červenou) čiarou, ktorý zabezpečuje jemné dopolohovanie požadovanej vzdialenosti. Konštanta p_{ob} predstavuje hodnotu polohy, keď dochádza k prepínaniu medzi funkciami Y_1 a Y_2 . Výstup regulátora predstavuje minimálnu hodnotu týchto dvoch funkcií:

$$Y = \text{MIN}(Y_1, Y_2) \quad (3)$$

Pri veľkej regulačnej odchýlke ($U_w - U_x$) je teda zosilnenie regulátora väčšie a pri približovaní sa k cieľu (zmenšovanie odchýlky) sa zosilnenie plynulo zmenšuje. Priebehy funkcií podľa rovníc (1) a (2) v závislosti od zmeny rozdielu žiadanej a skutočnej hodnoty polohy ($U_w - U_x$) s parametrami nastavenými nasledovne: $K_p = 4$; $a_{cc} = 8$; $f_k = 0,1$; $p_{ob} = 0,2$ sú uvedené na Obr. 2.



Obr. 2. Priebeh výpočtov nelineárnych funkcií Y_1 a Y_2 počas režimu polohovania pásu



Obr. 3. Bloková schéma polohovej regulácie pohonu s kaskádou štruktúrou regulátorov

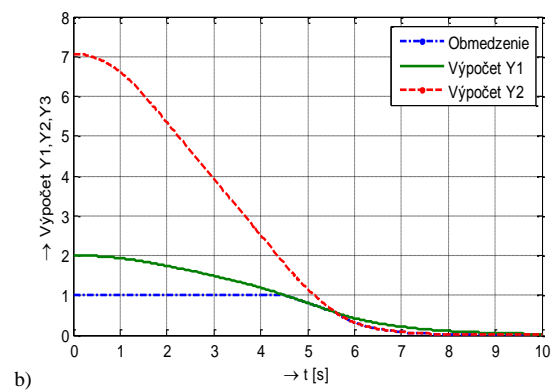
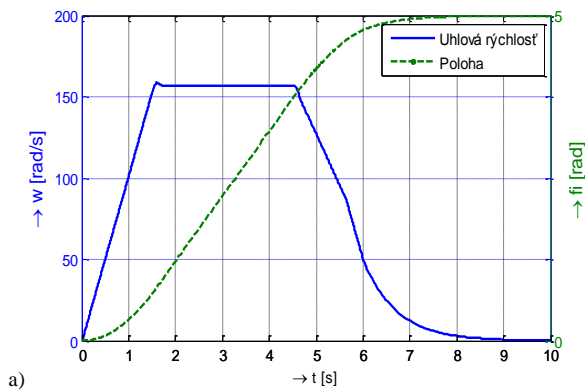
III. NASTAVENIE PARAMETROV NELINEÁRNEHO REGULÁTORA

Vlastnosti regulátora a tým aj dynamických pochodov v regulačnom obvode závisia od voľby parametrov funkcií a_{cc} , f_k , p_{ob} , K_p v rovniciach (1) a (2). Nasledujúce priebehy (Obr. 4 - 8) zo simulácie polohového systému dokumentujú, ako reaguje systém na zmenu parametrov K_p , a_{cc} , pri rovnakej požadovanej hodnote polohy, momentu zotrvačnosti a pri rovnakých f_k a p_{ob} .

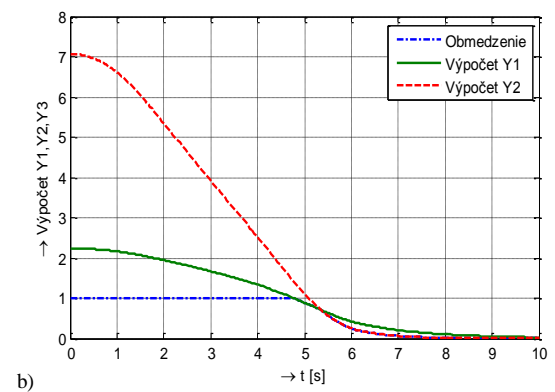
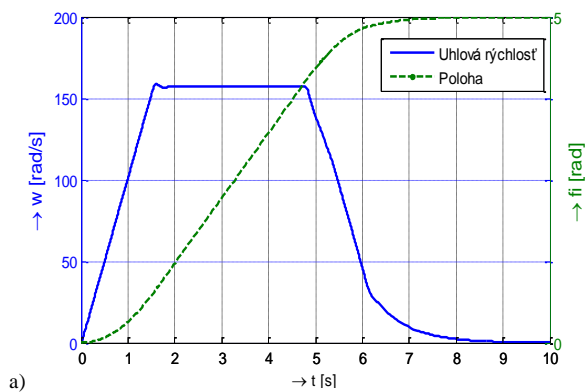
Simulovali sme polohovanie mechanizmu na rovnakú požadovanú hodnotu pri rôznych K_p ; a_{cc} a zvyšné parametre sme ponechali na konštantnej hodnote: $f_k = 0,1$; $p_{ob} = 0,2$; $U_w = 5$ rad; $J_c = 6 \text{ kg.m}^2$. Na priebehoch uhlovej rýchlosti (Obr. 4 - 6) vidno, aký vplyv má umiestnenie priesečníka funkcií Y_1 a Y_2 na priebeh rýchlosti (čo sa prejavuje zákmitom na časovom priebe-

hu pri poklese rýchlosti). Priebehy na Obr. 4 považujeme za základné nastavenie regulátora, kde tzv. dopolohovanie do požadovanej polohy trvá cca 4 sek. Na priebehoch na Obr. 5 dlhšie polohujeme s nominálnymi otáčkami, t. z. krivka Y_1 nadobúda vyššie hodnoty a k prepnutiu na krivku Y_2 dochádza neskôr. Doplohovanie, t.j. krivka Y_2 , je rovnaká. Na Obr. 7 je celkový čas polohovania najkratší. Doplohovanie (krivka Y_2) nadobúda vyššie hodnoty a k prepnutiu z krivky Y_1 na Y_2 dochádza neskôr.

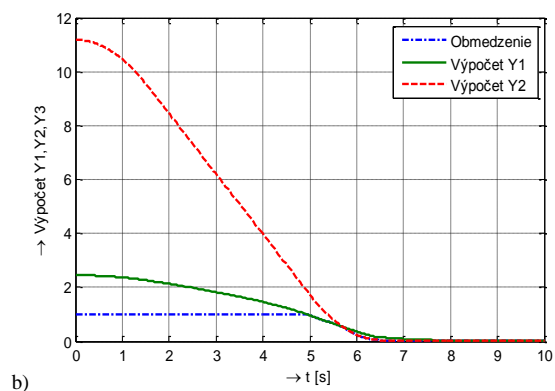
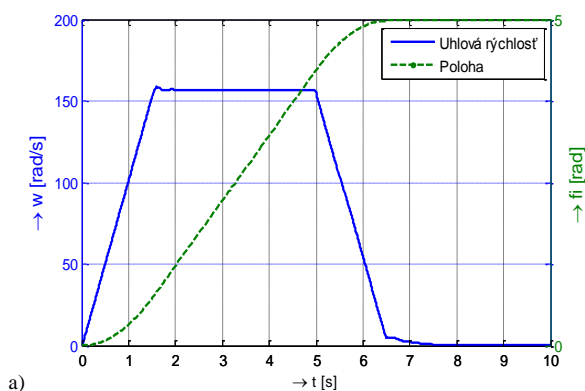
Základný rozdiel v polohovaní na Obr. 4 a 6, je v tom, že na Obr. 4 regulátor polohy pred cieľom spomaľuje pomalšie a doplohuje pomalšie ako na Obr. 6. Systém s regulátorom nastaveným podľa parametrov uvedených pod Obr. 6 sa dostane do cieľa rýchlejšie.



Obr. 4. Priebeh rýchlosti a polohy (a) výstup z regulátora polohy (b) so znázornením priebehu funkcií Y_1 a Y_2 pri parametroch kriviek $K_p = 4$; $acc = 8$; $f_k = 0,1$; $p_{ob} = 0,2$



Obr. 5. Priebeh rýchlosti a polohy (a) výstup z regulátora polohy (b) so znázornením priebehu funkcií Y_1 a Y_2 pri parametroch kriviek $K_p = 4$; $acc = 10$; $f_k = 0,1$; $p_{ob} = 0,2$



Obr. 6. Priebeh rýchlosti a polohy (a) výstup z regulátora polohy (b) so znázornením priebehu funkcií Y_1 a Y_2 pri parametroch kriviek $K_p = 10$; $acc = 12$; $f_k = 0,1$; $p_{ob} = 0,2$

Vhodné parametre sa najvhodnejšie nastavujú experimentovaním na mieste pri oživovaní stroja, kde pri rôznych momentoch zotrvačnosti a pri rôznych rýchlostiach skúšame ako sa celá sústava správa. Z vlastností regulátora vyplýva, že poloha regulátora nepresiahne požadovanú polohu. Avšak výnimkou je prípad, ak pohon má malý brzdný moment.

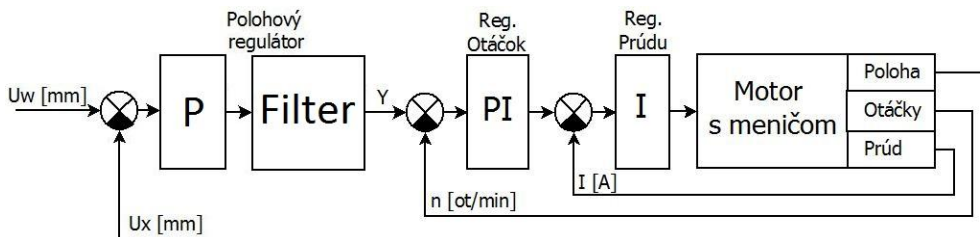
IV. POROVNANIE NELINEÁRNEHO POLOHOVÉHO REGULÁTORA S KLASICKÝM NÁVRHOM

Nelineárny regulátor polohy s prepínaním funkcií porovnáme s regulátorom polohy navrhnutým klasickými metódami podľa [5, 6]. Vychádzame z kaskádnej štruktúry riadenia pohonu na Obr. 7. Regulátor prúdu má integračný charakter navrhnutý podľa KOM - kritérium optimálneho modulu. Regulátor otáčok je navrhnutý podľa KSO - kritérium symetrického optima. Celý regulačný obvod je doplnený o obmedzenie nominálneho prúdu na hodnotu $I_{amax} = 600$ A.

Na základe parametrov motora $P_N = 565$ kW, $U_{aN} = 400$ V, $I_{aN} = 1420$ A, $T_a = 0,0133$ s, $K_a = 121,06 \Omega^{-1}$, $c\Phi = 2,72$ Vs, $J = 5,2$ kgm² boli pomocou štandardných výpočtových postupov [5], [6] navrhnuté regulátory podľa KOM a KSO. Vypočítané parametre regulátorov sú uvedené v Tabuľke I. Odozva prúdu a uhlovej rýchlosti rýchlostne regulovaného pohonu s vypočítanými parametrami regulátora prúdu a rýchlosti polohy pri rozbehu na menovitú uhlovú rýchlosť je uvedená na Obr. 8.

TABUĽKA I PARAMETRE REGULÁTOROV

Regulátor prúdu typu I (KOM)	Regulátor otáčok typu PI (KSO)		Regulátor polohy s filtrom	
	P zložka	I zložka	P zložka	Filter
0,3225	30,733	0,0017	1,2	1/(1+6T _s)s



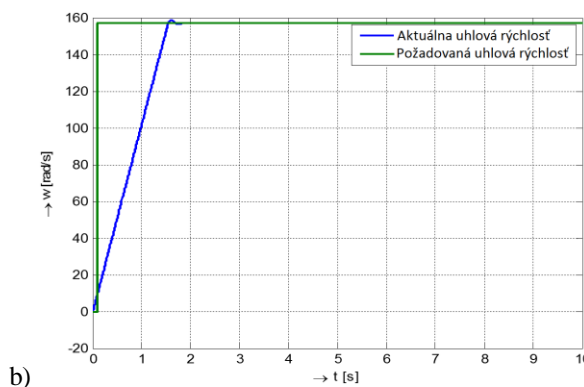
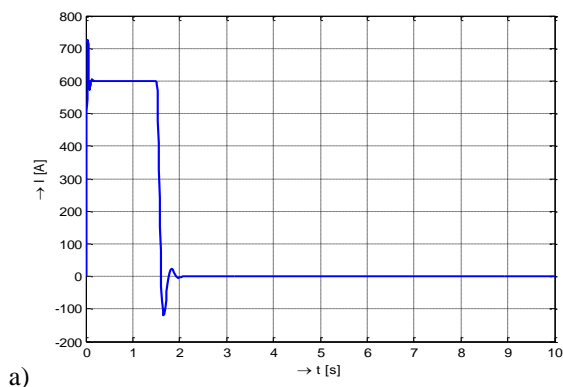
Obr. 7. Štandardný regulátor polohy s filtrom v kaskádnej štruktúre

Aby sme sa čo najviac priblížili reálnemu stavu, v regulačnej štruktúre je zaradené tiež prúdové obmedzenie. Podľa regulačných štruktúr na Obr. 2 a Obr. 7 simulujeme polohovanie na rovnakú požadovanú hodnotu polohy s rozdielnym momentom zotrvačnosti (moment zotrvačnosti bol nastavený v simulácii na hodnotu $J = J_c$, alebo pre porovnanie $J = 2J_c$, pričom $J_c = 6$ kg.m²) pre štandardný regulátor polohy a pre navrhovaný nelineárny regulátor s prepínaním funkčných závislostí.

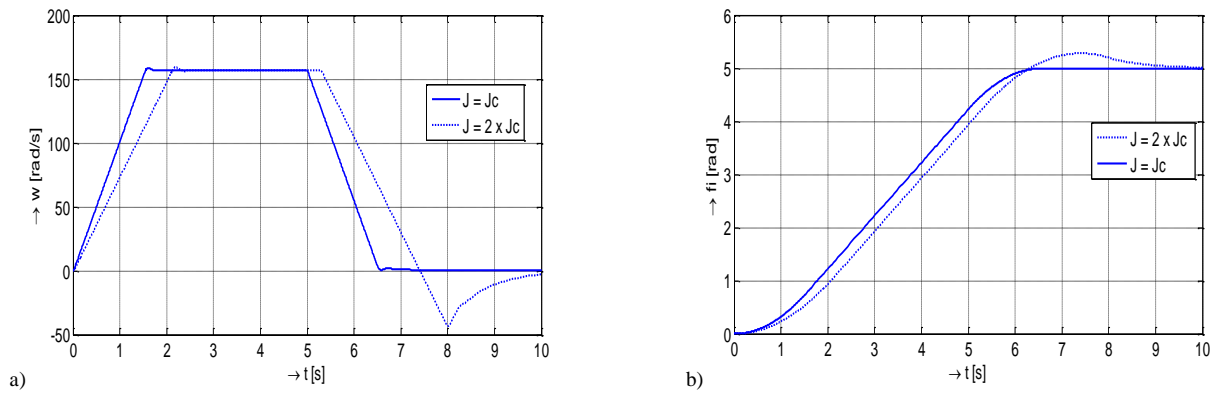
Z porovnania priebehov na Obr. 9 a Obr. 10 je zrejmé, že pri použití nelineárneho regulátora polohy s prepínaním funkcií skutočná hodnota polohy neprekmitne ani pri dvojnásobnom zvýšení momentu zotrvačnosti. Je to zapríčinené tým, že nastavením parametrov funkcie Y_2 vieme nastaviť, ako sa bude regulátor správať pri dobiehaní na požadovanú hodnotu.

V. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY A VYUŽITIE NAVRHNUTÉHO REGULÁTORA

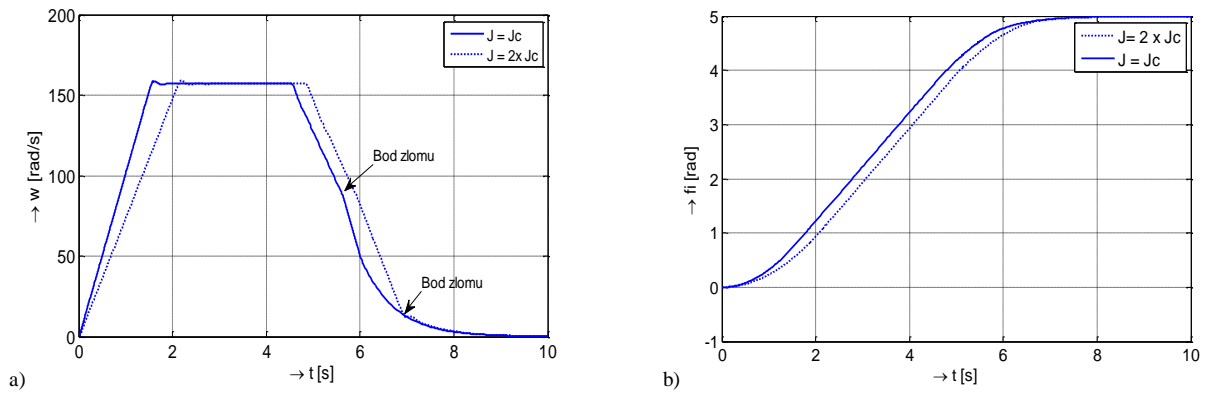
Nelineárny regulátor polohy s prepínaním funkcií bol úspešne použitý v praxi na pohone odvíjačky pásov kontinuálnej upravárenskej linky [7, 8], kde sa nastavuje poloha konca pásu pri spájaní pásov. Na Obr. 11 je uvedený oscilografický záznam polohovania pásu odvíjačky, z polohy 1500 mm do požadovanej polohy 5000 mm. Na priebehoch vidno, ako sa mení rýchlosť pohonu pri dopolohovaní na požadovanú hodnotu. Červeným obdĺžnikom na priebehu rýchlosti je vyznačený okamih, kedy dochádza k prepínaniu z výpočtu krivky Y_1 na výpočet Y_2 . Tesne pred cieľom sa rýchlosť motora, ktorá klesala po priamke, zmení a klesá pozdĺž inverznej odmocnínovej funkcie. Ako je vidieť krivka po ktorej klesá rýchlosť nie je strmá, (zodpovedá funkcii Y_1 pre hodnotu parameter $a_{cc} = 2$). Dopolohovanie pred cieľom ovplyvňuje funkcia Y_2 . Na priebehu vidno, že dopolohovanie je rýchle a strmé (táto krivka platí pre hodnotu parameter $K_p = 10$).



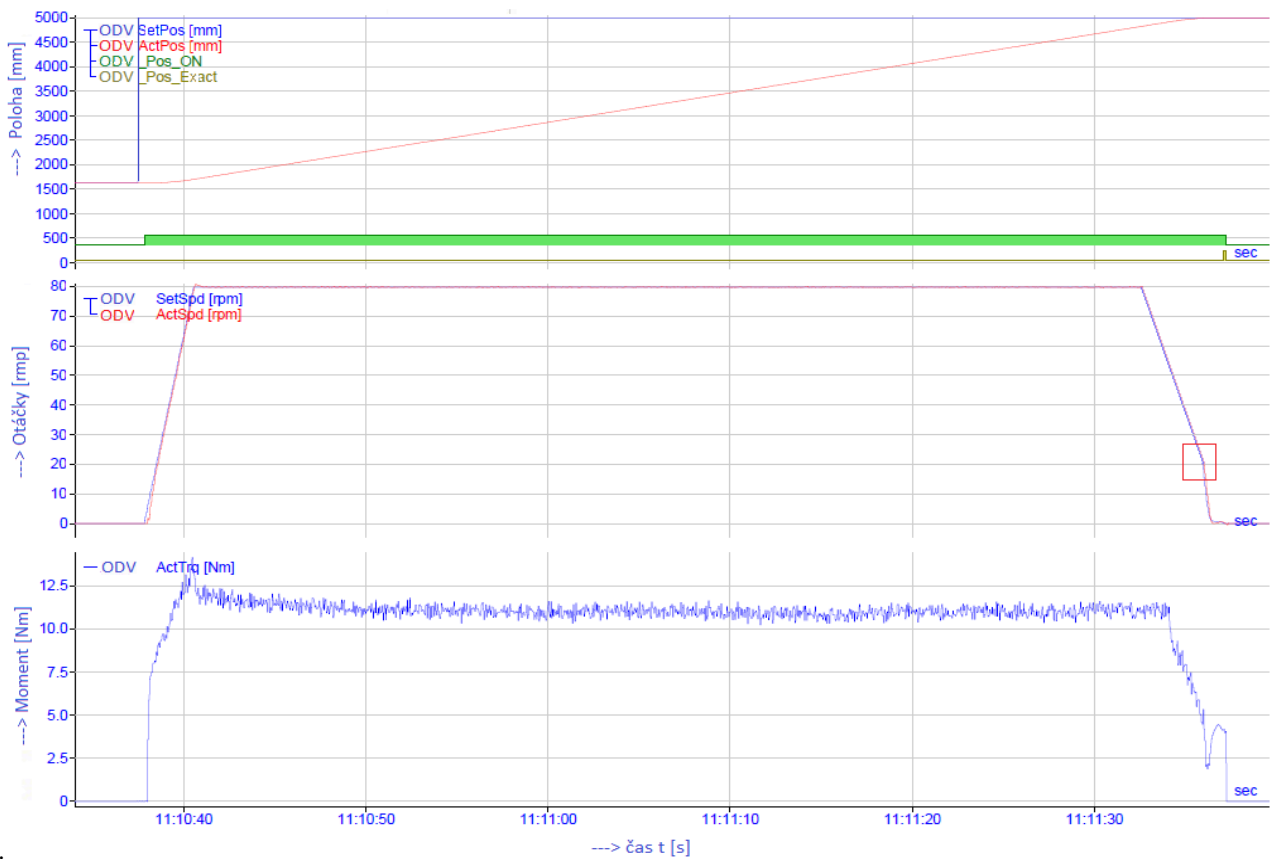
Časová odozva rýchlostne regulovaného pohonu s regulátormi nastavenými podľa kritérií KOM a KSO a so zaradeným obmedzením prúdu: a) odozva prúdu motora, b) odozva uhlovej rýchlosti



Obr. 8. Priebieh rýchlosti a polohy pri polohovaní konca pásu pri rôznych momentoch zotrvačnosti pre P regulátor a s filtrom rýchlosti



Obr. 9. Priebieh rýchlosti pri polohovaní konca pásu pri rôznych momentoch zotrvačnosti pre navrhnutý nelineárny regulátor



Obr. 10. Priebiehy veličín pohonu odvíjačky pri polohovaní konca pásu z odvíjačky, získané meraním na reálnej kontinuálnej linke s navrhnutým nelineárnym regulátorom polohy pásu

ZÁVER

Nelineárny regulátor polohy, pracujúci na princípe prepína-
nia dvoch nelineárnych matematických funkcií, je vhodný pre
polohovanie jednoduchých zariadení, kde sa vyskytuje potreba
regulovať na konštantnú polohu pri premenlivom momente
zotrvačnosti mechanizmu. Regulátor je dostatočne robustný
voči zmene momentu zotrvačnosti zariadenia – časová odozva
polohy prebieha po približne rovnakej trajektórii, bez ohľadu
na zmenený moment zotrvačnosti.

Nastavovanie premenlivých parametrov nelineárnych funk-
cií tvoriacich regulátor možno po určení vhodných nelineár-
nych funkcií vykonať nielen pomocou simulácie, ale aj skus-
mo, priamo pri uvádzaní pohonu do chodu, kedy môžeme
nastaviť žiadanú pevnú hodnotu polohy. Táto žiadaná hodnota
sa počas polohovania nemôže meniť, to znamená, že nie je
vhodný napr. pre robotické systémy.

Regulátor je zaujímavý jednoduchou realizáciou. Je vhodný
pre vozíky ktoré slúžia pre transport zvitkov (hmotnosť jednot-
livých zvitkov nie je konštantná), polohovanie konca pásu
odvíjačky/navíjačky (premenlivá hmotnosť zvitku), ale aj pre
jednoduché aplikácie s konštantným momentom zotrvačnosti,
ako je napr. polohovanie nožov rezačky okrajov pásu.

Navrhovaný nelineárny regulátor polohy je vhodný pred-
všetkým pre jednoduché polohovacie systémy, kde sa navyše
vyskytuje potreba prepínania medzi rýchlostným
a polohovacím riadením. Je to napríklad v prípade riadenia
pohonu odvíjačky na vstupe kontinuálnej upravárenskej linky,
kde sa presná poloha pásu vyžaduje pri spájaní jednotlivých
pásov. Regulátor bol úspešne realizovaný a je používaný
v praxi práve na takýchto kontinuálnych linkách.

PODAKOVANIE

Článok vznikol s finančnou podporou projektu VEGA No
1/0464/15 “Výskum nových princípov a metód pre návrh elek-
trotechnických systémov”.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] R. V Singh, Aluminium Rolling: Processes, Principles and Application, Tata McGraw Hills, 2011.
- [2] Remn-Min Guo, M. V. Loen, “Design and Simulation of an Entry Edge Guide Control System for Tandem Cold Mills“. *J. Manuf. Sci. Eng* ročník 121, číslo 1, strany 69-75, Feb. 1999.
- [3] W. Jinag, C. Dong, D. Chen, H. Wang, “Application of a Variable Structure Approach on Step-by-step Control System for Coiler of Hot Rolling Mill“, *Machine Tool & Hydraulics*, číslo 1, 2008
- [4] K. H. Choi, T. T. Thanh, B. S. Yang, D. S. Kim, “A control system design of automatically tuning controller for roll to roll web system using the modified genetic algorithm“, ASCC 2009 – 7th Asian Control Conference, str. 1691 – 1696, 27-29 Aug. 2009, Hong Kong.
- [5] L. Zboray, F. Ďurovský, J. Tomko, “2.3.3 Algebraické kritériá“, *Regulované pohony*, Viena Košice, 24-30, 2000.
- [6] Experiment s polohovo regulovaným pohonom. Virtuálne laboratórium riadenia mechatronických systémov. KEMPI, FEI TU v Košiciach. http://andromeda.feituke.sk/navrhy_reg/_Index.htm.

- [7] D. Magura, V. Fedák, “Modeling of Continuous Processing Line with Nonlinear Model of the Strip and Control of Material Elongation“, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Vol. (2015), s. 359-363. ISBN 978-1-4673-7376-0.
- [8] V. Fedák, Modelovanie elektromechanických sústav. Technická univerzita v Košiciach, 2015, 243 s. ISBN 978-80-553-2111-0.



Daniel Magura ukončil inžinierske štúdium na Technickej univerzite v Košiciach v roku 2012 s vyznamenaním, v študijnom odbore Mechatronika. Od ukončenia štúdia pracuje ako PLC programátor so zameraním na pohony v nemeckej firme BWG. Firma sa zaoberá návrhom kontinuálnych výrobných liniek na spracovanie úpravu plechu. Počas zamestnania získal praktické skúsenosti pri odlaďovaní a oživovaní kontinuálnych liniek venoval sa najmä regulácii ťahu, pomerného predĺženia, synchronizácii polohy na základe polohy pásu pre špeciálne stroje. Popri zamestnaní študuje doktorandské štúdium na Technickej univerzite v Košiciach. Svoje publikácie venoval najmä modelovaniu kontinuálnych liniek, regulácii procesných veličín na kontinuálnej linke a rozdeleniu ťahu medzi ťažné valce a riadeniu bubnových nožnic.



Viliam Fedák ukončil vysokoškolské štúdium na Vysoké škole technickej v Košiciach s vyznamenaním v odbore Technická kybernetika v r. 1972. Odvtedy pracuje na Katedre elektrických pohonov (v súčasnosti pod názvom Katedra elektrotechniky a informatiky) na tej istej univerzite, vo funkcii docenta. Oblasťou jeho výskumu sú elektrické pohony a ich riadenie, predovšetkým mnohomotorových pohonov kontinuálnych liniek i elektromechanických systémov vo všeobecnosti. Zaoberá sa tiež pokročilými metódami modelovania, identifikácie a riadenia mechatronických systémov. Jeho publikačná činnosť zahŕňa takmer 200 príspevkov prednesených na vedeckých konferenciách a publikovaných v časopisoch.



Karol Kyslan získal inžiniersky titul v roku 2009 a PhD. v roku 2012 v odbore elektrotechnické systémy na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, kde v súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky. Jeho výskumné aktivity sú zamerané na riadenie elektrických pohonov, hardware-in-the-loop simuláciu a rýchle prototypovanie riadiacich algoritmov. Jeho publikačná činnosť zahŕňa viac ako 30 príspevkov vo vedeckých časopisoch a na konferenciách.