

Riadenie letných nožníc na valcovni profilových materiálov

Flying Shears Control in Wire Rod Mill

Tomáš Borovský¹

¹tomas.borovsky@tuke.student.sk

¹Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt—Presné riadenie letných nožníc na valcovni profilových materiálov zohráva dôležitú úlohu z hľadiska zabezpečenia vysokej kvality a stability produkcie. Tento článok sa venuje popisu problému a vylepšenia existujúceho riadenia nožníc na valcovni roxorov a drôtov spoločnosti Slovakia Steel Mills v Strážskom. Pôvodné riadenie nožníc spôsobovalo nestabilnú dĺžku strihu a nestabilnú rýchlosť počas strihu, čo malo za následok nekvalitu produkcie a prestoje. V príspevku sa prezentuje detailný popis problému, návrh a implementácia riešenia.

KLúčové slová—*letné nožnice, valcovanie profilov*

Abstract—High accuracy of flying shears control plays important role to achieve high quality and stability production in wire rod mill. This paper describes the flying shears control and the improvement of the old solution used in wire rod mill in Slovakia Steel Mills in Strážske. The problem of old solution is instability in the cut length and the cutting speed. Paper presents detailed description of the problems, description of the proposal and its implementation.

Keywords—*flying shears, wire rod rolling mill*

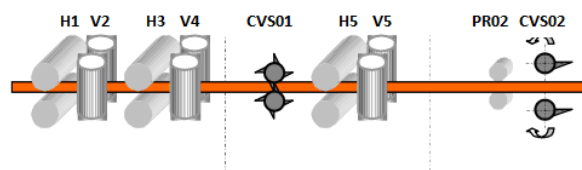
I. ÚVOD

Valcovňa profilových materiálov zvyčajne pozostáva z prípravného, stredného a hotovného poradia valcovacích stolic, pričom každá časť pozostáva z niekoľkých valcovacích stolic, ktoré sú poháňané vlastným motorom napájaným z jednosmerného meniča. Za každým poradím valcovacích stolic sú zvyčajne umiestnené letné nožnice slúžiace na odstrihnutie začiatkov a koncov a na šrotovanie nepodarkov, alebo na strihanie požadovanej dĺžky [1]. Na Obr. 1 je znázornená typická schéma prípravného a stredného poradia valcovne profilových materiálov, so striedavo zoradenými horizontálnymi (H) a vertikálnymi (V) stolicami, rotačnými nožnicami za stredným (CVS01) a prípravným (CVS02) poradím a jedným podávacím valcom (PR02) [2]. Vstupným materiálom do danej valcovne je sochor, výstupom je valcovaný drôt, alebo tyče. Ako vývalok postupne prechádza jednotlivými stolicami, je postupne deformovaný a jeho priečny prierez sa znižuje, zatiaľ čo jeho rýchlosť sa zväčšuje. Sochor je vlastne hranol, pričom priečny prierez má rozmery $120 \times 120 \text{ mm}$ a do prvej stolicy vstupuje s rýchlosťou približne $0,1 \text{ ms}^{-1}$. Za prípravným poradím dosahuje priečny prierez približne 50 mm a rýchlosť približne 1 m/s . Za stredným poradím je jeho priečny prierez na úrovni približne 20 mm a rýchlosť až 12 ms^{-1} . Za hotovným poradím je prierez vývalku na úrovni 8 mm a rýchlosť až 36 m/s pri tyčiach a prierez $5,5 \text{ mm}$

a rýchlosť až 100 ms^{-1} pri valcovanom drôte. Valcovaný drôt je však smerovaný na drôtovú linku, na ktorej sa už ďalej nedelí a spracúva sa do zvitkov v celej svojej dĺžke. Tyče sa však letmo strihajú pri valcovacej rýchlosti až 36 ms^{-1} na požadovanú dĺžku.

Nožnice môžu slúžiť na presné strihanie (odstrih začiatkov, koncov a strihanie dĺžky), alebo na šrotovanie nepodarkov. Pri strihu dĺžky pracujú buď v režime štart/stop (nižšie rýchlosti), alebo v režime kontinuálneho chodu (vysoké rýchlosti). Za prípravným a stredným poradím zvyčajne pracujú nožnice v režime štart/stop, zatiaľ čo za hotovným poradím pri vysokých rýchlostiach materiálu môžu pracovať aj v režime kontinuálneho chodu. Režim chodu nožníc pri strihaní dĺžky je daný rýchlosťou materiálu a dynamickými vlastnosťami pohonu nožníc. Pri režime štart/stop sú pred strihom čepele nožníc vo svojej domovskej pozícii, približne rovnobežne s osou valcovania a materiál prechádza pomedzi nože. Pri pokyne na vykonanie strihu sa nožnice rozbehnú na požadovanú rýchlosť a po strihu musia zabrzdiť a vrátiť sa do domovskej pozície bez toho, aby strihli materiál po druhý krát. To znamená, že motor nožníc musí mať dostatočnú dynamiku na to, aby čepele nožníc dosiahli požadovanú rýchlosť po otočení sa o uhol približne 270° a následne zabrzdlili a vrátili sa do domovskej pozície. V praxi sa tento typ riadenia používa pre nožnice za prípravným a stredným poradím, kde sú nižšie valcovacie rýchlosti. Za hotovným poradím, kde sú dosahované rýchlosti 15 ms^{-1} a viac, nožnice pracujú v režime kontinuálneho chodu aj pri strihaní dĺžky, pričom vývalok je vedený mimo os čepelí nožníc. Do osi čepelí nožníc je špeciálnym zariadením vychýlený len v prípade požiadavky na strih a po strihu sa opäť vedie mimo os nožníc [3], [4].

Tento príspevok sa zaoberá riadením nožníc za stredným poradím. Tieto nožnice slúžia na strih začiatkov a koncov a na šrotovanie nepodarkov.



Obr. 1. Typická štruktúra profilovej valcovacej trate s rotačnými štart/stop nožnicami za prípravným poradím (CVS01) a rotačnými štart/stop nožnicami za stredným poradím (CVS02) [2].

Pri režime strihu začiatkov a koncov pracujú v režime štart/stop, zatiaľ čo pri režime šrotovania pracujú v kontinuálnej prevádzke. Pri strihu začiatkov je potrebné, aby bola tangenciálna zložka rýchlosti čepelí nožníc o niečo väčšia ako je rýchlosť materiálu, inak by došlo k spomaleniu vývalku a následnej havárii. Z dôvodu dizajnu samotných nožníc a vodiaceho systému, ktorý sa nachádza za nožnicami, príliš vysoká relatívna rýchlosť nožníc voči materiálu môže spôsobiť, že odstrihnutý začiatok bude vyhodенý do vodiaceho systému kde sa následne môže zraziť s vývalkom čo opäť spôsobí haváriu.

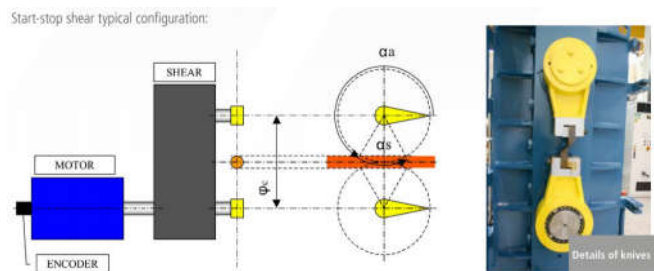
Na odhodenie vývalku pod správnym uhlom má tiež vplyv jeho veľkosť. Pri haváriách spôsobených nesprávnou dĺžkou strihu, alebo nesprávnou relatívnou rýchlosťou nožníc vznikajú prestoje a dochádza k poškodeniu zariadení valcovne. To znamená, že dosiahnutie žiadanej dĺžky strihu a správnej relatívnej rýchlosti voči rýchlosti materiálu je základným predpokladom plynulej prevádzky valcovne.

Existujúce riadenie spôsobovalo nasledujúce problémy:

- Nestabilná dĺžka strihu pri ustálených podmienkach (žiadaná dĺžka strihu je prevažne 20 cm , reálne však dochádzalo k odchýlkam $\pm 10\text{ cm}$).
- Riadenie prvého strihu po zmene sortimentu vychádzalo len z teoretických údajov, bez korekcie existujúceho nastavenia. Prvý strih bol teda vždy iný, ako tie ostatné.
- Rýchlosť materiálu, podľa ktorej sa určuje žiadaná rýchlosť nožníc bola určená len na základe zadaných základných parametrov. Skutočná rýchlosť materiálu sa však takmer vždy líši od vypočítanej a mení sa podľa valcovacích parametrov ako je teplota vývalku, opotrebenie valcov a nastavenie valcovacej medzery [5].

Boli určené tri príčiny nestability dĺžky strihu:

- Výpočet rýchlosti materiálu vychádza len zo základných zadaných parametrov. Vypočítaná teoretická rýchlosť materiálu sa však nezohľadňuje zmeny parametrov valcovania a nastavenia trate. To má veľký dopad na relatívnu rýchlosť nožníc a následne na uhol dopadu odstrihnutých začiatkov vývalku.
- Nespolahlivá koncepcia určenia reálne prejdenej vzdialenosti vývalku, ktorá navyše potrebuje testovaciu vzorku. To znamená, že adaptácia na zmenu sortimentu alebo parametrov valcovania sa prejaví až po valcovaní prvého sochora. Prvý strih je teda vždy veľmi rizikový. Nespolahlivosť tejto koncepcie spočíva aj v samotnom spôsobe adaptácie, ktorá veľmi závisí od mechanického nastavenia pomocného podávacieho valca a určenia jeho pracovného priemeru.
- Nestabilná doba rozbehu nožníc na požadovanú rýchlosť a veľká odchýlka medzi žiadanou a skutočnou rýchlosťou počas rozbehu, pričom táto odchýlka nie je zohľadnená vo výpočte pre dĺžku strihu.



Obr. 2. Typická konfigurácia rotačných nožníc pracujúcich v režime start-stop [2].

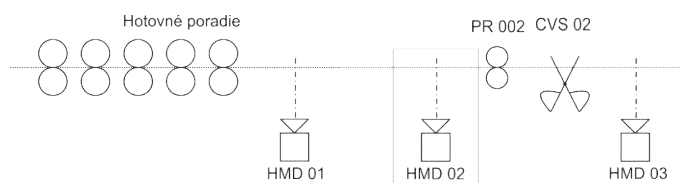
II. RIADENIE LETMÝCH NOŽNÍC

Pre riadenie rýchlosti letmých nožníc je potrebné poznať skutočnú rýchlosť strihaného materiálu a detekovať tento materiál v okamihu, keď sa blíži k nožniciam, aby bolo možné nožnice v správny čas rozbehnúť na požadovanú rýchlosť a odstrihnúť požadovanú dĺžku materiálu. Rýchlosť materiálu sa zvyčajne odvodí od rýchlosti valcovacej stolice pred nožnicami, pričom pre tento výpočet sa používa tzv. efektívny priemer valca D_{eff} , ktorý zohľadňuje predbiehanie materiálu a tvar kalibra valca. Na detekciu materiálu sa na teplých valcovniach zvyčajne používa infračervený detektor (HMD) [1], [4]. Nožnice sa potom definovanou rampou rozbiehajú na požadovanú rýchlosť a po strihu sa aktivuje polohový regulátor, ktorý zabezpečí aby nožnice rýchlo zastavili a vrátili sa do domovskej pozície bez toho, aby strihli druhý krát. Schéma ktorá znázorňuje typickú mechanickú konfiguráciu takýchto nožníc je znázornená na Obr. 2.

Okamih rozbehu nožníc je vypočítaný podľa (1), kde l_{act} je aktuálna dĺžka materiálu ktorá sa začala počítať od okamihu aktivovania $HMD01$, d_{ist} je vzdialenosť medzi $HMD01$ a nožnicami, c_l je dĺžka strihu, adv je predstih a d_{ly} je oneskorenie meniča. d_{ly} sa určuje experimentálne podľa reálnej odozvy meniča. $dist$ je vzdialenosť od $HMD01$ po miesto prvého dotyku nožníc s materiálom a je určená na základe nameranej vzdialenosti od $HMD01$ po os strihu a hrúbky materiálu. adv je určené výpočtom na základe rozbehovej rampy meniča rýchlosti strihu a rýchlosti materiálu. Prejdená dĺžka materiálu l_{act} je určená na základe snímača rýchlosti motora stolice pred nožnicami.

$$l_{act} \geq dist + c_l + d_{ly} - adv \quad (1)$$

Na Obr. 3 je znázornená inštalácia letmých nožníc CVS02 za stredným poradím. Rýchlosť valcovaného materiálu v je vyhodnotená na základe rýchlosti poslednej stolice podľa (2), kde D_{eff} je efektívny priemer valca, j je prevodový pomer prevodovky a n sú otáčky motora. Jedná sa o teoretickú rýchlosť materiálu a presnosť jej určenia závisí od valcovacích parametrov a nastavenia trate. Meraniami však bolo zistené, že takto vypočítaná rýchlosť sa takmer vždy líši od skutočnej rýchlosti materiálu, ktorá sa navyše mení v závislosti od zmien valcovacích parametrov ako napríklad zmeny valcovacej rýchlosti, teploty vývalku či nastavenia valcovacích medzier.



Obr. 3. Inštalácia letmých nožníc CVS02 za prípravným poradím.

$$v = n \frac{\pi k D_{eff}}{60 j} \quad (2)$$

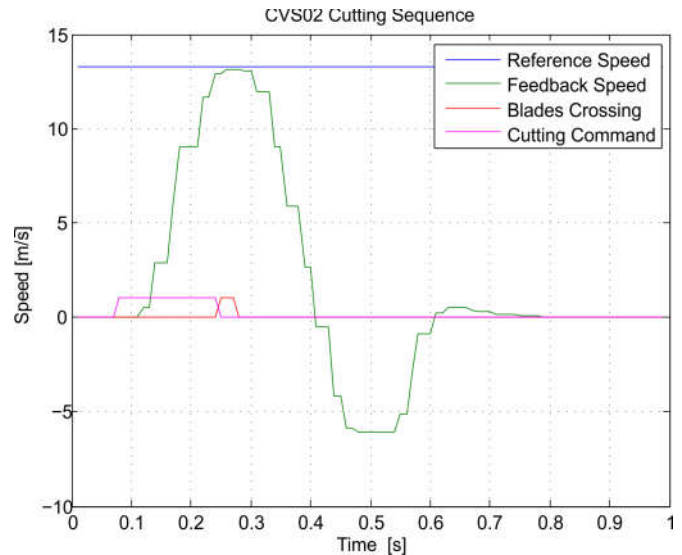
$$l = p \frac{\pi k D_{eff}}{j p_{max}} \quad (3)$$

Aktuálne prejdená vzdialenosť vývalku od aktivovania *HMD01* l je vypočítaná na základe počtu impulzov snímača rýchlosti poslednej stolice podľa (3), kde p je zaznamenaný počet impulzov od aktivovania *HMD01*, p_{max} je počet impulzov snímača na jednu otáčku motora a k je korekčný faktor. Korekčný faktor sa vypočíta na základe reálnej rýchlosti materiálu, ktorú odmeria podávací valec *PR02*. Na to, aby bolo možné odmerať rýchlosť materiálu, je nutné aby sa materiál dostal do zovretia valcov ktoré sa točia o niečo rýchlejšie ako je rýchlosť materiálu a pohon valcov pracuje v režime s obmedzeným momentom. Ako sa valce dostanú do kontaktu s materiálom, tak sa prispôbia jeho rýchlosti. To sa však udeje až po tom, ako sa odstrihne začiatok vývalku, preto je korekčný faktor možné použiť až pre ďalší strih. To však vnáša nasledovné problémy:

- Korekčný faktor nie je aktívny pre prvý strih po zmene sortimentu.
- Adaptácia na zmenu valcovacích parametrov sa prejaví až po valcovaní prvého sochora po týchto zmenách.
- Citlivosť na nastavenie a opotrebenie krúžkov *PR02*. Opotrebením krúžkov podávacieho valca *PR02* sa mení jeho pracovný priemer, čím sa mení aj korekčný faktor. Okrem toho krúžok nemusí byť opotrebený rovnomerne, pozdĺž celej šírky ktorá je v styku s materiálom a ako sa mení pozícia styku s materiálom, mení sa aj skutočný pracovný priemer valca a tým aj korekčný faktor.

Z uvedeného popisu vyplýva, že pre výpočet prvého strihu sa použijú základné parametre a po prvom strihu, kedy je za pomoci podávacieho valca *PR02* určený korekčný faktor k dôjde k jeho adaptácii podľa reálne odmeranej rýchlosti. Ak však dôjde k zmene valcovacích podmienok (zmena valcovaného materiálu, úprava valcovacích medzier, rýchlosti), tak prvý strih po daných úpravách vychádza zo základných nastavení pre daný sortiment, respektíve z korekcií, ktoré boli platné pre valcovacie podmienky pred úpravou. Takýto prístup však nemôže zaručiť stabilnú a bezpečnú prevádzku pre každý strih. Okrem toho, kvalita korekcie, ktorá sa vypočítavala podľa rýchlosti podávacieho valca je v tomto prípade silne závislá od správneho určenia pracovného priemeru podávacieho valca a správneho mechanického nastavenia podávacieho valca, čo sa v praxi ukázalo ako problematické. Podávací valec je opatrený krúžkom s drážkou, ktorý sa postupne pri valcovaní opotrebuje a mení svoj pracovný priemer. Šírka samotného opotrebenia je rôzna a mení sa v závislosti od nastavenia vodidiel a reálnej šírky vývalku. Následne sa teda mení aj miesto kde dochádza k dotyku s materiálom a tým aj pracovný priemer a odmeraná rýchlosť.

Preto bolo navrhnuté riešenie s inštaláciou ďalšieho *HMD* do oblasti pred nožnice a s použitím *HMD01* a *HMD02* pre výpočet váhy pulzu poslednej stolice stredného poradia a reálnej rýchlosti materiálu za touto stolicou. Takto bude možné určiť reálne prejdenú vzdialenosť a rýchlosť materiálu ešte pred samotným strihom.



Obr. 4. Sekvencia strihu nožnic CVS02. Logický signál 'Blades Crossing' znamená kríženie čepelí, teda samotný strih. Logický signál 'Cutting Command' znamená pokyn na rozbeh nožnic.

Nožnice sú napájané z jednosmerného meniča ABB DCS800, riadiaci systém je Siemens Simatic S7 400, pričom komunikácia medzi PLC a meničom je prostredníctvom Profibus protokolu. Samotný riadiaci algoritmus je vykonávaný v 2 ms cyklickom prerušení, pričom signály z HMD vyvolávajú hardvérové prerušenia.

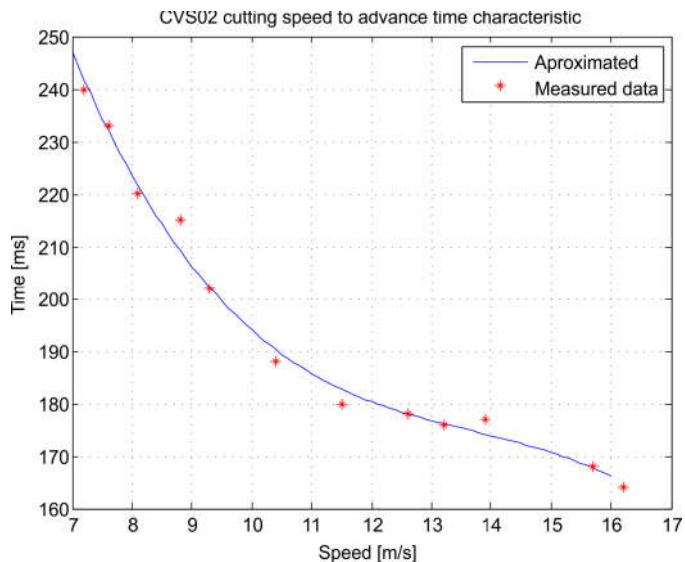
III. URČENIE DĹŽKY A RÝCHLOSTI MATERIÁLU

Ako bolo uvedené v predchádzajúcej časti, určenie reálne prejdenej dĺžky valcovaného materiálu a skutočnej rýchlosti materiálu je kľúčovým predpokladom pre presné riadenie dĺžky strihu letných nožnic. Keďže existujúce riešenie nie je spoľahlivé pre každý valcovaný sochor, a je nutné ho pri zmene materiálu alebo nastavenia trate manuálne korigovať, bolo navrhnuté plne automatické riadenie nožnic za pomoci výpočtu váhy impulzu snímača otáčok poslednej stolice stredného poradia a presného určenia rýchlosti materiálu. Riešenie spočíva v inštalácii ďalšieho *HMD* do oblasti pred *CVS02*, pričom minimálna vzdialenosť l_{min} od *CVS02* bola určená na základe (4), kde v_{max} je maximálna obvodová rýchlosť nožnic a $t_{start-BX}$ je čas od pokynu na rozbeh po samotný strih. Od okamihu aktivovania *HMD01* po okamih aktivovania *HMD02* sa inkrementuje obsah čítača p_{cit} snímača poslednej stolice stredného poradia a vypočíta sa váha pulzu p_w a reálna rýchlosť materiálu v_m podľa (5) a (6), kde d_{12} je vzdialenosť medzi *HMD01* a *HMD02*, t_{12} je čas od aktivovania *HMD01* po aktivovanie *HMD02*.

$$l_{min} = v_{max} t_{start-BX} \quad (4)$$

$$p_w = \frac{p_{cit}}{d_{12}} \quad (5)$$

$$v_m = \frac{d_{12}}{t_{12}} \quad (6)$$



Obr. 5. Aproximácia závislosti času rozbehu nožnic od rýchlosti polynómom tretieho stupňa.

Keďže pri tejto koncepcii určenia rýchlosti materiálu a prejdenej dĺžky dochádza k výpočtu ešte pred prvým strihom a v okamihu vykonania výpočtu je materiál ešte v dostatočnej vzdialenosti pred nožnicami, pokyn na strih môže byť vydaný na základe nového algoritmu, ktorý zohľadňuje reálne prejdennú vzdialenosť valcovaného materiálu. Rovnako referenčná rýchlosť môže byť nastavená podľa reálnej rýchlosti materiálu.

IV. URČENIE PREDSTIHU

Predstih, teda dráha ktorú materiál prejde za dobu od pokynu na rozbeh po samotný strih požadovanej dĺžky pri definovanej rýchlosti nožnic, je pre dané nožnice vypočítaný podľa (7), ak k strihu dôjde počas rozbehovej rampy, resp. podľa (8) ak k strihu dôjde počas ustálenej rýchlosti. v_{mat} je reálna rýchlosť materiálu, φ_{cut} je uhol natočenia čepelí nožnic medzi domovskou pozíciou a strihom, φ_{acc} je uhol natočenia čepelí nožnic medzi domovskou pozíciou a okamihom dosiahnutia žiadanej rýchlosti strihu, t_{acc} je čas rozbehovej rampy, ε_{ref} je uhlové zrýchlenie a d_{ly} je oneskorenie meniča.

$$adv = v_{mat} \left(\frac{\varphi_{cut}}{\varphi_{acc}} t_{acc} + d_{ly} \right) \quad (7)$$

$$adv = v_{mat} \left(\frac{\varphi_{cut} - \varphi_{acc}}{\varepsilon_{ref}} + t_{acc} + d_{ly} \right) \quad (8)$$

Takto určený predstih však predpokladá, že reálna rýchlosť motora bude presne kopírovať žiadanú rýchlosť motora. Pri dynamickom rozbehu však dochádza k odchýlke medzi žiadanou a skutočnou rýchlosťou motora a táto odchýlka závisí od nastavenia regulátora otáčok resp. regulátora prúdu v meniči a samotnej rýchlosti nožnic. Na potlačenie tejto odchýlky sa zvykne používať dopredné riadenie s kompenzáciou dynamického momentu [6]. Daný menič však s touto kompenzáciou nefungoval spoľahlivo, preto bol zvolený iný prístup a riadenie meniča funguje naďalej len v otáčkovej regulačnej slučke, bez korekcie momentu.



Obr. 6. Vzorok odstrihnutých začiatkov na CVS02 po úprave riadenia. Rozptyl je približne 8cm.



Obr. 7. Vzorok odstrihnutých začiatkov na CVS02 pred úpravami riadenia. Rozptyl je 15 cm - 25 cm.

V. NOVÉ RIADENIE

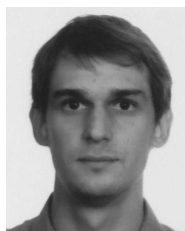
Na základe nameraných časov od pokynu na rozbeh po signál kríženia čepelí nožnic pri rozbehu na rôzne rýchlosti bola zistená závislosť času predstihu a rýchlosti strihu. Táto bola pomocou programu *Matlab* aproximovaná polynómom tretieho rádu, ktorý sa použil v riadení pre výpočet predstihu. Na Obr. 5 je znázornená meraná závislosť predstihu a rýchlosti nožnic a následne aproximovaná funkcia, ktorá sa použila v riadení nožnic. Spolu s použitím algoritmu pre určenie reálnej prejdenej vzdialenosti materiálu a meraním reálnej rýchlosti materiálu sa rozptyl v dĺžke strihu znížil z 25cm na 8cm, čo je pri danej konfigurácii hardvéru hraničná hodnota. Rovnako sa stabilizoval aj uhol dopadu, keďže sa relatívna rýchlosť čepelí nožnic nastavuje voči reálnej rýchlosti materiálu.

VI. ZÁVER

V článku je popísaný základný princíp riadenia letných nožnic na valcovni tyčí a drôtov. Ďalej sú detailne popísané problémy ktoré súvisia s existujúcou koncepciou riadenia a je navrhnuté nové riešenie. Po implementácii nového riadenia nožnic došlo k zníženiu prestojov v danej oblasti linky a minimalizovala sa potreba manuálne korigovať dĺžku strihu počas prevádzky valcovne.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] L. Youngseog, *Rod and Bar Rolling: Theory and Applications*, CRC Press, Korea, 2004.
- [2] Capitanio Tailored Automation, *AIC Magazine*, ISSUE N.01 March 2015, pp. 16-23.
- [3] T. Borovský, "Simulation and Analysis of Wire Rod Rolling", SCYR 2015 - Proceedings of the 15th Scientific Conference of Young Researchers, Herľany, Slovak Republic, 2014, pp. 114-115, ISBN 978-80-553-2130-1.
- [4] X. Sun, H.F. Sun, Speed cascade control system for bar and wire rod mills, *ABB Value Paper*, ABB China Ltd, 2009.
- [5] L. S. Bayoumi, Y. Lee, "Effect of Interstand Tension on Rolling Load, Torque and workpiece Deformation in the Rod Rolling Process", *Journal of Materials Processing Technology* vol. 145, pp. 7-13, 2004, doi:10.1016/S0924-0136(03)00581-8.
- [6] L. Zboray, F. Ďurovský, J. Tomko, *Regulované pohony*, Viena, Košice, 2000.



T. Borovský sa narodil 28.5.1987 v Trebišove. V roku 2012 ukončil vysokoškolské štúdium na katedre elektrotechniky a mechatroniky na Technickej univerzite v Košiciach. Následne pracoval ako elektrotechnický inžinier na valcovni a oceliarni spoločnosti Slovakia Steel Mills. Popri zamestnaní pokračoval v externom doktorskom štúdiu v odbore Mechatronika na Technickej univerzite v Košiciach, pričom sa venuje riadeniu valcovacích tratí.