

Valcovanie profilov a valcovací moment

Wire rod mill and rolling torque

Tomáš Borovský¹¹tomas.borovsky@tuke.student.sk¹Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt—Valcovací moment je jedným z kľúčových parametrov pri valcovaní drôtu a profilov. Pri valcovaní profilov, sa zvyčajne na rozdiel od valcovania pásov nepoužívajú žiadne snímače valcovacej sily a tak valcovacia sila resp. valcovací moment musí byť odvodený od celkového momentu motora. Správne vyhodnotenie valcovacieho momentu má efekt na celkovú kvalitu riadenia procesu, keďže valcovací moment má vplyv na reguláciu rýchlosti jednotlivých valcovacích stolíc, riadenie pomocných obvodov a sledovanie samotného materiálu na valcovni. Tento článok sa zaoberá komponentmi momentu pôsobiaceho na motor valcovacej stolice a vyhodnotením jeho jednotlivých zložiek.

Kľúčové slová—valcovanie profilov, valcovací moment, dynamický moment

Abstract—Rolling torque is one of the key rolling parameter in the long products rolling. In wire rod mills, in contrast to strip rolling there are no load cells installed in the stands to detect the rolling force. Therefore, rolling force, i.e. rolling torque must be estimated from stand motor torque. Evaluation of the rolling torque has an effect to quality of the rolling process since the rolling torque affects stand speed control, auxiliary control and material tracking. This paper deals with motor torque components and describes how to evaluate them.

Keywords—wire rod rolling, rolling torque, dynamic torque

I. ÚVOD

Pri valcovaní profilov je ako vstupný materiál použitý sochor, zvyčajne štvorcového priečného prierezu. Ten je v ohrievacej peci ohriaty na požadovanú teplotu a kalibrovanými valcami je pretváraný do podoby finálneho produktu, ako napríklad valcovaný drôt, guľatina, alebo iné tvary priečného prierezu. Valcovňa profilových materiálov zvyčajne pozostáva z prípravného, stredného a hotovného poradia valcovacích stolíc [1]. Jednotlivé stolice sú pritom poháňané vlastným motorom, napájaným zo striedavých, alebo jednosmerných meničov. Valcovacie stolice zvyčajne nie sú vybavené senzorom valcovacej sily a tak je valcovacia sila, resp. valcovací moment odvodený od aktuálneho momentu, alebo prúdu motora, ktorý je k dispozícii priamo z meniča [2], [4]. Moment ktorý pôsobí na hriadeľ motora danej stolice M_m je však zložený z nasledujúcich zložiek [3]:

- M_t – moment trecích strát naprázdno
- M_d – dynamický moment
- M_{cap} – moment od trenia v čapoch valcov
- M_{val} – valcovací moment

- M_{tah} – moment od ťahu

Keďže moment motora obsahuje počas valcovania všetky zložky súčasne a nie je k dispozícii žiadne ďalšie meranie, ktoré jednotlivé zložky spoľahlivo identifikuje, zvyčajne je pre riadenie procesu a pre operátorov valcovne k dispozícii iba celková hodnota momentu, alebo prúdu motora, ktorá je pri určitom zjednodušení úmerná valcovaciemu momentu [2], [3]. Pre precízne riadenie rýchlosti stolíc, vyhodnotenie valcovacích parametrov a spoľahlivé sledovanie materiálu však táto celková hodnota momentu nepostačuje. Tento článok sa zaoberá jednotlivými zložkami momentu pôsobiaceho na motor stolice počas valcovania a počas chodu naprázdno a možnosťami ich identifikácie.

II. MOMENT MOTORA PRI VALCOVANÍ

Ako už bolo spomenuté, moment motora pri valcovaní profilových materiálov je zložený z piatich zložiek a môže byť popísaný (1).

$$M_m = M_t + M_d + M_{tah} + M_{cap} + M_v \quad (1)$$

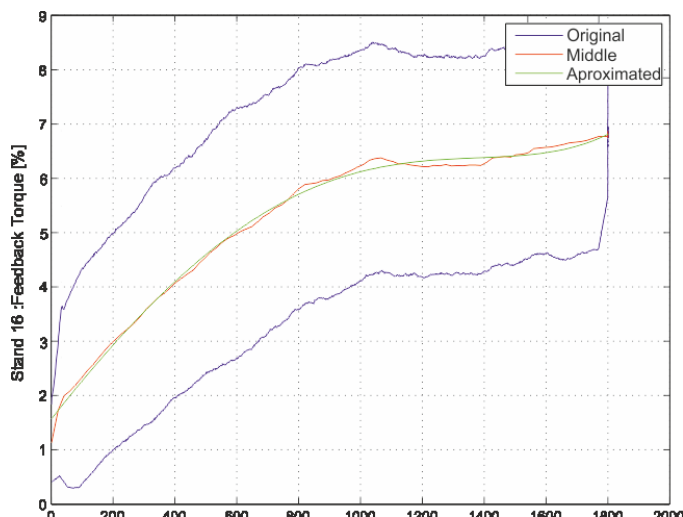
A. M_t – moment trecích strát naprázdno

M_t je prítomný vždy a dá sa identifikovať pri chode motora na prázdno. Je závislý od otáčok motora a od mazania jednotlivých ložísk sústavy. V porovnaní s ostatnými zložkami je zvyčajne zanedbateľný a pre jednotlivé valcovacie stolice nadobúda hodnotu približne 1-5% nominálneho momentu motora. Pri použití kompaktného bloku, kedy je viacero stolíc poháňaných jedným pohonom to môže byť 5-20% nominálneho momentu motora. Závislosť trecieho momentu od otáčok je znázornená na Obr.1, kde na vodorovnej osi je priebeh otáčok danej stolice [ot/min] a na zvislej osi je priebeh momentu motora danej stolice [%]. Závislosť momentu naprázdno sa po odmeraní experimentálnych údajov dá popísať pomocou polynómu tak, ako je to znázornené na Obr.1 (Zelená farba – *Approximated* reprezentuje aproximáciu závislosti trecieho momentu a otáčok stolice STD16 polynómom tretieho rádu).

B. M_d – dynamický moment

M_d je vyvolaný zmenou rýchlosti valcovacej stolice a je daný (2). Jeho polarita závisí od polarít zmeny rýchlosti $\Delta\omega$ a jeho veľkosť od momentu zotrvačnosti poháňanej sústavy stolice J a akcelerácie sústavy. Identifikácia M_d je možná, ak je známa zmena rýchlosti $\frac{\partial\omega}{\partial t}$ a moment zotrvačnosti stolice J . Priebeh akceleračného momentu pri rozbehu stolice je znázornený na Obr.3.

$$M_d = J \frac{\partial\omega}{\partial t} \quad (2)$$



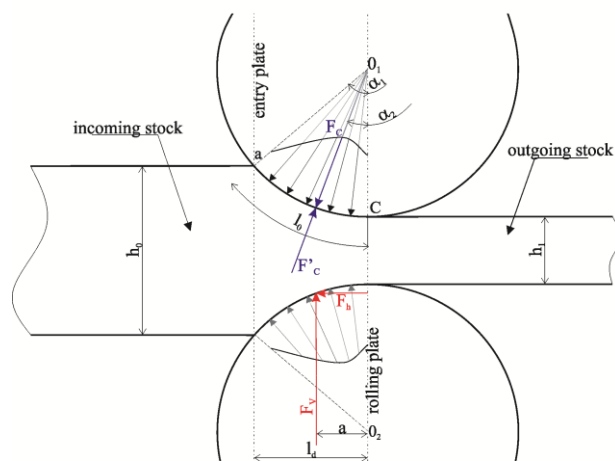
Obr. 1. Závislosť trecieho momentu od otáčok počas pomalého rozbehu na maximálne otáčky a následného spomalenia. Modrý signál znázorňuje moment motora počas tohto testu, červený signál je priemernou hodnotou medzi momentom počas rozbehovej a počas dobehovej rampy a zelený signál je hodnota polynomiálnej funkcie ktorá aproximuje priemernú hodnotu.

C. M_{val} – valcovací moment

M_{val} je moment vyvolaný samotnou valcovacou silou F_{val} , t.j. deformačným odporom materiálu. Keďže valcovacie stoličky nie sú vybavené snímačom valcovacej sily, nie je možné túto silu priamo odmerať. Valcovací moment je závislý od mnohých valcovacích parametrov, ako napr. teplota a druh materiálu, nastavenie valcovacej medzery, trecích podmienok, priemeru valca, druhu kalibra, ťahových pomerov, valcovacej rýchlosti. Základným vzťahom pre výpočet valcovacej sily je (3), kde p_{str} je stredný deformačný tlak a S_d je projekcia kontaktnej plochy vývalku a kalibru valca. Valcovací moment M_{val} je potom daný (4), kde a je rameno sily a F_{val} je valcovacia sila [1], [3]. Dôležitým parametrom pre určenie valcovacej sily a valcovacieho momentu je pričný prierez vstupujúceho vývalku, nastavenie valcovacej medzery a správne určenie stredného pracovného priemeru valca. Na Obr.2 je znázornený zjednodušený prístup k určeniu týchto parametrov, pričom je zanedbaná horizontálna zložka valcovacej sily a neuvažuje sa s predbiehaním materiálu a geometria pričného prierezu vývalku je zjednodušená na obdĺžnik. Avšak aj po týchto zjednodušeníach je pre výpočet valcovacieho momentu potrebná znalosť parametrov ako pričný prierez vstupujúceho materiálu, alebo stredný pracovný priemer valca, ktoré však zvyčajne k dispozícii nie sú. Okrem iného, valcovacia sila je priamo závislá aj od ťahových pomerov, keďže ťah vo vývalku posúva neutrálnu rovinu, t.j. miesto pôsobenia F_{val} . Pribeh valcovacieho momentu prvých dvoch stolic prípravného poradia počas valcovania jedného sochora je znázornený na Obr.3, pričom oblasť A reprezentuje valcovací moment ktorý nie je ovplyvnený ťahom medzi stolicami. V oblasti B je prítomný kladný predný ťah, ktorý sa prejaví poklesom celkového momentu motora.

$$F_{val} = p_{str} S_d \quad (3)$$

$$M_{val} = F_{val} a \quad (4)$$



Obr. 2. Valcovacia sila a valcovací moment pri valcovaní profilov.

Vstupujúci vývalok o strednej hrúbke h_0 je valcovaný na strednú hrúbku h , pričom vertikálna zložka valcovacej sily F_v pôsobí na vývalok v strede dotykovej dĺžky vývalku a valcov l_0 vyvalkom.

D. M_{cap} – moment od trenia v čapoch valcov

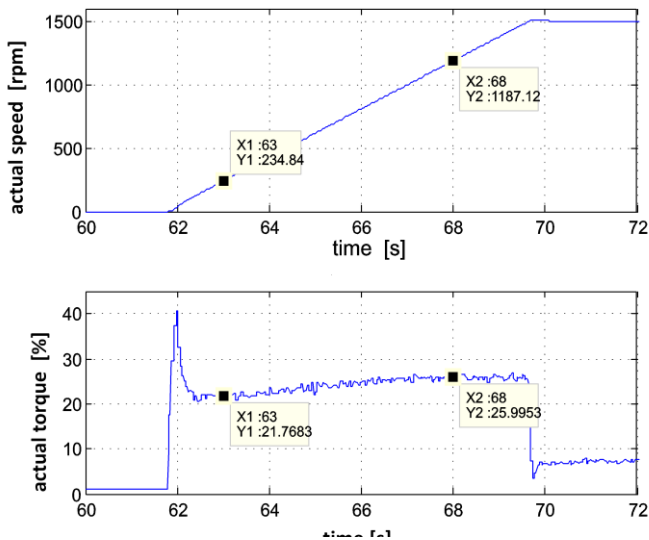
M_{cap} je vyvolaný trením v čapoch valcov počas valcovania. Je závislý od valcovacej sily F_v , od trecích podmienok čapov valcov f_{cap} a od priemeru čapov D_{cap} . Pre jeho určenie podľa (5) je nutné poznať valcovaciu silu a trecí koeficient čapov valcov, ktoré zvyčajne nie sú k dispozícii. Preto sa s M_{cap} osobitne nebude uvažovať a bude považovaný za zložku M_{val} .

$$M_{cap} = \frac{2F_v f_{cap} D_{cap}}{4} \quad (5)$$

E. M_{tah} – moment od ťahu

M_{tah} je prítomný ak existuje medzi susednými stolicami ťah. Ten môže nadobúdať kladné aj záporné hodnoty a môže existovať medzi danou a nasledujúcou stolicou, kedy sa jedna o tzv. predný ťah danej stolicy, alebo medzi danou a predchádzajúcou stolicou, kedy hovoríme o tzv. zadnom ťahu danej stolicy. Ťah je výsledkom nesúladu rýchlosti dvoch susedných stolic a môže mať rôzne následky. Pri valcovaní profilov je valcovanie s miernym ťahom často krát použité pre zabezpečenie spoľahlivého valcovacieho procesu s nízkym rizikom havárie (nahromadenia materiálu medzi dvoma stolicami). Veľký ťah naopak znižuje životnosť valcov a má nepriaznivý vplyv na kvalitu produktov, keďže spôsobuje zmenu pričného prierezu vývalku. Presné určenie ťahu medzi stolicami vyžaduje znalosť mnohých valcovacích parametrov, ktoré však pri valcovanom procese nie sú k dispozícii. Preto sa pre odhadnutie ťahu používa tzv. porovnávacia metóda, kedy sa pozoruje moment motora danej stolicy pred zavedením vývalku do nasledujúcej stolicy $M_{bez tahu}$ a po zavedení vývalku do nasledujúcej stolicy $M_{s tahom}$. $M_{\Delta tah}$ tak reprezentuje zmenu momentu od ťahu a je daný (4) [2], [4], [5]. Ak je pozorovaný pokles momentu motora danej stolicy v okamihu zavedenia vývalku do nasledujúcej stolicy, ťahový moment nadobúda kladné hodnoty. To znamená, že materiál je „ťahovaný“ nasledujúcou stolicou a tak nehrozí riziko nahromadenia materiálu medzi týmito dvoma stolicami. Ak je ťah záporný, hovoríme o tzv. tlaku a môže dôjsť k nahromadeniu materiálu medzi dvoma stolicami.

$$M_{\Delta tah} = M_{bez tahu} - M_{s tahom} \quad (6)$$



Obr. 3. Meranie momentu a zmeny rýchlosti počas rozbehu pre účely identifikácie momentu zotrvačnosti meranej sústavy.

III. MOMENT OD VALCOVANIA

Keďže určenie jednotlivých zložiek momentu motora osobitne vyžaduje znalosť mnohých valcovacích parametrov ktoré zvyčajne nie sú k dispozícii, zoskupenie týchto zložiek do dvoch skupín sa zdá byť vhodnou alternatívou, ktorá prinesie oddelenie faktorov súvisiacich s valcovacím procesom od faktorov, ktoré so samotným valcovacím procesom nesúvisia. Moment ktorý pôsobí na motor a nesúvisí s valcovacím procesom je súčtom M_t a M_d a je možné ho vypočítať a následne vylúčiť pri riadení procesu. Moment súvisiaci s valcovacím procesom M_{vp} je teda daný (4) a pozostáva z M_{cap} , M_{val} a M_{tah} .

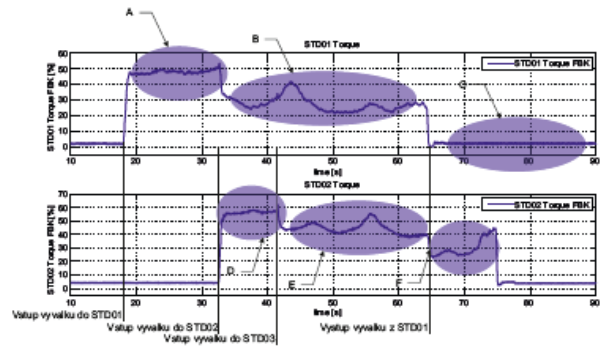
$$M_{vpd} = M_m - M_d - M_t \quad (7)$$

A. Určenie trecieho momentu naprázdno M_t

Trecí moment sa dá určiť meraním naprázdno pri rôznych rýchlostiach pohonu. Ako už bolo spomenuté, trecí moment je funkciou otáčok a trecích podmienok. Keďže uvažujeme, že zmeny trecích podmienok sú zanedbateľné, pre účely výpočtu M_t sa použije získaná závislosť od otáčok. Na Obr. 1 je znázornená závislosť momentu od otáčok pohonu stolice $STD16$ na valcovacej trati profilov a valcovaného drôtu, získaná pomalým rozbehom motora na maximálne otáčky a následne jeho pomalým zastavením (Modrá farba - *Original*) a aproximácia tejto závislosti (Zelená farba - *Aproximated* reprezentuje aproximáciu závislosti trecieho momentu a otáčok stolice $STD16$ polynómom tretieho rádu). Pri pomalom rozbehu a následnom dobehu sa minimalizuje vplyv dynamického momentu, ktorý sa navyše potlačí tým, že ako referenčný údaj sa použije stredná hodnota momentu počas rozbehu a dobehu (Červená farba - *Middle*).

B. Určenie dynamického momentu M_{dyn}

Pre určenie M_{dyn} je potrebné poznať moment zotrvačnosti danej sústavy J . Ten môže byť vypočítaný, alebo sa odmeria priamo na sústave. Pri meraní je nutné pohon rozbehnúť s konštantným zrýchlením pri nemennom, resp. limitovanom momente. Následne je od meraného momentu odčítaný príslušný M_t . Priebeh meraného momentu počas takéhoto rozbehu je znázornený na Obr. 3.



Obr. 4. Priebeh momentu stolíc $STD01$ a $STD02$ počas valcovania s ťahom. Oblasť A znázorňuje moment vzvolaný valcovacím procesom, kedy sa vývalok nachádza iba v danej stolici. Oblasť B znázorňuje vplyv ťahu medzi stolicami. Oblasť C znázorňuje trecí moment pri behu na prázdno. Oblasť D znázorňuje valcovací moment ovplyvnený zadným ťahom, oblasť E znázorňuje valcovací moment ovplyvnený predným aj zadným ťahom a oblasť F znázorňuje valcovací moment ovplyvnený len predným ťahom.

Moment zotrvačnosti je následne daný (8), kde $\Delta\omega$ [rad^{-1}] je zmena rýchlosti počas meraného intervalu, M_m [Nm] je moment motora počas daného intervalu a Δt [s] je interval merania.

$$J = M_m \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \quad (8)$$

Získaný moment zotrvačnosti jednotlivých stolíc je ďalej možné použiť na výpočet dynamickej zložky momentu M_d , ktorý sa podľa (2) vypočíta na základe zmeny žiadanej rýchlosti danej stolice a momentu zotrvačnosti sústavy.

IV. ŤAHOVÝ MOMENT

Pri valcovaní profilových materiálov je identifikácia a regulácia ťahu jednou z kľúčových úloh riadenia [6], [7]. Keďže na valcovacej trati zvyčajne nie sú umiestnené zariadenia na meranie ťahu medzi stolicami, ťah je odvodený od momentu motora. Na prípravnom poradí, kde je priečný prierez materiálu veľký a neumožňuje sformovanie slučky, ťah je riadený priamo, na základe takto odvodeného ťahového momentu. Na strednom a hotovom poradí sú medzi jednotlivými stolicami sformované slučky, avšak aj tu je pre ich správne nastavenie nevyhnutné odvodenie ťahu od momentu motora. V hotovom bloku niekoľkých valcovacích stolíc poháňaných jedným spoločným motorom nie je žiadna regulácia ťahu. Ten je pevne daný fixným pomerom rýchlostí jednotlivých stolíc a priemerom valcovacích krúžkov jednotlivých stolíc. Kalibračný predpis je pripravený tak, aby boli udržiavané minimálne ťahové pomery a nehrozilo tak riziko nahromadenia sa materiálu medzi jednotlivými stolicami.

Tak ako už bolo spomenuté, ťahový moment resp. jeho účinkov na valcovací moment je výsledkom nesúladu rýchlostí dvoch po sebe nasledujúcich stolíc, ktoré vyúsťuje do vzniku ťahu medzi dvoma stolicami, ktorý spôsobí zmenu priečného prierezu vývalku. Ťah môže nadobúdať kladné a záporné hodnoty. Na Obr.4 je znázornený priebeh momentu prvých dvoch stolíc prípravného poradia, pričom medzi týmito stolicami je prítomný kladný predný ťah. K poklesu momentu $STD01$ dochádza v okamihu zavedenia vývalku do $STD02$. Takto identifikovaný ťahový moment je ďalej použitý pre riadenie procesu [5], [7].

V. ZÁVER

Tento článok popisuje jednotlivé zložky momentu pôsobiaceho na motor počas valcovania profilových materiálov. Keďže sa niektoré zložky nedajú identifikovať priamo, bol zvolený prístup určitého zjednodušenia, ktorý spočíva vo vytvorení dvoch základných skupín momentu pôsobiaceho na motor. Toto zjednodušenie prináša presnejšiu závislosť sledovaného momentu od valcovacieho procesu, keďže je možné vylúčiť tie zložky momentu, ktoré nesúvisia s valcovacím procesom. Ďalej je uvedený základný popis jednotlivých zložiek momentu počas valcovania a sú vysvetlené možnosti ich identifikácie s načrtnutým príkladom ich merania a vyhodnotenia.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] L. Youngseog, *Rod and Bar Rolling: Theory and Applications*, CRC Press, Korea, 2004.
- [2] X. Sun, H.F. Sun, Speed cascade control system for bar and wire rod mills, *ABB Value Paper*, ABB China Ltd, 2009
- [3] Tomáš Borovský, Rolling Speed and Torque Prediction in Wire Rod Mill, SCYR, Herľany, Slovakia, 2013.
- [4] T. Borovský, "Simulation and Analysis of Wire Rod Rolling", SCYR 2015 - Proceedings of the 15th Scientific Conference of Young Resear-

chers, Herľany, Slovak Republic, 2014, pp. 114-115, ISBN 978-80-553-2130-1.

- [5] Gi. Li, F. Janabi-Sharifi, L. Witnisky, *Decoupling of Multiple Stand Interactions in Looperless Rolling Control Process*, IEEE Industrial Technology 2002 (821-826), 2002.
- [6] Dag. N. Sollander, Upgrading rod and bar mills with state-of-the-art control technology, ABB Automation Systems AB, Sweden, 1999.
- [7] GuominLi, F. Janabi-Sharifi, Fuzzy Tension Control Scheme for Roughing and Intermediate Rolling Mills, Proc. ANNIE'2002, St. Louise, USA, 2002.



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, teraz ako automatizačný inžinier pre valcovne v spoločnosti SMS Group. Popri zamestnaní pokračoval v externom skom štúdiu v odbore Mechatronika na Technickej univerzite v Košiciach, pričom sa venuje riadeniu valcovacích tratí.