

Centrum aplikované kybernetiky 3

Pracovní balíček: 22 - Modulární systém pro monitorování, řízení a optimalizaci výrobních procesů

Výsledek TE01020197-V136 Softwarové moduly pro optimalizaci výrobních procesů

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku:

- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní a CIIRC (ČVUT)
- PT SOLUTIONS WORLDWIDE spol. s r.o. (PTSW)

Koordinace pracovního balíčku

- Prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, PhD (ČVUT) garant aplikačně výzkumných činností
- Ing. Jan Knobloch (PTSW) manažer průmyslových činností

Kontakt: Prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, PhD Ústav přístrojové a řídicí techniky Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze Technická 4, Praha 6, 16607 Tel: 224 352 877 Email: tomas.vyhlidal@cvut.cz



Obsah

1	Úvod	3
2	Modul pro estimaci teploty v procesu kontilití založený na redukovaném modelu	4
3	Moduly pro optimalizaci výrobních procesů ocelárenského a hutního průmyslu	8
	Teplotní bilan ce materiálu během válcování za tepla	8
	Teplotní bilance ve válcovací mezeře a ohřev válců	9
	Tlakové poměry ve válcovací mezeře	10
	Testování na datech z reálného provozu	11
4	Regulátor s vnitřním modelem pro kompenzaci dopravního zpoždění a excentricity válo procesu válcování	ců v 12
5	Modul pro řízení hydropohonu válcovací stolice	19



1 Úvod

Dosaženým výsledkem balíčku 22 je sada softwarových nástrojů pro optimalizaci výrobních procesů v hutním a ocelárenském průmyslu. Při návrhu jednotlivých softwarových modulů byly využity dynamické matematické modely popisující jednotlivé procesní podsystémy, materiálové a energetické toky a jejich propojení v rámci daných logistických pravidel. Konkrétně se jedná o následující sady modulů pro optimalizaci, monitorování a řízení procesů, které jsou dále podrobně popsány:

- Modul pro estimaci teploty v procesu kontilití založený na redukovaném modelu
- Moduly pro optimalizaci výrobních procesů ocelárenského a hutního průmyslu
- Regulátor s vnitřním modelem pro kompenzaci dopravního zpoždění a excentricity válců v procesu válcování
- Modul pro řízení hydropohonu válcovací stolice



2 Modul pro estimaci teploty v procesu kontilití založený na redukovaném modelu

Hlavním cílem výzkumu bylo vyvinout redukovaný 3D model procesu kontilití metodou konečných objemů se záměrem monitorovat proces a využít tohoto modelu pro optimalizaci procesu kontilití. Vzhledem k tomu, že je proces kontinuálního lití oceli velice komplexní a odehrává se ve velice nepříznivých podmínkách, je přítomna celá řada problémů a je potřeba sledovat velké množství parametrů, ze kterých jsou některé velice obtížně měřitelné a některé nejsou vůbec měřitelné. Z těchto důvodů je třeba mít k dispozici model procesu, který bude schopen predikovat teplotu a celou řadu parametrů procesu, což má podstatný význam pro řízení a optimalizaci samotného procesu kontilití. Tento 3D model má jako hlavní výstup trojrozměrné rozložení teplotního pole bramy podél celé trati v procesu. Dále model počítá metalurgickou délku a tloušťku ztuhlé kůry bramy na základě získaného 3D rozložení teplot a tepelně závislých materiálových vlastností oceli. Kromě těchto, již uvedených výstupů, model zohledňuje i následující tepelně závislé parametry a vlastnosti oceli:

- hustotu tekuté a pevné fáze oceli závislé na teplotě,
- mezní teplotu tekuté fáze závislé na chemickém složení oceli,
- koeficient vodivosti oceli závislý na teplotě a chemickém složení,
- koeficient přestupu tepla jako funkce intenzity chlazení v jednotlivých zónách procesu.

Během první fáze tohoto výzkumu bylo vyvinuto několik referenčních modelů procesu kontilití v softwaru ANSYS. Na základě podkladů z literatury a informací poskytnutých průmyslovým partnerem v projektu, firmou PTSW, byl vytvořen a ověřen referenční model, který v poslední fázi výzkumu byl použit na ověření vyvinutého 3D modelu procesu. Pro modelování tohoto procesu byl použit standardní $k - \varepsilon$ model s intenzitou turbulence na vstupu I = 5% kvůli velice turbulentnímu charakteru proudění oceli tryskou v krystalizátoru. Jako model sálání byl použit P-1 model a enthalpy – porosity metoda pro model tuhnutí oceli, viz [6]. Výsledky simulací modelu v ANSYSu jsou zobrazeny na Obr. 1, na kterém je rozložení teplotního pole v krystalizátoru a rozložení tekuté a pevné fáze před zónou primárního chlazení, které mají podstatný vliv na kvalitu výrobků. Tyto výsledky byly použity jako referenční pro ladění parametrů nově vyvíjeného redukovaného 3D CFD modelu procesu kontilití.



Obr. 1: Rozložení teplotního pole tekuté a pevné fáze v krystalizátoru

Na základě matematických modelů uvedených v [1], [2] a výsledků z první fáze aplikovaného výzkumu byl vytvořen redukovaný matematický model procesu kontilití. Vzhledem k tomu, že je měření teplot a dalších parametrů v procesu kontilití velice obtížné a někdy i nespolehlivé kvůli nepříznivým podmínkám procesu, modelování teplotního pole bramy s cílem optimalizace



procesu kontilití je rozhodující pro monitorování a optimalizaci procesu kontilití a řešení problémů, mezi kterými jsou nejdůležitější:

- dosažení žádané teploty a rozložení teplotního pole bramy, sledování tloušťky ztuhlé kůry podél celé trati
- vliv krystalizátoru a zóny primárního chlazení na tloušťku skořápky
- určení metalurgické délky a tvaru tekutého jádra
- odchylování tekuté fáze od středu bramy atd.

Matematický model procesu kontilití byl nejdříve vyvinut v softwaru MATLAB a potom byl přeložen do softwarových knihoven v jazyku C++. Program se skládá ze čtyř panelů, jak je níže vysvětleno. Panel "Steel Properties" tvoří první modul softwaru, ve kterém se nastavují jak fyzikální vlastnosti ocelí, tak i chemické složení uvažované oceli, viz Obr 2.

Steel Properties	Cooling parameters	Area reduction	Dim. & Parameters			
Steel Custom V						
Liquid temp	perature	Density				
 Consta 	nt OLSM - C	 Constant 	OLSM - C			
1500	LSM	7800 👗				
Thermal co	nductivity coef solid	Thermal conduc	ctivity coef liquid			
 Const 	ant OLSM	Constant	◯ LSM			
	Chemical cor	nposition of steel				
0.00 %	C 0.00 % P	0.00 % Ca	0.00 % Mo			
0.00 %	Si 0.00 % S	0.00 % Ni	0.00 % Cr			
0.00 %	Mn 0.00 % Nb	0.00 % Cu				

Obr. 2: Panel nastavení vlastností oceli v závislosti na teplotě a chemickém složení oceli

Vzhledem k výrazným závislostem parametrů, materiálových a tepelných vlastností (např. koeficient vedení tepla tekutého jádra a pevné fáze, teplota tuhnutí oceli, specifické hustoty atd.) na chemickém složení oceli musel být zohledněn tento vliv při modelování procesu kontilití. Panel nastavení vlastností se skládá z několika bloků, tj. modulů, které počítají teplotně a chemicky závislé vlastnosti ocelí na základě specifikovaného druhu oceli a v případě, že daná ocel není k dispozici v programových tabulkách, chemické složení uvažované oceli se může specifikovat ve spodní části panelu. Všechny uvedené parametry a vlastnosti oceli se počítají v závislosti na celkovém chemickém složení uvažované oceli, tj. procentuálním podílu všech chemických složek. Hustota oceli a teplota tuhnutí oceli jsou výrazně závislé na procentuální účasti uhlíku a z toho důvodu software nabízí i alternativní empirický vzorec pro vypočet těchto vlastností jen v závislosti na procentuálním složení uhlíku v oceli. Pro detailnější informace ohledně tohoto výpočtu, viz [3].

Podstatný význam v procesu kontilití má systém na ochlazování bramy, přitom zásadní význam má zóna sekundárního chlazení za krystalizátorem. Správné nastavení průtoku na vodních tryskách má rozhodující význam na několik nejdůležitějších parametrů procesu kontilití jako například tloušťka skořápky bramy, metalurgická délka, odchýlení tekutého jádra od osy bramy atd. Z toho důvodu v panelu "Colling parameters", viz Obr. 3, je možné nastavit libovolné průtoky v rozsahu definovaném použitým systémem a také vypnout chlazení v libovolné zóně a provést simulaci i v případě nějaké nestandardní anebo havarijní situace.





teel Properties	Cooling parameters	Area reduction	Dim. & Parameters
Zo	one length [m]	Mesh parameters	
Mold	1.0	Cell size - x [mm]	10
Zone 1-2	1.0	Cell size - y [mm]	10
7000.2.4		Cell size - z [mm]	50
20ffe 3-4	1.0		
Zone 5-6	1.0 🔺	Simulation parame	eter
Zone 7-8	1.0	Init. Temp. [K]	1800
Zone 9-10	1.0	Time step [s]	
	•	Calc. time [s]	1800
Zone 11-15	5.0 🔹	Start	simulation

Obr. 3: Panel nastavení průtoku vody na vodních tryskách v jednotlivých zónách



Nastavení geometrických parametrů procesu jako například délku jednotlivých zón procesu a velikost, tj. jemnost sítě se nastavuje v paletě "Dim. & Parameters", viz Obr. 4. Kromě těchto parametrů se zde nastavují i počáteční parametry procesu jako například počáteční rozložení teplotního pole uvnitř bramy. Další okrajové podmínky se počítají na základě těchto počátečních podmínek, parametrů procesu a chemického složení uvažované oceli, viz [4] a [5]. V každé simulaci je potřeba nastavit délku simulace a časový krok podle aktuálních podmínek procesu. Nastavení těchto parametrů se provádí v poli "Calc. time a Time step". Výsledky výpočtu jsou dány v okně uvedeným na Obr. 5. Metalurgická délka je uvedena na prvním grafu na Obr. 5 a podélný a příčný profil teplot jsou uvedeny na dalších dvou grafech.



Obr. 5: Metalurgická délka (horní obrázek) a podélný i příčný teplotní profil (prostřední a spodní graf)



Hlavní výstup z tohoto softwaru je trojrozměrné pole rozložení teplot. Toto pole, v několika prostorových řezech v oblastech krystalizátoru a na výstupu z tratě, je znázorněno na Obr. 6.



Obr. 6: Trojrozměrné pole teplot v několika prostorových řezech u krystalizátoru a na konci bramy na výstupu z trati

Jak je patrné z prezentovaných výsledků a grafů, vyvinutý 3D model splňuje předem definované cíle a výrazně zkracuje výpočetní čas, což umožňuje jeho snadné nasazení pro účel monitorování procesu a případně i pro řízení procesu kontilití. Tím se otevírá cesta k snadnému nasazení v průmyslových aplikacích. Díky použitému redukovanému modelu se výpočetní čas snižuje na řádově vteřiny a minuty v závislosti na parametrech procesu a výpočtu oproti standardním výpočetním nástrojům, kde je výpočetní čas řádově několikrát delší.

Literatura

- [1] Z. Malinowski, M., Rywotycki. Modeling of the strand and mold temperature in the continuous steel caster, Ironmaking and Steelmaking Vol 32, No. 2 (2005)
- [2] L. Klimeš, J. Štětina. Parallel dynamic solidification model of continuous steel casting on GPU, Proc. of 22nd Conference on Metallurgy and Materials METAL, Brno, 2013, 6
- [3] Quing Liu, Xiaofeng Zhang, Bao Wang, Control Theory of Solidification and Cooling in the Process of Continuous Casting of Steel, Science and Technologies of Casting Process, 2012, doi: <u>http://dx.doi.org/10.5772/51457</u>.
- [4] Brian G. Thomas, Modeling of Continuous Casting, 2003, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh.
- [5] J. HORSKY, M. RAUDENSKY, R, MORAVEC, K. BLAZEK, HEAT TRANSFER COEFFICIENTS FOR THE SECONDARY COOLING ZONES IN A CONTINUOUS CASTING WITH THE EFFECT OF STEEL CHEMISTRY, Steelcon, 2015.
- [6] Manual ANSYS FLUENT, 2015.



3 Moduly pro optimalizaci výrobních procesů ocelárenského a hutního průmyslu

V této oblasti jsme se zaměřili na návrh a implementaci modulů pro predikci jevů během válcování za tepla a za studena s využitím pro optimalizaci technologického postupu. Zejména pak na teplotní bilanci během celého válcovacího procesu, teplotní bilanci ve válcovací mezeře a přestup tepla do válců, tlakových poměrů ve válcovací mezeře a její deformaci včetně vlivu na výstupní materiál.

Teplotní bilance materiálu během válcování za tepla

Tento model navázal na předchozí aktivity v projektu. Jeho funkcionalita byla rozšířena o reverzní válcování a dále pak o doplňující teplotní bilanci pro navíjení materiálu do svitku mezi jednotlivými úběry. Tato operace se využívá zejména pro válcování dlouhých pásů na reverzní válcovací stolici při válcování za tepla. Na rozdíl od běžného reverzního válcování, kdy materiál mezi úběry chladne na dopravníku, bylo zapotřebí uvažovat kontakt a přestup tepla mezi jednotlivými vrstvami navinutého plechu do svitku.

Na obrázku níže vidíme simulaci takto vypočítané teploty. První část grafu znázorňuje teploty z válcování bez navíjení s chladnutím na dopravnících a druhá část grafu (od 375s) pak znázorňuje teplotu materiálu během válcování ve svitku. Čas mezi jednotlivými úběry se sice prodlužuje s ohledem na narůstající délku plechu, ale teplotní ztráty jsou relativně malé, protože sálání tepla do prostoru je minimalizováno navíjením materiálu do svitku.



Teplotní model počítá teplotu v několika bodech po délce pásu a zároveň v několika bodech na tloušťce pásu, tak abychom mohli určit teplotu ve středu pásu, ale i na povrchu pásu, která se může porovnávat s měřenou teplotou pyrometrem.

Počty bodů, ve kterých se teplota počítá, jsou konfigurovatelné, aby se dal zvolit poměr mezi přesností modelu a rychlostí výpočtu.



Celý model je implementovaný v programovacím jazyce C++ a je dostupný v rámci knihovny pro výpočty v procesu válcování.

Teplotní bilance ve válcovací mezeře a ohřev válců

Tento model se zabývá teplotní bilancí ve válcovací mezeře, především pak přestupem tepla mezi materiálem a pracovními válci. Materiál ve válcovací mezeře se zároveň ohřívá přetvárnou prací a zároveň chladne kontaktem s pracovními válci, viz předchozí model. Tato část se zabývá přestupem tepla a jeho šířením pracovním válcem. Mimo teplotu pracovního válce na povrchu, která je důležitá pro celkovou teplotní bilanci, tento model počítá teplotu na celém objemu válce, z kterého se pomocí teplotní roztažnosti počítá změna průměru pracovního válce na celé délce pracovní plochy. Výsledný tvar korigovaný o teplotní nárůst je velice důležitý pro výpočet tvaru válcovací mezery a tím pro výstupní tvar materiálu z válcovací mezery.

Na obrázku níže je znázorněna simulace teploty a koruny pracovního válce po 5 válcovaných blocích, každý skládající se z 36 úběrů, opakující se s časovou prodlevou 1 hodiny. Horní graf znázorňuje celý průběh válcování trvající přes 4 hodiny a spodní graf znázorňuje teploty a profil válce po jeho délce na konci simulované produkce.



Model teplotní bilance pracovních válců je výrazně komplexnější v porovnání s modelem teplotní bilance pásu. Válec je na obvodu rozdělen na několik pásem, kde dochází k přestupu tepla. Oblast ohřevu válce od válcovaného materiálu a několik oblastí ochlazování válce chladicí kapalinou, sáláním na vzduchu nebo v kontaktu s dalšími válci.

Na objemu válce je pak válec rozdělen na konfigurovatelný počet disků a vrstev. Model pak řeší přestup tepla mezi buňkami ve všech směrech, abychom dostali kompletní mapu teplot. Také časový krok, v kterém se nové teploty počítají, je velice důležitý pro přesnost a stabilitu modelu.

Tepelná roztažnost jednotlivých buněk nám pak určí výsledný vnější profil válce.



Model je implementovaný v programovacím jazyce C++. Model je využit jak pro on-line predikci aktuální teploty a profilu na základě měřených veličin, jako je průtok chladicí kapaliny, válcovací síla a rychlost válcování, tak i pro off-line simulaci. Off-line simulace pak může sloužit pro návrh chladícího agregátu nebo pro ověření výrobního postupu na existujícím zařízení.

Tlakové poměry ve válcovací mezeře

Navazujícím modelem na model teplotní bilance pracovních válců je model průhybu a zploštění pracovních a opěrných válců. Tento model využívá metodu konečných prvků pro stanovení deformace válců. Dále tento model predikuje rozložení válcovací síly na průřezu válcovací mezerou. Výsledkem tohoto modelu je tvar válcovací mezery během válcování, který je využit pro stanovení finálního profilu materiálu na výstupu z válcovací mezery.

Obrázek níže zobrazuje rozložení válcovací síly na průřezu válcovací mezery (zelená), průhyb osy pracovního válce (modrá) a průhyb včetně zploštění pracovního válce (červená).



Tento model využívá principu soustavy nosníků zatížených nerovnoměrnou silou a zohledňuje zploštění válců dle Hertzova zákona. Metodou konečných prvků se pak hledá rovnováha mezi průhybem válce a zploštěním válce, aby síla mezi válci byla rovná celkové válcovací síle. V této fázi projektu se rozložení válcovací síly počítá vně výpočtu soustavy nosníků. V další fázi projektu bude navržen nový model, který bude již obsahovat rozložení válcovací síly. Jelikož je tento princip velice časově náročný z důvodu implementace pomocí několika vnořených iteračních cyklů, je otázka, jestli bude prakticky využitelný pro on-line řízení.

I tento model je naprogramován v programovacím jazyce C++.



Testování na datech z reálného provozu

Výše uvedené modely byly testovány a laděny na dostupných datech z reálného provozu, jak ze spojité válcovací tratě, tak i z reverzní válcovací tratě. Modely vykazují relativně spolehlivé výsledky. Celý systém bude potřeba doplnit o výpočet finálního profilu materiálu a následně doplnit celou metodu o robustní adaptaci.

Výše zmíněné modely jsou součástí jedné knihovny. Pro testování této knihovny byla vytvořena aplikace v programovacím jazyku C# .NET a s ukládáním všech vstupních hodnot a konfigurací v databázi SQL Server. Tato testovací aplikace může zároveň sloužit pro off-line výpočty úběrových plánů, simulaci teploty pásu a pracovních válců. Knihovna může zároveň být využita v komplexní aplikaci pro on-line řízení.



4 Regulátor s vnitřním modelem pro kompenzaci dopravního zpoždění a excentricity válců v procesu válcování

Jedním z komplexních problémů v oblasti válcování je problém kompenzace dopravního zpoždění, které vzniká mezi pracovními válci a senzorem tloušťky plechu. Jak je znázorněno na Obr. 7, senzor tloušťky plechu h_0 se nachází ve vzdálenosti L_0 za válcovací stolicí. Úkolem zpětnovazebního systému řízení je pomocí akčních zásahů na válcovací mezeře H(t) dosáhnout ekvivalence mezi požadovanou a skutečnou (měřenou) tloušťkou plechu. Válcovací mezera je poté řízena podřízeným regulačním obvodem. Úkolem navrhované nadřazené smyčky řízení je tedy generování set-pointu pro válcovací mezeru.



Obr. 7: Schéma válcovací stolice s vyznačením dislokované polohy sensoru tloušťky plechu za válcovací stolicí h_0

Na Obr. 8 je znázorněna typická závislost mezi změnou válcovací mezery a následnou změnou tloušťky plechu. V odezvě je patrná role dopravního zpoždění τ , které lze při konstantní rychlosti posunu plechu v_o aproximovat vztahem

$$\tau = \frac{L_0}{v_0}.$$
 (1)

Obecně je ale nutné uvažovat rychlost posunu plechu jako proměnnou v čase v(t). Celkové zpoždění je poté dáno dobou, za kterou plech urazí proměnnou rychlostí vzdálenost L_0 , tedy $L_0 = \int_0^\tau v(t) dt.$ (2)





Obr. 8: Typická závislost mezi změnou válcovací mezery a následnou změnou tloušťky plechu. Kromě efektu dopravního zpoždění je na měřené tloušťce plechu patrné zvlnění způsobené excentricitou válců

Vzhledem k problematičnosti návrhu systému řízení, který by pracoval s takto proměnným zpožděním, je tento problém vyřešen přepočtem časově závislých veličin na veličiny, jejichž proměnnou je poloha. V důsledku je (polohové) zpoždění uvažováno jako fixní, což je výhodné pro jeho implementaci v modelu a následnou kompenzaci. Na druhou stranu aproximativní model dynamických vlastností válcovací stolice je poté s proměnnými parametry. Při uvažování relativně pomalých změn rychlosti posuvu plechu, je tato proměnnost velmi dobře zvládnutelná s využitím 'gain scheduling' (tj. vazbou parametrů regulátoru na nezávislou veličinu, v tomto případě rychlost posuvu plechu v(t)). Technické řešení dané problematiky bude podrobněji analyzováno níže, po rozboru a seznámení s návrhovými rovnicemi algoritmu řízení.

Jelikož je dopravní zpoždění dominantní složkou dynamiky a vzhledem k požadavku na rychlost daného procesu válcování, je nutné zpoždění kompenzovat. Po důkladné analýze byla pro řešení kompenzace zpoždění zvolena a následně implementována metoda řízení založená na vnitřním modelu [1-4]. K tomuto účelu bylo nejprve nutné navrhnout aproximativní model. Dynamické vlastnosti polohování válcovací mezery podřízeným regulátorem je možné popsat lineárním nekmitavým modelem nízkého řádu. V dané fázi implementace byl zvolen následující model

$$G_s(s) = \frac{h_0(s)}{H(s)} = G(s)e^{-s\tau} = \frac{Ke^{-s\tau}}{Ts+1}$$
(3)

s parametry *K* a *T* aproximující statickou citlivost a dominantní časovou konstantu podsystému. Model (3) již též obsahuje dopravní zpoždění τ . Klasické schéma pro implementaci řízení s vnitřním modelem je na horní části Obr. 9. Při zakomponování modelu do zpětné vazby jsou přenosy z řídicí a poruchové výstupní veličiny dány následovně:

$$G_{wy}(s) = C(s)G(s)e^{-s\tau}$$
(4)





Obr. 9: Schéma regulačního obvodu s vnitřním modelem – horní část, a jeho úpravy pro kompenzaci periodické poruchy dané excentricitou válců – dolní část

$$G_{dy}(s) = 1 - C(s)G(s)e^{-s\tau}$$
 (5)

kde C(s) je regulátor. Aplikací klasické syntézy založené na invertovatelné části dynamiky G(s) je regulátor dán vztahem

$$C(s) = \frac{1}{G(s)}F(s),\tag{6}$$

kde F(s) je uživatelem zvolený filtr [4]. Výsledné přenosy z řídicí a regulované veličiny jsou poté dány vztahy

$$G_{wy}(s) = F(s)e^{-s\tau},\tag{7}$$

$$G_{dv}(s) = 1 - F(s)e^{-s\tau}$$
. (8)

Jak je patrné, při uvažování přesného modelu systému jsou dynamické vlastnosti dány pouze předvoleným filtrem F(s). Vzhledem k dosažení regulační smyčky konečného řádu je návrh řízení s vnitřním modelem efektivní rovněž proto, že je zpoždění dokonale kompenzováno. Ve skutečnosti je vlivem nepřesností mezi modelem a systémem stále nutné uvažovat výsledný regulační obvod jako systém nekonečného řádu. Rozbor robustnosti celého zapojení a volba filtru F(s) je nad rámec této technické zprávy. Pro příslušnou metodiku lze například odkázat na [1-4].

Aplikací výše uvedené standardní metodiky řízení s vnitřním modelem je řešena problematika kompenzace dopravního zpoždění. Dalším problémem, který je nutné řešit v rámci uzavřeného regulačního obvodu, je kompenzace excentricity válců. V minulých etapách projektu byla daná problematika řešena dopřednou vazbou na základě identifikace excentricity z harmonických signálů generované síly v hydraulickém systému, nebo přímo z harmonického signálu z čidla měření tloušťky plechu [5]. Klíčovým aspektem byla detekce amplitudy a fázového úhlu nosných frekvenčních signálů pomocí rychlé Fourierovy transformace. Tato informace byla následně využita ke kompenzaci zavedením harmonické složky s příslušnou amplitudou a fází do řídicího svstému válcovací mezery. I přesto, že se daný postup ukázal jako funkční, jeho problematickým aspektem je vysoká citlivost na správnost detekce harmonických složek účinků excentricity.





Obr. 10: Schéma 'repetitive' řízení k potlačení poruchy na výstupu

Cílem aplikovaného výzkumu reportované etapy řešení bylo navrhnout alternativní postup bez nutnosti detekce periodicity, tedy bez nutnosti aplikace systému zpracování signálu. Na základě rozboru literatury a v technické praxi používaných postupů byla pro danou implementaci zvolena metodika známá jako 'repetitive' řízení [6-8]. Motivací byl především článek [9], kde byla tato metodika aplikována přímo na problém kompenzace excentricity válců v procesu válcování. V navrženém zapojení ale nebylo dosaženo ideální kompenzace a navrženým schématem nebylo kompenzováno dopravní zpoždění.

Hlavním dosaženým výsledkem této části řešení je kombinace přístupů řízení s vnitřním modelem s cílem kompenzovat dopravní zpoždění s funkcionalitou repetitivního řízení se snahou ideálně potlačit periodickou poruchu. Základní schéma repetitivního řízení je znázorněna na Obr. 10. Spočívá v aplikaci kompenzátoru $K(s) = \frac{e^{-sT}}{1 - e^{-sT}}$ s dopravním zpožděním $T = \frac{2\pi}{\omega}$, které je rovno periodě potlačovaných kmitů s frekvencí ω . Z výsledného přenosu mezi poruchovou a regulovanou veličinou

$$G_{dy}(s) = \frac{1}{1 + \frac{e^{-sT}}{1 - e^{-sT}}C(s)G(s)} = \frac{1 - e^{-sT}}{1 + (C(s)G(s) - 1)e^{-sT}}$$
(9)

je patrné, že při uvažování stabilních dynamických vlastností uzavřeného regulačního obvodu, dojde k asymptoticky dokonalému potlačení externí periodické poruchy. Bohužel, daný kompenzátor je výrazným destabilizačním prvkem a z praktického hlediska není možné najít regulátor C(s), který by daný systém řízení stabilizoval. V praktických aplikacích je proto kompenzátor doplněn o interní filtr Q(s) ($K(s) = \frac{Q(s)e^{-sT}}{1-Q(s)e^{-sT}}$). I pro takto upravený kompenzátor není jednoduché nalézt robustně stabilizující regulátor C(s) [7].

Základní princip kombinující efekt řízení s vnitřním modelem je znázorněn v dolní části Obr. 9. Navržená modifikace spočívá zejména v úpravě délky dopravního zpoždění, respektive jeho prodloužení o ϑ tak, aby celkové zpoždění bylo bezezbytku dělitelné periodou kmitů výstupní poruchy

$$\tau \to \tau + \frac{\arg F(j\omega)}{\omega} + \vartheta = kT,$$
 (10)

kde



$$k = \left| \frac{\tau + \frac{\arg F(j\omega)}{\omega}}{T} \right| + 1.$$
(11)

Do celkového zpoždění je započítáno i zpoždění dané fázovým posunem filtru F(s) pro aktuální frekvenci kmitů ω . Po aplikaci takto injektovaného zpoždění, jsou ideální přenosy uzavřeného regulačního obvodu dány

$$G_{wv}(s) = F(s)e^{-s(\tau+\vartheta)},$$
(12)

$$G_{dy}(s) = 1 - F(s)e^{-s(\tau+\vartheta)}.$$
(13)

K ideálnímu potlačení periodické poruchy na výstupu poté postačuje navrhnout filtr, který splňuje následující rovnost

$$|F(j\omega)| = 1, \tag{14}$$

například

$$F(s) = \frac{\Omega^2}{s^2 + 2\zeta\Omega s + \Omega^2},$$
(15)

kde pro zvolený parametr $0 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$, je při splnění podmínky (14) dán druhý parametr následujícím vztahem

$$\Omega = \frac{\omega}{\sqrt{2 - 4\zeta^2}}.$$
(16)

Nevýhodou volby poměrně jednoduchého filtru (15) je jeho kmitavý charakter. Tento nedostatek může být překonán volbou filtru vyššího řádu, jehož optimalizace i z hlediska celkové robustnosti bude úkolem pro další fáze projektu.

Výsledný algoritmus řízení byl implementován v první fázi v prostředí MATLAB, kde byla ověřena na teoretických vstupních datech jeho funkčnost ve spojitém čase s podruženým vzorkováním vzdálenosti vyválcovaného plechu (v reálné aplikaci je tato veličina suplována natočením válce válcovací stolice). Ve druhé fázi byla z důvodu nasazení na programovatelném automatu (PLC) provedena časová diskretizace regulačního obvodu s konstantní (nastavitelnou) periodou vzorkování při současném vzorkování vzdálenosti vyválcovaného plechu. Kompenzační obvod tak byl realizován kombinací hlavní polohové smyčky a podřízené časové smyčky, díky čemuž dochází k účinnému vykompenzování excentricity válců, jelikož excentricita je primárně funkcí délky vyválcovaného plechu. Kompenzace excentricity je tak účinná i při průběžné změně rychlosti válcování (Obr. 11), kdy se v časové oblasti mění frekvence změny tloušťky válcovaného plechu.

Současná kombinace časové a polohové smyčky (naznačena na Obr. 12) je umožněna průběžným přepočtem časových parametrů modelu a zvoleného regulátoru na jejich hodnoty odpovídající ve smyčce vzorkování dle polohy válce. Toho bylo jednoduše docíleno výpočtem odpovídajícím vzdáleností z aktuální rychlosti válcování a dané časové konstanty bloku kompenzačního obvodu v každém vzorkovacím okamžiku.





Obr. 11: Ukázka simulačních výsledků při testování implementovaného algoritmu reagujícího na změnu rychlosti válcování

Výše popsaný kompenzační obvod byl následně v diskrétní podobě implementován v jazyce C pro účely nasazení na PLC, použitých k řízení válcovací stolice. Díky nezávislosti zvoleného programovacího jazyka na platformě bylo možné provést testování algoritmu na PC, přičemž nasazení na PLC následně vyžaduje minimální zásah do zdrojového kódu. Pro realizaci algoritmu byla zvolena modulární struktura implementovaných částí vycházejících ze schématického zapojení jednotlivých bloků výše popsaného kompenzačního obvodu. Jedná se o dva bloky zpoždění a dva dynamické bloky pro model soustavy a regulátor. Propojení jednotlivých bloků, což je zajištěno kauzálním předáváním vstupních a výstupních veličin jednotlivých bloků, což je zajištěno správným seřazením procedur v hlavním programu. Díky tomu je snazší provést případné změny jednotlivých bloků bez nutnosti měnit významnou část kódu a i jeho ladění s využitím simulačních prostředků je jednodušší. Pro realizaci zpoždění (v tomto případě polohového) byl použit osvědčený dříve realizovaný blok zpoždění v diskrétní podobě s kruhovým zásobníkem konstantní délky [5].



Obr. 12: Regulační obvod se schématickým znázorněním vzorkovacích základen



Po simulační verifikaci navrženého systému řízení s kompenzací dopravního zpoždění a excentricity válců byla provedena softwarová implementace. Celkový systém řízení zahrnuje i řešení problematiky anti-windupu při saturaci akčního zásahu, který byl navržen a publikován jako další výsledek projektu [10].

Reference

- [1] Morari M. and Zafiriou E. (1989). Robust Process Control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- [2] Yamanaka, K., and Shimemura, E. (1993). Use of multiple time-delays as controllers in IMC schemes. International Journal of Control, 57(6), 1443-1451.
- [3] Goodwin G. C., Graebe S. F. and Salgado M. E. (2000). Control System Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- [4] Zítek, P., and Hlava, J. (2001). Anisochronic internal model control of time-delay systems. Control Engineering Practice, 9(5), 501-516.
- [5] Vyhlídal, T. (2015) Softwarová modulární aplikace pro monitorování a řízení, zpráva k výsledku R balíčku 11 projektu CAK3
- [6] Hara, S., Yamamoto, Y., Omata, T., and Nakano, M. (1988). Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals. *IEEE Transactions on automatic control*, 33(7), 659-668.
- [7] Wang, L. (2016). Tutorial review on repetitive control with anti-windup mechanisms. *Annual Reviews in Control*, *42*, 332-345.
- [8] López, V. S., Costa-Castelló, R., and Ramos, G. A. (2017). Different architectures to develop repetitive controllers. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 13408-13413.
- [9] Omura, Kazuki, et al. (2015) Attenuation of roll eccentric disturbance by modified repetitive controllers for steel strip process with transport time delay. IFAC-PapersOnLine 48.17, 131-136.
- [10] Bušek J., Vyhlídal, T., and Zítek, P. (2017). IAE based tuning of controller anti-windup schemes for first order plus dead-time system, 21st International Conference on Process Control (PC), Štrbské Pleso, Slovakia, DOI: 10.1109/PC.2017.7976182



5 Modul pro řízení hydropohonu válcovací stolice

Byla provedena implementace polohování hydropohonu jako Hardware-In-the-Loop (HIL) v závislosti na předepsaném úběru materiálu válcováním. Dále na základě identifikovaného modelu hydropohonu byl sestaven a implementován estimátor válcovací síly zohledňující různé režimy polohování hydropohonu, tj. rychlé otevírání/zavírání rozváděče. Tento estimátor byl rozšířen o funkci diagnostiky poruch hydropohonu na základě podrobné znalosti modelu. Na základě naměřených dat identifikovaný model hydropohonu je implementován dvěma moduly. První modul rekonstruuje polohu šoupátka rozváděče, tj. akčního členu, na základě požadovaného zdvihu válce hydropohonu generovaného nadřazeným repetitivním regulátorem, viz obr. 13.



Obr. 13 Implementační schéma HILu pro rekonstrukci polohy šoupátka rozváděče

Na obr. 14 je ukázka sledování požadovaného zdvihu pístu implementačním schématem na obr. 13 kalibrovaným pro příslušný typ hydropohonu. Implementační schéma HILu pro rekonstrukci polohy šoupátka rozváděče využívá techniky tvarování vstupu a korekce na nepřesnosti modelu hydropohonu.



Obr. 14 Sledování požadovaného zdvihu pomocí HILu po kalibraci

Protože model hydropohonu je nelineárním elektro-hydraulickým servopohonem s nediferencovatelnými nelinearitami (tření včetně viskozního, přepínání, odmocninová nelinearita), lze ho jen obtížně linearizovat a to včetně zpětnovazební linearizace. Potom však implementační schéma na obr. 13 je složeno z nelineárních bloků výrazně citlivých na neurčitosti v parametrech hydropohonu uvedených výše. Proto jednoznačně je dána přednost modulu pro rekonstrukci polohy šoupátka před modulem pro odhad válcovací síly v robustnosti návrhu. Splněním požadavku na zdvih válce na obr. 14 je docíleno jak kompenzace excentricity válců tak zpoždění rekonstrukcí polohy šoupátka rozváděče zaznamenané na obr. 15 za kompenzace nelinearit hydropohonu. Pro kompenzaci zpoždění měření tloušťky vývalku se jako nezbytnost



ukázalo prodloužení zpoždění měření tloušťky vývalku o výpočetní zpoždění polohy rozváděče. Navíc sofistikované tvarování vstupu implementačním schématem na obr. 13 zajistí dosažení požadovaného úběru materiálu vývalku bez překmitu.



Obr. 15 Rekonstrukce polohy šoupátka rozváděče schématem na obr. 1

Druhý modul je určen k odhadu válcovací síly umožňující rovněž diagnostiku poruch hydropohonu. Přesnost odhadu však závisí na identifikaci parametrů modelu hydropohonu opakované v předem určených intervalech kvůli opotřebení nebo po výměně části hydropohonu. Nejkritičtějšími parametry z hlediska jejich proměnnosti jsou modul pružnosti olejové náplně a tuhosti zátěže hydropohonu, které jsou identifikovány separátně. Modul pružnosti olejové lázně je identifikován až jako složka souhrnné tuhosti hydropohonu bez působení zátěže. Přesnost odhadu válcovací síly nejvíce závisí právě na výše zmíněných tuhostech. Na obr. 16 je konfrontován odhad síly s naměřenou silou za předpokladu konstantní tuhosti zátěže hydropohonu identifikované jako střední hodnota tuhosti naměřené. Ukázka síly odhadnuté na obr. 16 a modelová ukázka polohování hydropohonu rychlým otevřením/zavřením rozváděče na obr. 17 byly dosaženy při střední hodnota, tj. konstanta, tuhosti zátěže hydropohonu je výsledek odhadu válcovací síly přijatelný především z pohledu detekce možné poruchy hydropohonu.



Pro zpřesnění odhadu válcovací síly je v estimátoru aplikována skutečná, tj. proměnná, tuhost zátěže hydropohonu, která je však navíc filtrována natolik, aby odstup filtrované tuhosti zátěže hydropohonu od zbytkového šumu tuhosti byl alespoň 1/100. Využitím rychlé Fourierovy transformace navržený filtr 10-tého řádu docílí filtrace tuhosti zátěže hydropohonu na obr. 19.





Obr. 18 Střední hodnota tuhosti zátěže hydropohonu

Zpřesněný odhad válcovací síly s vyfiltrovanou tuhostí zátěže je zobrazen na obr. 20, který v porovnání s odhadem válcovací síly na obr. 16 s uvažováním neměnné tuhosti zátěže dané její střední hodnotou je výrazným zlepšením odhadu.



Obr. 19 Vyfiltrovaná tuhost zátěže hydropohonu



Obr. 20 Zpřesněný odhad válcovací síly s vyfiltrovanou tuhostí zátěže

Avšak implementaci takto vyfiltrované tuhosti zátěže hydropohonu adaptující nelineární model hydropohonu včetně jeho inverze pro účely rekonstrukce polohy šoupátka rozváděče je nutné přizpůsobit možnostem PLC automatu, který je k řízení hydropohonu na válcovacích stolicích nasazován. Proto implementace filtru tuhosti zátěže hydropohonu je naplánována na rok následující rok řešení projektu.