

Dílčí výstup: Knihovna softwarových rutin pro výpočetní a optimalizační operace v systémech monitorování a řízení

Pracovní balíček: 11 - Softwarové moduly pro monitorování a řízení s využitím modelů průmyslových procesů

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku:

- České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní (ČVUT)
- PIKE AUTOMATION spol. s r.o. (PIKE)

Koordinace pracovního balíčku

- Prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, PhD (ČVUT) – garant aplikačně výzkumných činností
- Ing. Jiří Neumann (PIKE) – 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@fs.cvut.cz

1. Úvod

V souladu s aktuálními potřebami, technologickou úrovní a moderními trendy v oblastech průmyslové automatizace hutního průmyslu byly v počáteční fázi řešení projektu, na základě studie proveditelnosti, stanoveny následující aplikační oblasti (AO) výzkumu a vývoje:

- AO1) Návrh a realizace SW pro monitorování a řízení procesů chlazení ocelových plechů a pásů
- AO2) Návrh a realizace SW pro subsystémy monitorování a automatického řízení válcovacích procesů
- AO3) Aplikace moderních algoritmů řízení pro systémy s dopravním zpožděním a systémy s rozloženými parametry
- AO4) Návrh a realizace SW pro subsystémy monitorování a řízení energeticky náročných procesů

V následující části zprávy bude nejprve proveden popis realizace výstupů v jednotlivých aplikačních oblastech a poté budou uvedeny dosažené výsledky, dle klasifikace databáze RIV za rok 2013.

2. Postup prací a dosažené výstupy v jednotlivých aplikačních oblastech

AO1 - Návrh a realizace SW pro monitorování a řízení procesů chlazení ocelových plechů a pásů

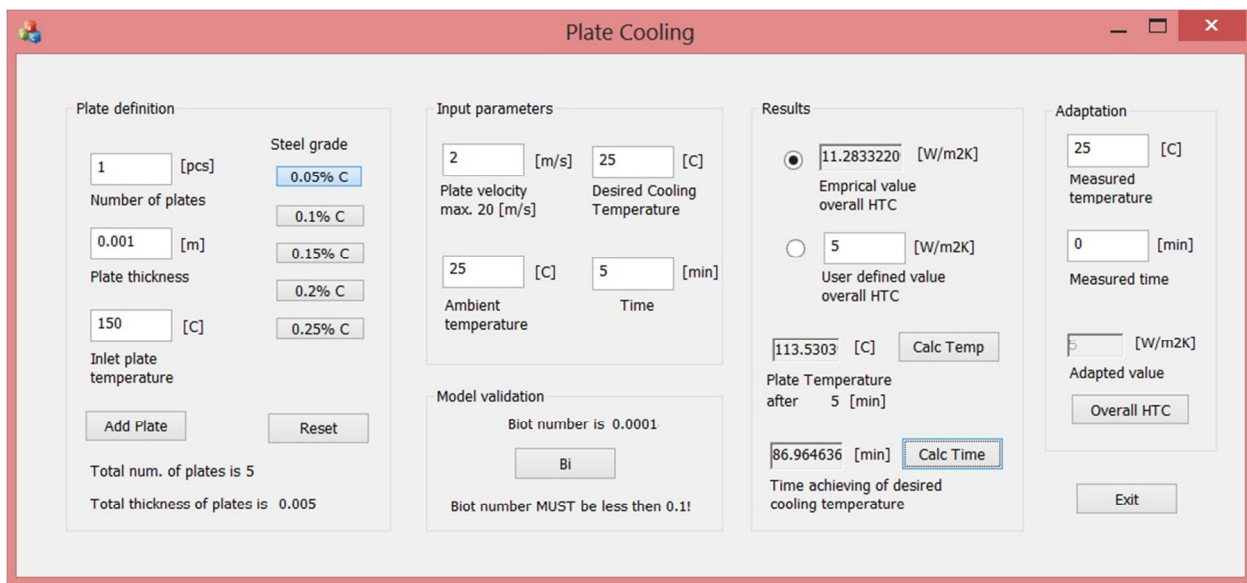
➤ *Software pro estimaci teploty chlazení plechů a pásů - Plate Cooling ver. 1.0*

V rámci činností v první etapě řešení projektu byly dopracovány modely chlazení ocelových pásů a plechů pro estimaci a optimalizaci doby chlazení. Návazně, na základě modelů ochlazování jednotlivých plechů na chladníku či volně naskládáných na sebe, byl vytvořen software pro výpočet teploty plechů v daném okamžiku. Dalším výstupem je estimace doby ochlazování plechů na požadovanou teplotu. Základ zde použitého modelu tvoří Newtonův zákon ochlazování. Vzhledem k tomu, že pracovní teploty v těchto procesech ochlazování jen výjimečně přesahují 200 °C, lze zanedbat přenos tepla sáláním. Tepelná vodivost uvažovaných ocelí je dostatečně velká a je předpokládáno množství naskládáných plechů nepřesahujících tzv. kritickou výšku, do které se tento proces může modelovat jednodušším modelem se soustředěnými parametry. Nicméně, správnost volby daného modelu se pro konkrétní případ ověřuje pomocí bezrozměrového Biotova čísla.

Základní úkoly, řešené SW implementací sestaveného modelu, tedy jsou:

- výpočet teploty plechů v daném okamžiku
- doba ochlazování plechů na požadovanou teplotu
- adaptace součinitele přestupu tepla konvekci

Software k tomuto modelu byl napsán v jazyce C++ a veškerá jeho komunikace s uživatelem se provádí přes intuitivně ovládané grafické rozhraní, viz. Obr. 1. Toto rozhraní se skládá z pěti skupin ovládacích prvků. SW umožňuje též integraci do nadřazeného informačního řídicího systému.



The screenshot shows the 'Plate Cooling' software window. It is divided into four main sections: 'Plate definition', 'Input parameters', 'Results', and 'Adaptation'.
Plate definition: Includes fields for 'Number of plates' (1), 'Plate thickness' (0.001 m), 'Inlet plate temperature' (150 °C), and 'Steel grade' (0.05% C). Buttons for 'Add Plate' and 'Reset' are present.
Input parameters: Includes 'Plate velocity' (2 m/s), 'Desired Cooling Temperature' (25 °C), 'Ambient temperature' (25 °C), and 'Time' (5 min). A 'Model validation' section shows 'Biot number is 0.0001' and a 'Bi' button.
Results: Shows 'Empirical value overall HTC' (11.2833220 W/m²K) and 'User defined value overall HTC' (5 W/m²K). It also displays 'Plate Temperature after 5 [min]' (113.5303 °C) and 'Time achieving of desired cooling temperature' (86.964636 min). Buttons for 'Calc Temp' and 'Calc Time' are available.
Adaptation: Includes 'Measured temperature' (25 °C), 'Measured time' (0 min), and 'Adapted value' (5 W/m²K). An 'Overall HTC' button is at the bottom.

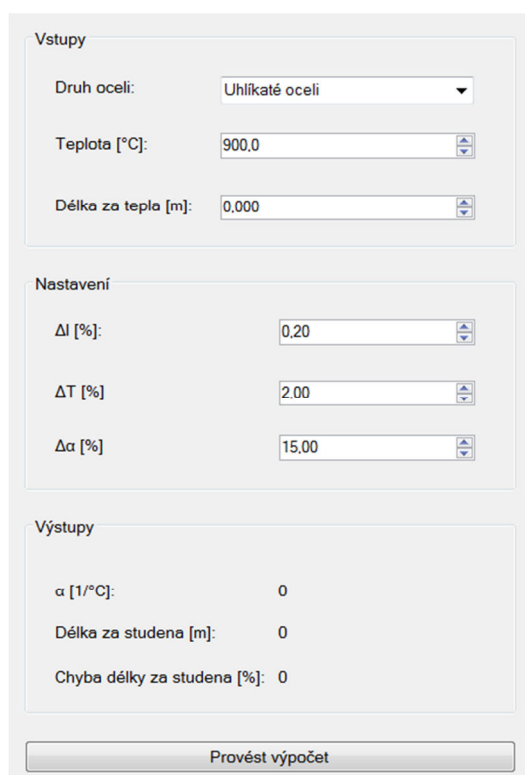
Obr. 1 – Uživatelské rozhraní k SW aplikaci Plate Cooling ver. 1.0

Jak je patrné z Obr. 1, dvě skupiny ovládacích prvků v levé části tohoto rozhraní jsou určeny pro zadávání vstupních dat a parametrů. Skupina *Plate definition* je určena pro definování použitých plechů, jejich počtu, tloušťky, vstupní teploty a materiálu, z něhož jsou vyrobeny. Druhá zmíněná skupina ovládacích prvků s názvem *Input parameters* se vztahuje na parametry procesu: rychlost posuvu jednotlivých plechů, teplota okolního prostředí, žádaná teplota, na kterou se mají plechy ochlazovat, a doba ochlazování. Další dvě skupiny ovládacích prvků po pravé straně jsou určeny pro výsledky výpočtu a ladění modelu na základě naměřených dat, pokud jsou k dispozici. Skupina *Results* obsahuje čtyři textová pole, ze kterých tři udávají výsledky výpočtů, a jedno se používá k zadávání součinitele přestupu tepla konvekcí definovaného uživatelem, nebo jeho adaptované hodnoty. Ve spodní části této skupiny jsou umístěna dvě tlačítka. Stisknutím tlačítka *Calc temp* se spouští výpočet, který jako výsledek uvádí dosaženou teplotu po době definované uživatelem v textovém poli s názvem *Time*. Spodní tlačítko *Calc time* spouští část výpočtu, která určí, za jakou dobu bude dosažena žádaná teplota definovaná v textovém poli *Desired Cooling Temperature*. Program ještě umožňuje adaptaci parametrů modelu, pokud jsou k dispozici naměřená data z modelovaného procesu. Tato adaptace se spouští opakovaným stisknutím tlačítka *Overall HTC*. Tímto se může výrazně zvýšit přesnost modelu, zvláště když se tento model používá při mezních hodnotách Biotova čísla. Detailní návod na používání tohoto programu a ovládání jeho prvků je dán v rámci nápovědy a manuálu.

➤ Přepočet délky vývalku za tepla na délku za studena

Dalším řešeným tématem bylo vypracování metodiky pro odhad délky vývalků za studena při znalosti jejich délky za tepla a to včetně vyhodnocení chyby vypočtené délky při znalosti relativních chyb měření teploty, délky a neurčitosti koeficientu teplotní roztažnosti pro různé typy materiálu a to včetně uvažování rekrystalizačních jevů. Okrajové podmínky pro přepočet délky byly stanoveny ve spolupráci s firmou PIKE takové, aby odhad maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku při teplotě 20 °C byl $\pm 0.035 \%$ a to pro 96 % měření délek vývalků v dané sérii. Z provedené analýzy chyb vyplývá, že největší vliv na maximální relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena mají relativní chyba měření délky vývalku za tepla a relativní chyba měření

teploty vývalku. Naopak nejnižší vliv na maximální relativní chybu výpočtu délky vývalku za studena má relativní chyba určení koeficientu teplotní roztažnosti, jejíž relativní chyba může být až $\pm 10\%$, aniž by došlo k překročení povolené meze maximální relativní chyby výpočtu délky vývalku za studena. Přesto tato na první pohled dostatečná rezerva na chybu určení koeficientu teplotní roztažnosti nemusí být u některých druhů ocelí dostatečná, týká se to především běžných válcovaných (nelegovaných či mikrolegovaných) ocelí. Důvodem je významná závislost koeficientu teplotní roztažnosti na teplotě materiálu především v blízkosti kolem Curie teploty a teploty rekrytalizační, v kterých nastávají body nespojitosti. Curie teplota je definována pod 800°C , zatímco rekrytalizační teplota překračuje 900°C . Jelikož k dělení vývalku dochází až po vyválnování vývalku, tak teplota vývalku při dělení je daleko pod rekrytalizační teplotou, tedy nižší než 900°C , ale zároveň bývá nad 800°C , tedy o dost vyšší než Curie teplota.



Vstupy	
Druh oceli:	Uhlíkaté oceli
Teplota [°C]:	900,0
Délka za tepla [m]:	0,000

Nastavení	
Δl [%]:	0,20
ΔT [%]:	2,00
$\Delta \alpha$ [%]:	15,00

Výstupy	
α [1/°C]:	0
Délka za studena [m]:	0
Chyba délky za studena [%]:	0

Provést výpočet

Obr. 2 Okno programu pro výpočet délky vývalku za studena

Výsledný matematický model pro přepočtení délky vývalku za tepla na délku za studena je implementován v rámci programu vytvořeného v jazyce C#. Grafickým rozhraním programu pro výpočet délky vývalku za studena je okno na obr. 2, ve kterém se zadávají vstupy (druh oceli, teplota vývalku, délka vývalku za tepla) a nastavení relativních chyb měření (teploty vývalku, délky vývalku za tepla a koeficientu teplotní roztažnosti). Výstupy, tedy počítanými veličinami, jsou koeficient teplotní roztažnosti oceli, délka vývalku za studena a relativní chyba jejího výpočtu. Celkem tedy se okno programu skládá ze tří panelů, panelu pro vstupy, nastavení a výstupy. Samotný výpočet výstupů, tj. koeficientu teplotní roztažnosti, délky vývalku za studena a její relativní chyby, se uskuteční stisknutím tlačítka „Provést výpočet“. Součástí programu je také manuál s vestavěným helpem. Uvedené algoritmy byly též SW implementovány pro první (PLC) vrstvu řídicího systému.

AO2 - Návrh a realizace SW pro subsystémy monitorování a automatického řízení válcovacích procesů

➤ Modely válcování

Součástí řešených činností v balíčku 11 byl též návrh a implementace estimačních a prediktivních algoritmů využívajících modelů válcování v kombinaci s optimalizačními metodami. Vyvinuté metody pro optimalizaci modelů válcování vedou k co nejrobustnější a pokud možno jednoduché struktuře modelu válcování. Jde tedy o co největší „odolnost“ modelů válcování vůči změnám v metalurgických, fyzikálních a geometrických vlastnostech modelů. Obecně nedostatečná znalost metalurgických vlastností, především mikrostruktury válcovacích ocelí, resp. velikosti zrna a jeho struktury, nedovoluje příliš robustní odhad modelů válcování. Tento deficit ve znalosti metalurgických vlastností je v drtivé většině případů způsoben obtížnou měřitelností těchto veličin. Přitom navíc je nutné si uvědomit, že metalurgicko-termomechanické vlastnosti jako modul pružnosti oceli, modul pružnosti válcovací stolice, specifické teplo, jsou teplotně závislé. Z tohoto důvodu byl vyvinut jednokrokový model predikce teploty, kde tzv. jeden krok představuje predikci teploty na následující válcovací stolici ze znalosti teploty na té předcházející. Z pohledu optimalizace modelů válcování jsou nejvýznamnějšími veličinami druh oceli („steel grade“), rychlost deformace a redukce materiálu. Druhem oceli se v metalurgii myslí chemické složení oceli, které určuje hustotu oceli jako další metalurgické veličiny nezbytné pro jednokrokový model predikce teploty. Rychlost deformace se podařilo odhadovat lineárním regresním modelem, který byl otestován na experimentálních datech válcování poskytnutých firmou PIKE. Díky dobrému odhadu rychlosti deformace a analýze experimentálních dat válcování je modifikována obvykle používaná Misakova formule pro výpočet přetvárného odporu (jinak řečeno meze v kluzu za tepla) do čistě exponenciálního vztahu (tj. přetvárný odpor se postupně stolice od stolici zvyšuje exponenciálně).

Z geometrických veličin je nejdůležitější již výše zmíněná redukce materiálu. Přesto pro přesný výpočet válcovacích sil na jednotlivých válcovacích stolicích je nezbytné stanovit tzv. geometrický faktor, který kompenzuje vliv dynamicky se měnící tloušťky ve společném dotykovém oblouku pracovního válce s válcovaným materiálem. Tento geometrický faktor je zjištěn empiricky analýzou experimentálních dat, který je následně aplikován v upraveném Alexander-Ford vztahu. Výše zmíněné algoritmy, tj. jednokrokový model predikce teploty, lineární regresní model pro odhad rychlosti deformace, exponenciální vztah pro výpočet přetvárného odporu a nakonec upravený Alexander-Ford vztah, jsou implementovány v rámci programu vytvořeném v jazyce C#. Grafické uspořádání programu s názvem Hot Strip Mill Model (HSMM) je složeno z hlavního, viz obr. 3, a výsledkového okna, viz obr. 4. Hlavní okno se skládá ze dvou panelů a sice panelu geometrie a metalurgie, přitom panel metalurgie má vestavěný další panel s modelem jednokrokové predikce teploty. Výsledkové okno na obr. 4 se dále skládá ze tří panelů, panelu přetvárného odporu (resp. meze kluzu za tepla), panelu válcovací síly a nakonec panelu mezery mezi pracovními válci. Po bezchybném ověření jak geometrie pomocí tlačítka „Draft schedule“ tak metalurgie pomocí tlačítka „Predict“ stisknutím tlačítka „Roll Force Evaluation“ je vyvoláno nové okno na obr. 4 pro účely výpočtu válcovacích sil a kvantifikaci mezer mezi pracovními válci, nezbytnými k faktickému dosažení naplánovaných (předepsaných) tloušťek pásu a plechu na jednotlivých válcovacích stolicích. Výpočet válcovacích sil předpokládá nejdříve výpočet přetvárného odporu, proto až po výpočtu přetvárného odporu a ověření správnosti tohoto výpočtu stisknutím tlačítka „Compute“ je možné vypočítat válcovací sílu stisknutím příslušného tlačítka „Evaluate“. Nakonec, stisknutím dalšího tlačítka „Evaluate“ jsou zjištěny požadované mezery mezi pracovními válci. Všechny důležité výsledky vypočtené programem HSMM jsou automaticky uloženy do aplikací Microsoft Office v okamžiku zavření výsledkového okna na obr. 4. Součástí programu je také „help“ a současně manuál v jednom dokumentu s popisem a řešením chybových zpráv.

Hot Strip Mill Parameters

Geometry

Number of Finishing Mills ▼

0.0000 ▲▼ Final strip thickness [mm] Draft schedule

0.0000 ▲▼ Initial strip thickness [mm]

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Reduction [%]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Exit thickness [mm]
100.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Width [mm]
500.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Length [mm]
100.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Roll diameter [mm]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Circumferential speed [m/s]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Forward slip [%]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Length of contact arc [mm]
0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	0.0000 ▲▼	Contact time [s]

Metallurgy

Steel grade ▼

0.00 ▲▼ Density [kg/m3] Chemical content [%]

C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	V	Cu	Ti	Nb	Mo
0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼	0.000 ▲▼

Temperature model

0.0000 ▲▼ Final strip temperature [°C] Predict

0.0000 ▲▼ Initial strip temperature [°C]

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Overall heat transfer 1 [10 ⁻⁴ W/Km2]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Overall heat transfer 2 [10 ⁻³ W/Km2]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Ambient temperature [°C]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Roll surface temperature [°C]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Exit temperature [°C]

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Mill modulus [kN/mm]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Young modulus [GPa = kN/mm2]
0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	0.00 ▲▼	Material hardness [kN]

Roll Force Evaluation

Obr. 3 Hlavní okno programu HSMM ver. 1.0 se dvěma panely (geometrie, metalurgie) a jedním vestavěným panelem (model predikce teploty)

Roll Force Model Parameters

Hot yield strength

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Linear regression offset
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	Linear regression coef.
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Strain exponent
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Strain rate exponent
100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Grain size [um]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Carbon equivalent
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Strain [-]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Strain rate [1/s]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Hot yield strength [MPa]

Compute

Roll force

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Geometrical factor
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Roll force [MN]

Evaluate

Roll gap

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Roll gap [mm]

Evaluate

Obr. 4 Výsledkové okno v programu HSMM se třemi panely (přetvárný odpor, válcovací síla a válcovací mezera)

AO3 - Aplikace moderních algoritmů řízení pro systémy s dopravním zpožděním a systémy s rozloženými parametry

AO3.1 Aplikovaný výzkum v oblasti řízení systémů se zpožděním

➤ Dimenzionální analýza a návrh parametrů PID regulátorů

Cílem této části výzkumu bylo uplatnění teorie fyzikální podobnosti v syntéze regulačního obvodu s PID regulátorem a zpožděním. Užitím podobnostních kritérií k bezrozměrnému popisu regulačního obvodu se docílí významného zobecnění v pojetí dynamiky. Například místo kritické frekvence zaujímá její roli kritický úhel a místo rozměrových koeficientů modelu je dynamika řízené soustavy vyjádřena bezrozměrovými parametry tzv. zpožděnosti a kmitavosti.

Při obvyklé bezrozměrové interpretaci vstupu a výstupu regulátoru řádky dimenzionální matice regulační smyčky pro „délku“, „hmotnost“, „teplotu“, resp. další lze vypustit a tuto matici regulační smyčky uvažovat jako jednořádkovou, obsahující pouze řádek „čas“. Do této matice zahrneme veličiny modelu soustavy, jejího zpoždění, její kritické frekvence a parametrů regulátoru. Hlavním cílem je pro dynamicky podobné regulované soustavy dostat totožné bezrozměrové modely i regulátory. Z aplikace Buckinghamova teorému vyplynou další vztahy pro veličiny jako kritická frekvence, resp. úhel, anebo vztahy pro bezrozměrové zesílení integrace a derivace v regulátoru dané umístěním trojice dominantních pólů regulační smyčky. Dominantnost při výběru těchto předepsaných pólů je optimalizována ve smyslu kritéria IAE podle tzv. indexu dominantnosti. Výsledky tohoto výzkumu jsou publikovány v [4] a [5], kde je též rozpracováno původní kritérium přírůstku argumentu pro kontrolu dominantnosti umísťovaných pólů.

➤ Původní řešení saturace akčního orgánu pro regulátor systému se zpožděním

Zvláštní část výzkumu byla věnována novému pojetí úlohy saturace akčního orgánu regulace s přihlédnutím ke specifickým vlastnostem systémů se zpožděním. K dosažení obecnější platnosti výsledků byl ke specifikaci řízeného procesu využit bezrozměrový model z předchozího odstavce této zprávy. Technika zabezpečení saturace je sice založena na známém principu zpětné vazby od signálu saturační odchylky, je však zásadně změněn postup jejího seřízení. Místo obvyklé minimalizace saturační odchylky je seřízení navrženého „wind-up“ zapojení založeno na minimalizaci IAE kritéria regulační odchylky a tím se stává nedílnou součástí seřízení regulačních parametrů. Výsledky tohoto výzkumu budou publikovány v samostatné kapitole knihy [1], kde je tento původní přístup k optimalizaci saturace regulátoru popsán.

➤ Návrh a implementace tvarovačů signálu se zpožděním

Procesy válcování, ale i například manipulace s materiálem pomocí různých typů jeřábů, vyžadují aplikaci sofistikovaných algoritmů tlumení vibrací a oscilací. Jednou z možností potlačení nežádoucích kmitavých odezvy v těchto systémech je zakomponování tvarovačů signálu s dopravním zpožděním do řídicí smyčky daného procesu. V rámci aplikovaného výzkumu byl navržen první koncept využití inverzních tvarovačů se zpožděním v rámci regulační smyčky, který byl popsán v článku [3] a byl prezentován na workshopu Delsys [6]. Předběžný výzkum v dané oblasti indikoval potřebu teoretického výzkumu, který je od počátku roku 2013 řešen v rámci souběžného projektu GAČR. Jeho aplikační výstupy budou návazně využity a implementovány v rámci projektu ČAK.

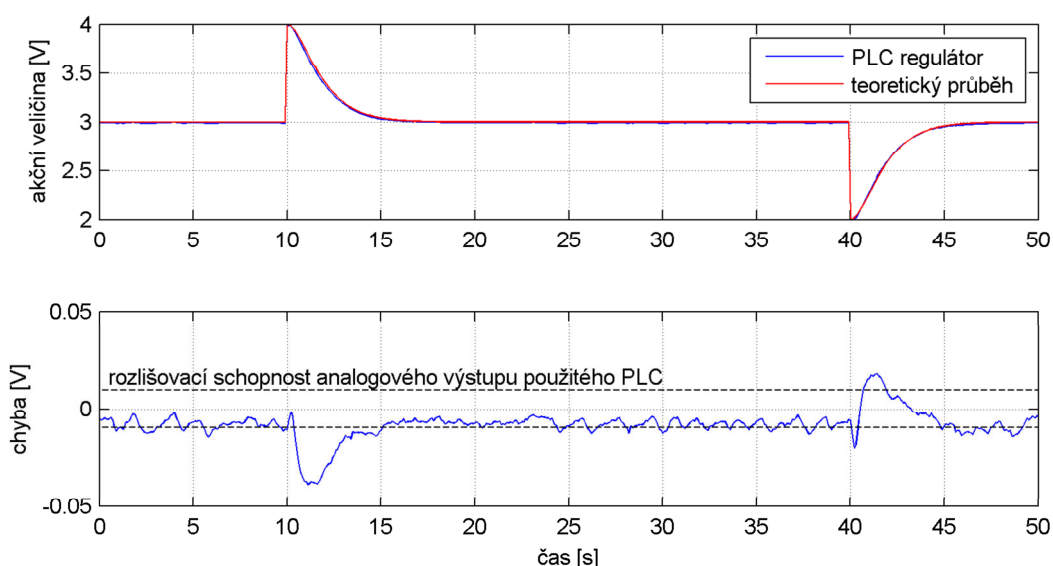
➤ Algoritmy pro identifikaci parametrů systémů se zpožděním

V návaznosti na výzkum řešený v předchozím projektu CAK byla navržena původní metodika pro identifikaci parametrů systémů s dopravním zpožděním. Metodika, která je popsána v článku [2], bude v následujících etapách projektu dopracována do podoby SW modulu pro její průmyslové nasazení.

AO3.2 Moderní typy algoritmů a regulátorů pro úroveň PLC

➤ Rutiny pro tvorbu složitějších algoritmů řízení

Pro jednoduchou a efektivní implementaci složitějších algoritmů řízení do PLC byly naprogramovány vybrané algoritmy k realizaci numerických metod řešení obyčejných diferenciálních rovnic s pevnou délkou kroku, resp. periody vzorkování. Tyto numerické metody lze následně snadno využít v implementaci téměř libovolného regulátoru či soustavy v programovacím jazyce PLC za použití deklarace dynamické soustavy pomocí LTI modelu. Primárně byly implementovány maticové operace sčítání a násobení za použití algoritmů založených na programových cyklech nad dvourozměrnými poli, pomocí nichž jsou v PLC matice definovány. Součástí implementace je kontrola rozměrů uživatelsky definovaných matic s hlášením chyb. Numerické řešení obyčejných diferenciálních rovnic je realizováno pomocí Adams-Bashforth vícekrokových numerických metod, z nichž je možné volit mezi prvním až čtvrtým řádem metody dle požadované přesnosti a výpočetní náročnosti. Součástí numerických metod je kontrola dodržení/zaručení předvolené periody vzorkování ve výpočetním cyklu PLC pro případ nárůstu času programového cyklu uživatelského programu, které by mohlo mít za následek numerické nepřesnosti, jak je demonstrováno na Obr. 5. Bloková struktura implementace algoritmu numerického řešení obyčejných diferenciálních rovnic umožňuje využití ve struktuře složitějších regulátorů a dalších typů algoritmů.



Obr. 5 Názorné srovnání přesnosti A-B numerických metod implementovaných v PLC a spojitě soustavy simulované analogovým signálem (nahore) s ukázkou rozdílu hodnot (dole)

Součástí programových rutin je také blok zpoždění, který slouží k implementaci algoritmů řízení založených na modelech s dopravním zpožděním. Algoritmus využívá interpolaci hodnot zpožďované veličiny v kruhovém zásobníku pevné délky s manuální či automatickou volbou periody vzorkování. Interpolace se provádí volitelně pomocí Lagrangeových polynomů až čtvrtého řádu, což zajišťuje dostatečně přesný dopočet mezilehlých hodnot zpožděné veličiny mezi okamžiky vzorkování.

Navržené algoritmy jsou ve formě komplexních matematických rovnic využívajících různé aritmetické funkce. Z tohoto důvodu byl pro SW implementaci vybrán programovací jazyk strukturovaného textu ST („Structured Text“), který je vhodný zejména pro programování složitých algoritmů a aritmetických funkcí. Jazyk strukturovaného textu ST je definován normou IEC 61131-3. S využitím vytvořených blokových modulů byly sestaveny následující typy regulátorů a algoritmů.

➤ **PID regulátor se dvěma stupni volnosti**

Jako první a testovací algoritmus byl sestaven a naprogramován známý algoritmus PID regulátoru se dvěma stupni volnosti. Kromě aktivní části algoritmu, byla implementována běžná opatření podmiňující možnost aplikace v řízení průmyslových procesů, např. ošetření antiwindupu, beznárazové přepínání režimů, ošetření derivační složky, atd.

➤ **Regulátor založený na inverzi dynamiky**

Regulátor založený na inverzi dynamiky využívá bezrozměrného popisu pevně daného modelu regulované soustavy, který je popsán třemi uživatelsky dostupnými parametry. Regulátor nekonečného řádu (IMC) ve stavové formulaci je doplněn stavovou zpětnou vazbou pro zajištění anti-windupu. Pevná struktura regulačního obvodu je převedena do diskrétní podoby a implementována za použití naprogramovaných numerických metod.

➤ **Smithův prediktor v kombinaci s PID regulátorem**

Algoritmus řízení je postaven na využití Smithova prediktoru pro regulaci soustav s dopravním zpožděním v kombinaci s konvenčním PID regulátorem. Implementace využívá rutin pro numerické řešení obyčejných diferenciálních rovnic, do kterých byla pevná struktura regulačního obvodu převedena, a bloku zpoždění. Uživatelé jsou dostupné základní parametry pro nastavení regulačního pochodu a volba periody vzorkování. Součástí implementace je anti-windup řešení, které je důležitou součástí reálných aplikací regulátorů.

➤ **Tvarovače signálu s dopravním zpožděním**

S využitím bloků dopravního zpoždění a numerické integrace byly implementovány různé typy tvarovačů signálu s různými distribucemi zpoždění a to jak v klasické, tak i inverzní implementaci.

AO4 - Návrh a realizace SW pro subsystémy monitorování a řízení energeticky náročných procesů

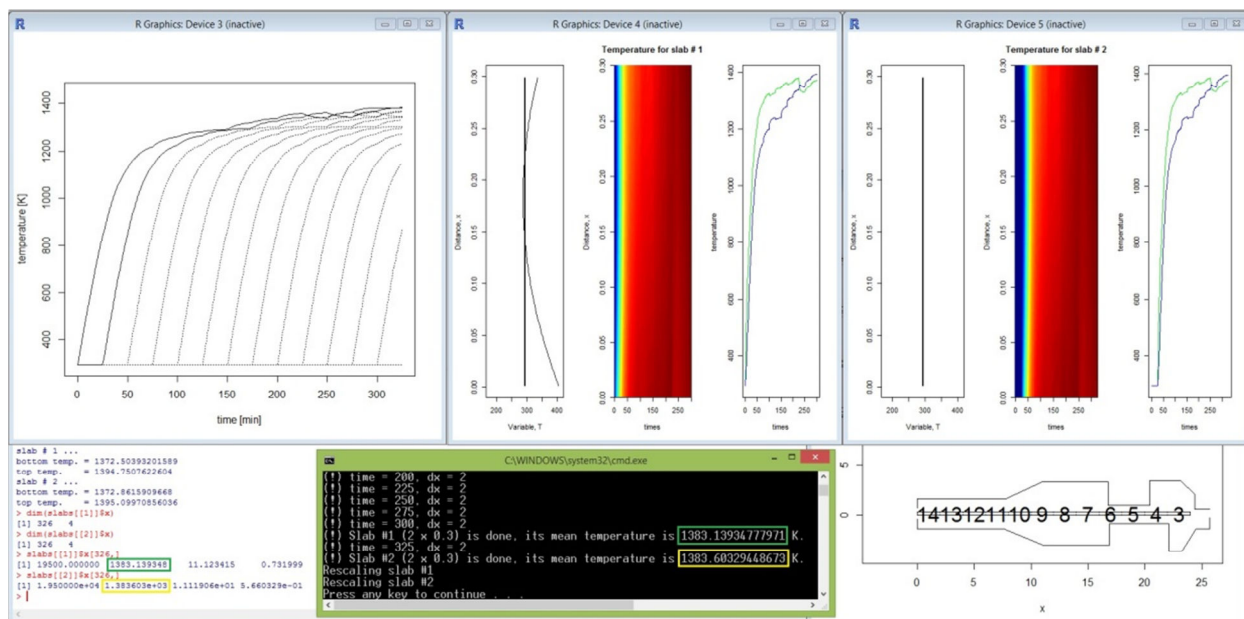
Pozn. Výzkum a vývoj pokračoval zejména v oblasti optimalizace řízení plynových průběžných pecí pro ohřev oceli před válcováním, a to v návaznosti na ukončený projekt programu TIP firmy PIKE.

➤ **Metoda Monte Carlo pro výpočet matice 'viewing faktorů'**

Jako nový prvek portfolia pecních modelů firmy PIKE vznikl modul pro výpočet tzv. viewing faktorů využívající metodu Monte Carlo. Pro zpřesnění řešení sálavého přenosu tepla byla provedena úprava výpočtů matice tzv. viewing faktorů. Matice popisuje vzájemný vliv sálavých energetických toků z různých ploch geometrie pece. Dříve používané analytické vzorce vedly k nepřesnostem a neúměrně zvyšovaly dobu výpočtu. Z tohoto důvodu bylo využito k výpočtu metody Monte Carlo. Jde o stochastickou metodu využívající pseudonáhodná čísla. Výhodou této metody je možnost snadného zahrnutí různých typů překážek, např. sousední bramy, různě tvarované stěny pece, atd. Metoda Monte Carlo vedla k výraznému usnadnění definice a adaptace tvaru pece, dle požadavků aktuální zakázky. S využitím viewing faktorů určených metodou Monte Carlo, byly následně odvozeny nové rovnice pro tepelný tok do/ze ocelových bram/sochorů. S využitím těchto nových metod došlo ke zpřesnění matematicko-fyzikálního modelu průběžné ohřívací pece a její zobecnění na libovolný tvar. Tímto způsobem bude při identifikaci reálné pece možné snadno ladit matematický model, a tím zkrátit předprovozní fázi implementace řídicího systému. Matematický model byl dále převeden na použitelnější formu s využitím tzv. Galerkinovy metody převodu parciálních diferenciálních rovnic vedení tepla na obyčejné diferenciální rovnice. Modifikovaný model byl nejprve testován v programech Matlab a R a poté byl implementován v C++ a C# ve Visual Studiu, viz. např. Obr 6.

➤ **Modely tvorby okují v průběžných pecích**

Dalším aktivitou v rámci dané aplikační oblasti byly činnosti spojené s tvorbou modelů růstu okují při ohřevu ocelových sochorů v průběžných pecích. Model byl vytvořen za předpokladu využití zemního plynu jako paliva, kde dominantní složku tvoří metan CH_4 . Pro toto palivo se podařilo nalézt výpočet jednotlivých složek spalín na základě poměru plynu a spalovacího vzduchu. Vzhledem k tomu, že se analyzátory spalín běžně v technologii průběžných pecí nepoužívají, musí se poměr jednotlivých složek získat na základě výpočtů a aproximačních vztahů. Jelikož k oxidaci, která je dominantní příčinou růstu okují, může dojít teprve tehdy, pokud teplota v peci přesáhne $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vrstva okují ale začíná být patrná a měřitelná teprve tehdy, když teplota spalín v peci přesáhne rekrytalizační teplotu cca $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Samotný model spočívá ve využití tzv. Arrheniova zákona. Z navržené metodiky vyplývá požadavek minimalizace doby, kdy se sochory nacházejí v zónách pece s teplotou nad $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. V těchto zónách je také žádoucí snižovat hodnotu vzdušného součinitele. Daná metodika bude v navazujících etapách projektu dopracována do podoby funkčního SW modulu.



Obr. 6 Porovnání implementace matematického modelu pece v programu R a jeho implementace v C# a C++ ve Visual Studiu

3. Dosažené výsledky dle struktury databáze RIV

1 x R- software

Název výsledku: *Knihovna softwarových rutin pro výpočetní a optimalizační operace v systémech monitorování a řízení*

Knihovna se skládá z následujících SW řešení:

a) SW rutiny pro návrh a implementaci výpočetních operací a řídicích algoritmů:

Tato část SW knihovny, která vznikla jako výsledek aplikační AO3, je zaměřena na první, PLC vrstvu řídicích systémů. V rámci implementace algoritmů modelování a řízení na úrovni PLC byly naprogramovány jak základní algoritmy řízení, jakým je např. realizovaný PID regulátor se dvěma stupni volnosti doplněný anti-windup opatřením, tak rutiny pro tvorbu složitějších algoritmů řízení. Mezi tyto rutiny patří algoritmy umožňující implementaci (LTI) regulátoru s využitím základních maticových operací na úrovni PLC pro numerické řešení ODE. Dále byl vytvořen blok zpoždění umožňující realizaci libovolného zpoždění vstupního signálu nezávisle na periodě jeho vzorkování a velikosti dostupného zásobníku v PLC. Mezi složitější realizované algoritmy řízení dále patří regulátor založený na inverzi dynamiky, konkrétně regulátor nekonečného řádu (IMC) ve stavové formulaci, který je doplněn stavovou zpětnou vazbou pro zajištění anti-windup opatření, Smithovo zapojení PID regulátoru a implementace tvarovačů signálu s dopravním zpožděním. Součástí

jednotlivých bloků je kontrola dodržení/zaručení předvolené periody vzorkování ve výpočetním cyklu PLC pro případ nárůstu času programového cyklu uživatelského programu.

b) SW rutiny a sub-moduly pro výpočetní vrstvu řídicích systémů

Tato část SW knihovny, která vznikla jako výsledek aplikačních oblastí AO1, 2 a 4, se skládá z ucelených sub-modulů pro výpočetní a optimalizační operace vyšších vrstev řídicích systémů. S využitím dosažených výsledků aplikovaného výzkumu byly konkrétně implementovány následující softwarové sub-moduly:

- SW aplikace pro modelování chladnutí ocelových plechů a pásů, včetně uživatelského rozhraní (AO1)
- SW aplikace pro přepočet délky za tepla na délku za studena s vyhodnocením relativní chyby, včetně uživatelského rozhraní (AO1)
- SW aplikace pro parametrizaci válcovací tratě, včetně uživatelského rozhraní (AO2)
- Výpočetní modul tzv. viewing faktorů pro návrh energetického toku do materiálu při průchodu průběžnou pecí (AO4).

Výzkumné aktivity související s tvorbou Softwarové knihovny vedly, v souladu s návrhem projektu, též k následujícím publikačním výsledkům

2 x D – článek ve sborníku

- Zítek, P. - Fišer, J. - Vyhlídal, T.: Dominant three pole placement in PID control loop with delay. In Proceedings of the 9th Asian Control Conference (ASCC 2013). New York: IEEE Control System Society, 2013, . ISBN 978-1-4673-5767-8.
- Vyhlídal, T. - Hromčík, M. - Kučera, V.: Inverse signal shapers in effective feedback architecture. In Proceedings of the European Control Conference. Zurich: European Control Association, 2013, p. 4418-4423. ISBN 978-3-952-41734-8.

1 x Jimp – článek v odborném časopise

- Zítek, P. - Fišer, J. - Vyhlídal, T.: Dimensional analysis approach to dominant three-pole placement in delayed PID control loops. Journal of Process Control. 2013, vol. 23, no. 8, p. 1063-1074. ISSN 0959-1524.

Reference

- [1] Zítek P., Bušek J., Vyhlídal T. (2013), Anti-windup Conditioning for Actuator Saturation in Internal Model Control with Delays, to appear in edited book Volume of the Springer Series Advances in Delays and Dynamics, Vol. 2.
- [2] Simeunovic G., Zítek P., Vyhlídal T., (2013), Separate Identification of Coefficients and Delays of Time Delay Systems, to be submitted to Journal of Process Control.
- [3] Vyhlídal, T. - Hromčík, M. - Kučera, V.: Inverse signal shapers in effective feedback architecture. In Proceedings of the European Control Conference. Zurich: European Control Association, 2013, p. 4418-4423. ISBN 978-3-952-41734-8.

- [4] Zítek, P. - Fišer, J. - Vyhlídal, T.: Dominant three pole placement in PID control loop with delay. In Proceedings of the 9th Asian Control Conference (ASCC 2013). New York: IEEE Control System Society, 2013, . ISBN 978-1-4673-5767-8.
- [5] Zítek, P. - Fišer, J. - Vyhlídal, T.: Dimensional analysis approach to dominant three-pole placement in delayed PID control loops. Journal of Process Control. 2013, vol. 23, no. 8, p. 1063-1074. ISSN 0959-1524.
- [6] Tomáš Vyhlídal, Martin Hromčík, Vladimír Kučera, Signal shapers in feedback loops, aspects of arising neutrality in vibration compensation, prezentace na 1st “DeISys” Workshop on Observers and Controllers for Complex Dynamical Systems, Emphasizing Low-order Controllers, 20-22 November 2012, Supélec / L2S, Paris, France.