



# Dílčí výstup: Softwarová modulární aplikace pro 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 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@fs.cvut.cz](mailto:tomas.vyhlidal@fs.cvut.cz)

## Obsah

1. Úvod .....	3
2. Postup prací a dosažené výstupy v jednotlivých aplikačních oblastech .....	4
2.1 Návrh a realizace SW pro monitorování a řízení procesů chlazení ocelových plechů a pásů (AO1) .....	4
Estimátor teplot vývalku na stolicích válcovací tratě .....	4
2.2 Návrh a realizace SW pro subsystemy monitorování a automatického řízení válcovacích procesů (AO2) .....	7
Aplikace pro optimalizaci válcovací stolice za studena .....	7
Tuhostní model pro výpočet silového profilu válce .....	10
Algoritmy pro kompenzaci excentricity válců a dopravního zpoždění .....	13
2.3 Aplikace moderních algoritmů řízení pro systémy s dopravním zpožděním a systémy s rozloženými parametry (AO3) .....	16
Aplikovaný výzkum v oblasti řízení systémů se zpožděním a systémů komplexního charakteru .....	16
2.4 Návrh a realizace SW pro subsystemy monitorování a řízení energeticky náročných procesů (AO4) .....	18
Moduly pro simulaci, identifikaci a adaptaci modelů pecí pro tavbu oceli .....	18
3. Dosažené výsledky dle struktury databáze RIV .....	26
4. Reference .....	27

## 1. Úvod

V návaznosti na předchozí fáze projektu, zejména pak na první výstup pracovního balíčku 11 - *Knihovna softwarových rutin pro výpočetní a optimalizační operace v systémech monitorování a řízení*, byly implementovány softwarové moduly pro monitorování a modelem podporovanou optimalizaci řízení v následujících aplikačních oblastech (AO):

- AO1) Návrh a realizace SW pro monitorování a řízení procesů chlazení ocelových plechů a pásů
- AO2) Návrh a realizace SW pro subsystemy 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 subsystemy monitorování a řízení energeticky náročných procesů

V součinnosti obou zúčastněných partnerů pracovního balíčku byly v jednotlivých AO dosaženy výsledky v souladu s návrhem projektu, a to zejména v aplikačních oblastech válcování a procesů sdílení tepla v hutním průmyslu. Dosažené výsledky byly aplikovány do *Knihovny softwarových modulů pro monitorování a řízení průmyslových procesů*, která je hlavním výsledkem pracovního balíčku. Výsledky dosažené v aplikovaném výzkumu byly v souladu s návrhem projektu prezentovány na řadě prestižních konferencí oboru a formou návazných publikací.

Při návrhu komplexních algoritmů pro estimaci procesních ukazatelů a optimalizaci řízení procesů a pro následnou implementaci matematických modelů, byly využity výsledky dosažené v prvních dvou letech projektu, které jsou obsaženy ve zmiňované knihovně softwarových rutin. Jedná se zejména o modely a softwarové rutiny pro estimaci a optimalizaci chlazení pásů a plechů, sadu rutin pro základní výpočetní operace a elementární algoritmy filtrace a řízení procesů. Dále byly využity a dále rozvinuty metody pro parametrizaci válcovacích tratí a metody pro tvorbu a optimalizaci pecních modelů.

V následující části zprávy je nejprve proveden popis realizace výstupů v jednotlivých aplikačních oblastech. Následně jsou uvedeny dosažené výsledky dle klasifikace databáze RIV. Kromě hlavního výsledku, kterým je SW knihovna, jsou uvedeny publikace vztahující se k danému výstupu, které byly do databáze RIV zaslány za roky 2014 a 2015.

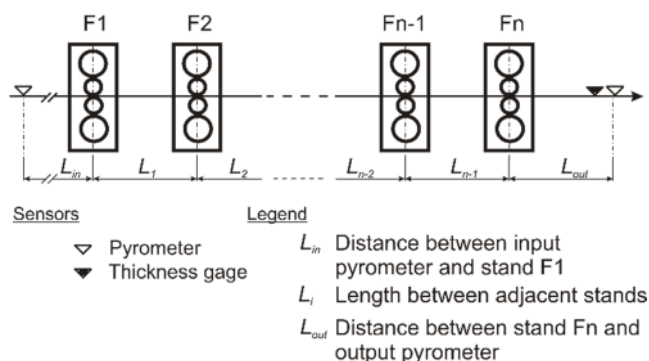
## 2. Postup prací a dosažené výstupy v jednotlivých aplikačních oblastech

### 2.1 Návrh a realizace SW pro monitorování a řízení procesů chlazení ocelových plechů a pásů (A01)

#### *Estimátor teplot vývalku na stolicích válcovací tratě*

V této oblasti se aktivity zaměřily na analýzu využitelnosti matematických modelů včetně jejich adaptace pro monitorování a optimalizaci řízení teploty chlazení vývalku (plechu či pásu) na válcovacích stolicích. Jako hlavní výsledek byl navržen pozorovatel ustálených stavů teplot vývalku na válcovacích stolicích [1]. Motivací k sestavení tohoto pozorovatele byla skutečnost, že válcovací linka jako energeticky náročné zařízení vyžaduje pro technologicky správné válcování udržovat předepsanou válcovací teplotu vývalku. V důsledku nedostatku měření teplot na válcovací lince je proto nezbytné provádět odhad těchto teplot, zdali jsou v předepsaných mezích. Další využití tohoto pozorovatele lze tedy očekávat v aplikační oblasti AO2, tj. při monitorování a automatickém řízení válcovacích procesů. Navržený estimátor teploty byl následně naprogramován v jazyce C++ jako SW modul pro odhad teplot vývalku na válcovacích stolicích včetně možnosti adaptace parametrů modelů přestupu tepla.

Implementovaný SW modul pro odhad teplot vývalku na válcovacích stolicích - HSTE ver. 1.0 - byl následně validován na reálných datech poskytnutých spolupracující firmou PTSW, a sice pro válcovací linky se čtyřmi až sedmi válcovacími stolicemi, viz Obr. 1.

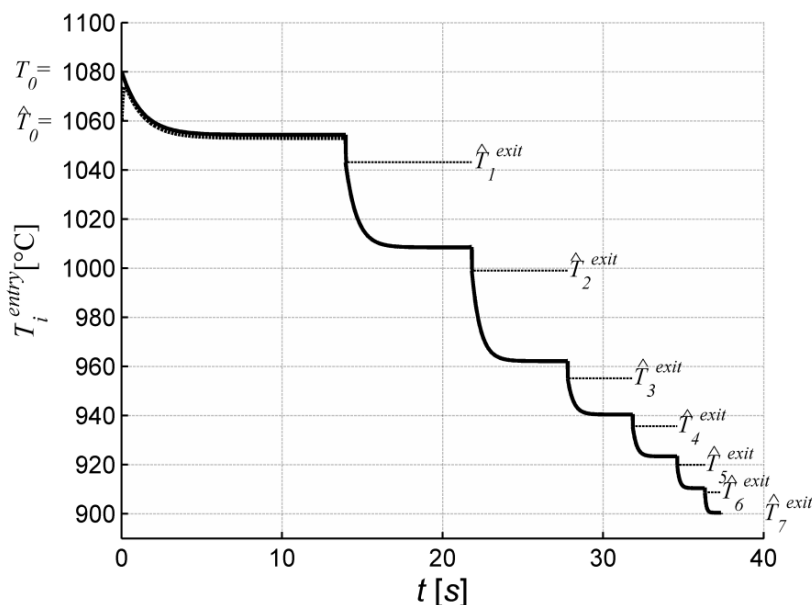


Obr. 1. Schéma válcovací linky

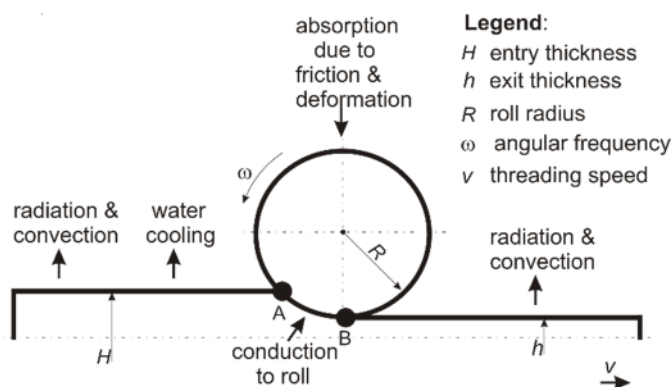
Přestože SW modul je přednostně naprogramován pro odhad teplot ocelových vývalků, nic nevylučuje aplikovat tento SW modul k odhadu teplot i hliníkových pásů. Hlavní předností naprogramovaného pozorovatele teplot vývalku je jeho včasný odhad umožňující na válcovacích linkách docílit energetické úspory a dodržet správný technologický postup při válcování. Zvláště u tenkých válcovaných plechů nabývá včasný a přesný odhad teploty na důležitosti kvůli velkým a nekompenzovaným tepelným ztrátám.

SW modul pro odhad teplot vývalku na válcovacích stolicích, HSTE ver. 1.0, předně splňuje podmínku plné kompatibility jeho výstupních dat s daty vstupními SW modulu HSMM ver. 1.0 pro parametrizaci válcovací tratě. Tím je zajištěna možnost otestovat pro prověřené válcovací plány

přenesené z programu HSMM ver. 1.0 průběh odhadu teplot vývalku na jednotlivých válcovacích stolicích, viz Obr. 2, a zpětně na základě tohoto průběhu korigovat případně výpočet válcovacích sil v programu HSMM ver. 1.0. V SW modulu HSTE ver. 1.0 je implementace estimátoru odhadu teplot na válcovacích stolicích, který je založen na modelech přestupu tepla mezi vývalkem a okolním prostředím. Zvláště tyto modely zahrnují vliv chlazení vodou, sálání, konvekce a vedení tepla vývalkem, viz Obr. 3.



Obr. 2 Průběh odhadu teplot vývalku na jednotlivých válcovacích stolicích



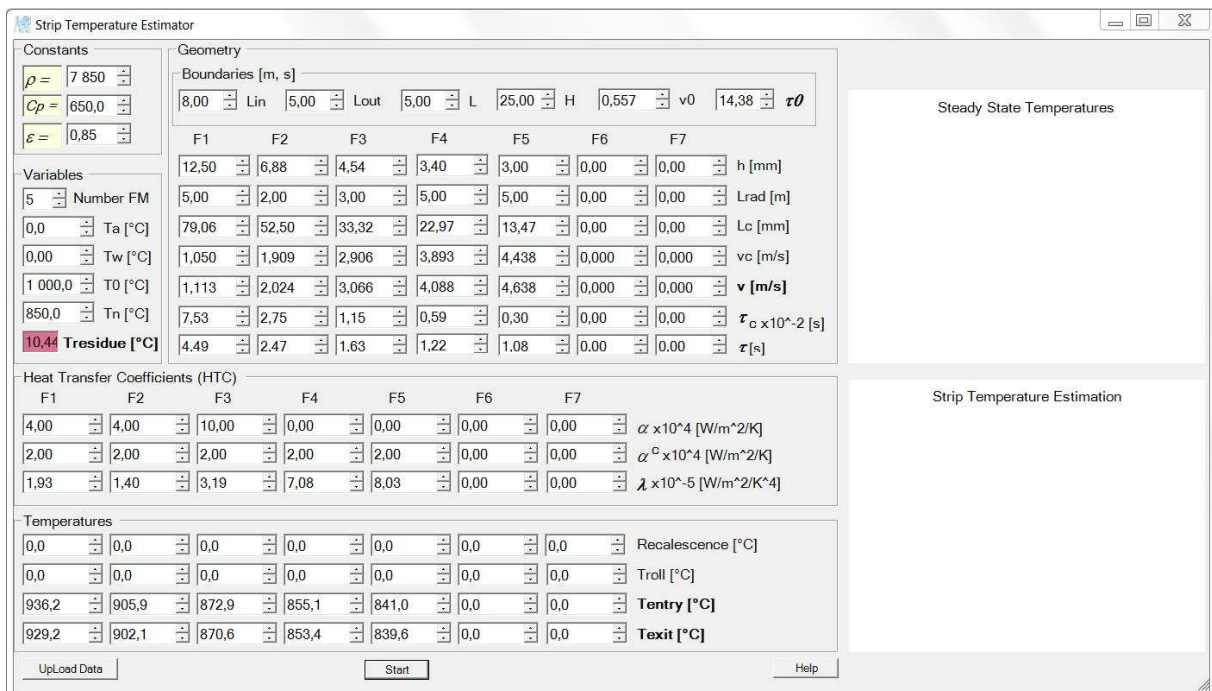
Obr. 3. Uvažované přestupy tepla v modelu

Přitom vliv sálání na teplotní ztráty vývalku nabývá na intenzitě tím, čím vyšší je teplota vývalku, která může být i 1 000 °C, čím zoxidovanější povrch vývalku a čím nižší je intenzita chlazení vodou. Jsou implementovány celkem dva souhrnné modely přestupu tepla, a sice jeden pro teplotní spád mezi válcovacími stolicemi a druhý pro teplotní spád na samotné válcovací stolici. Samotný odhad teploty vývalku využívá jedнокrokové predikce teploty modelem přestupu tepla, když konvergence této predikce směrem k měřené teplotě vývalku na výstupu z válcovací tratě je garantována vhodnou volbou časových konstant a zesílení odhadu. Tato konvergence je v SW modulu signalizována zeleným pozadím položky *Trezidue*, viz Obr. 4, které představuje chybu odhadu

teploty vývalku vůči teplotě na výstupním pyrometru  $T_n$ . Naopak v případě divergence odhadu teplot vývalku se položka *Tresidue* podsvítí červeně, viz Obr. 5, a je zapotřebí zahájit adaptaci parametrů modelů přestupu tepla.



Obr. 4 Hlavní okno modulu HSTE ver. 1.0 za konvergence estimátoru teplot



Obr. 5 Hlavní okno modulu HSTE ver. 1.0 za divergence estimátoru teplot

Počáteční teplotou vývalku při odhadu je měřená teplota vývalku pyrometrem na vstupu do válcovací tratě  $T_0$ , viz obr. 2. Při fyzikálně a technologicky správném určení termomechanických, viz panel „Constants“, a okrajových, viz panel „Variables“, podmínek je dosaženo včasného odhadu teploty vývalku na jednotlivých válcovacích stolicích, než vývalek dosáhne pozici výstupního pyrometru. Pokud jde o stanovení válcovacího plánu včetně obvodové rychlosti pracovního válce a společného kontaktu válce s vývalkem, lze ho přímo nahrát z programu HSMM ver. 1.0 stisknutím tlačítka „UpLoad Data“ anebo ho zadat manuálně. Ze stanoveného válcovacího plánu potom vyplynou transportní zpoždění vývalku, jejichž znalost je nezbytná pro naladění estimátoru teplot vývalku na jednotlivých stolicích. Protože SW modul odhaduje střední povrchovou teplotu vývalku, je povrchová teplota pracovního válce  $T_{roll}$  v panelu „Temperatures“ rovněž teplotou střední. Přitom ustálené hodnoty povrchových teplot vývalku na pětiválcové stolici jsou zaznamenány v horním grafu vpravo nahoře na obr. 4 a jejich odhad estimátorem je zaznamenán na spodním grafu. Mezihodnoty na ose x (FM) horního grafu představují umístění teploty za válcovací stolici. Dále v panelu „Temperatures“ uvedená proměnná „Recalescence“ představuje teplotní nárůst v povrchu vývalku v důsledku rekrystalizace a zpožděných jevů po redukci materiálu vývalku.

## 2.2 Návrh a realizace SW pro subsystémy monitorování a automatického řízení válcovacích procesů (A02)

### *Aplikace pro optimalizaci válcovací stolice za studena*

**Popis funkce:** Cílem této části výzkumu a vývoje bylo vyvinout aplikaci pro optimalizaci procesů během válcování za studena. Jeden z důležitých parametrů během válcování za studena je regulace vstupní a výstupní rychlosti a tahu pásu. Valná většina studených válcoven využívá navíječek pro navíjení/odvíjení materiálu do/ze svitku. Regulace rychlosti a tahu pásu, pak probíhá nepřímo přes rychlost a krouticí moment na hřídeli navíječky/odvíječky. Pro větší přesnost regulace se používají tenzometry, které jsou nainstalovány na převáděcích válečkách pro přesné měření skutečného tahu v pásu. Toto měřicí zařízení je však z důvodu pořizovacích nákladů ne vždy dostupné, a proto je nutné v řadě provozů využívat nepřímých metod.

Daná aplikace je rozdělena na následující části:

1. Napájení motorů frekvenčními AC nebo DC měniči
2. Řízení procesu a regulace rychlosti a tahu v pásu.
3. Vizualizace procesu na obrazovce pro operátora

Celá aplikace byla implementována za pomoci knihovny sw rutin pro výpočetní a optimalizační operace implementovanou v rámci prvního dílčího výstupu balíčku 11, která byla navržena v prvních letech řešení projektu.

**Napájení motorů:** Pro napájení a řízení motorů byly testovány frekvenční AC měniče Siemens Sinamics G120 a S120 a DC měniče Siemens Sinamics DCM.

**Řízení procesu a regulace rychlosti a tahu v pásu:** Jelikož se jedná o relativně rychlé procesy s požadavkem na rychlé předávání dat mezi systémy a krátký výpočetní čas, byl zvolen řídicí systém Siemens Simotion pro implementaci aplikace.

Řídicí systém obsahuje především následující úlohy:

- Výpočet průměru svitku
- Regulace krouticího momentu navíječky/odvíječky
- Kompenzace třecích odporů
- Kompenzace dynamických momentů setrvačnosti při změně rychlosti válcování

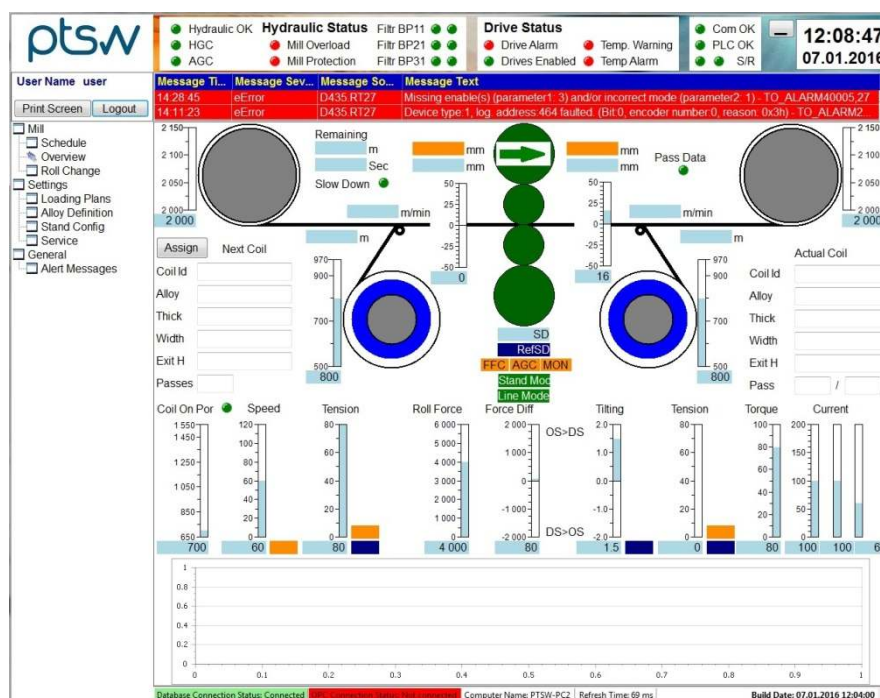
**Výpočet průměru svitku** se provádí porovnáním úhlové rychlosti navíječky a rychlostí pásu a z počtu otáček navíjedla a tloušťky materiálu. Obě metody se vyhodnocují paralelně a určuje se z nich výsledný průměr svitku.

**Požadovaný krouticí moment navíječky/odvíječky** je určen požadovaným tahem v pásu a průměrem svitku. Základní krouticí moment je nadále upraven o kompenzaci třecích odporů závislých zpravidla na rychlosti otáčení včetně a o kompenzaci dynamických momentů setrvačnosti při změně rychlosti pásu. Požadovaný krouticí moment motoru je předán do frekvenčního měniče, kde probíhá regulace pohonu.

*Pro kompenzace třecích odporů* se měří statický krouticí moment bez zátěže v závislosti na otáčkách včetně během uvádění do provozu pro každou navíječku/odvíječku. Tento moment se aplikuje jako kompenzace v závislosti na rychlosti a směru otáčení.

**Kompenzace dynamických momentů setrvačnosti** se provádí součtem konstantních dynamických momentů motoru, převodovky, včetně a navíjedla/odvíjedla a proměnných dynamických momentů svitku, které se počítají ze známých rozměrů svitku, průměru svitku a ze specifické hmotnosti zpracovávaného materiálu.

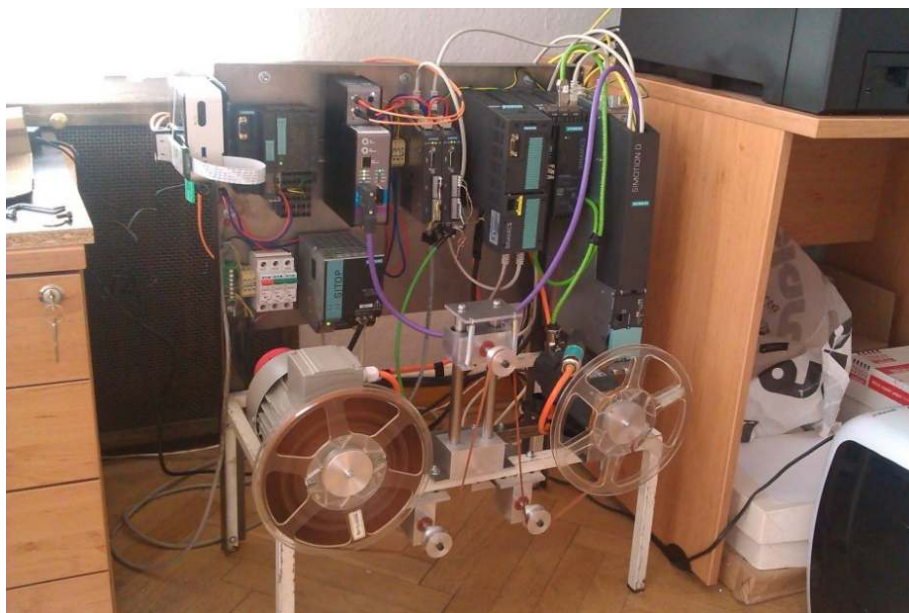
**Vizualizace procesu:** Aplikace pro vizualizaci procesu byla vytvořena v prostředí MS Visual Studio C# .NET, konfigurace a produkční data jsou uložena v MS SQL Express databázi a pro komunikaci se Siemens Simotion je použito OPC, viz Obr. 6.



Obr. 6 Výstup pro operátora je zobrazen na hlavní obrazovce vizualizační části

**Testovací stand:** Aplikace pro regulaci rychlosti a tahu v pásu byla testována a laděna na test-standu, který byl navržen a sestaven pro dané účely. Test-stand se skládá ze dvou odlišných pohonů pro větší různorodost testování, kde vždy jeden pohon simuluje válcovací stolici a druhý navíječku/odvíječku. Test-stand je dále vybaven měřením rychlosti a tahu v pásu pro ověření přesnosti regulace. Důležité proměnné, měřené a akční veličiny, byly zaznamenávány s periodou 1ms pro analýzu a vyhodnocení přesnosti regulace.





Obr. 7 Testovací stand sestavený pro potřeby ladění navrženého systému řízení regulace rychlosti a tahu v pásu

**Testování v provozu:** Aplikace pro řízení a optimalizaci studených válcoven byla testována v provozu během uvádění do provozu modernizované, studené KVARTO trati v Pákistánu. První provozní zkoušky ukázaly plnou funkčnost a spolehlivost aplikace. Aplikace je tedy připravena k ostrému nasazení a bude nadále využívána na projektu v Pákistánu a nadcházejících projektech např. v Egyptě.

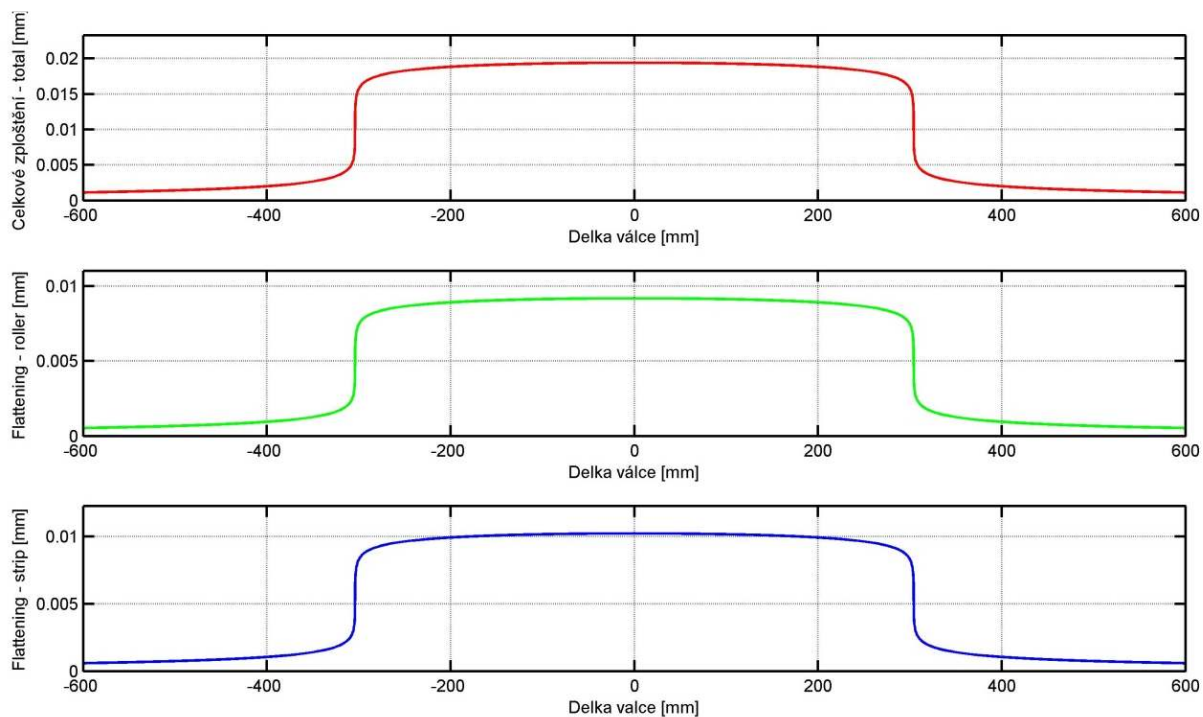


Obr. 8 Projekt modernizace studené KVARTO trati v Pákistánu, kde byla aplikace pro řízení a optimalizaci studených válcoven úspěšně testována

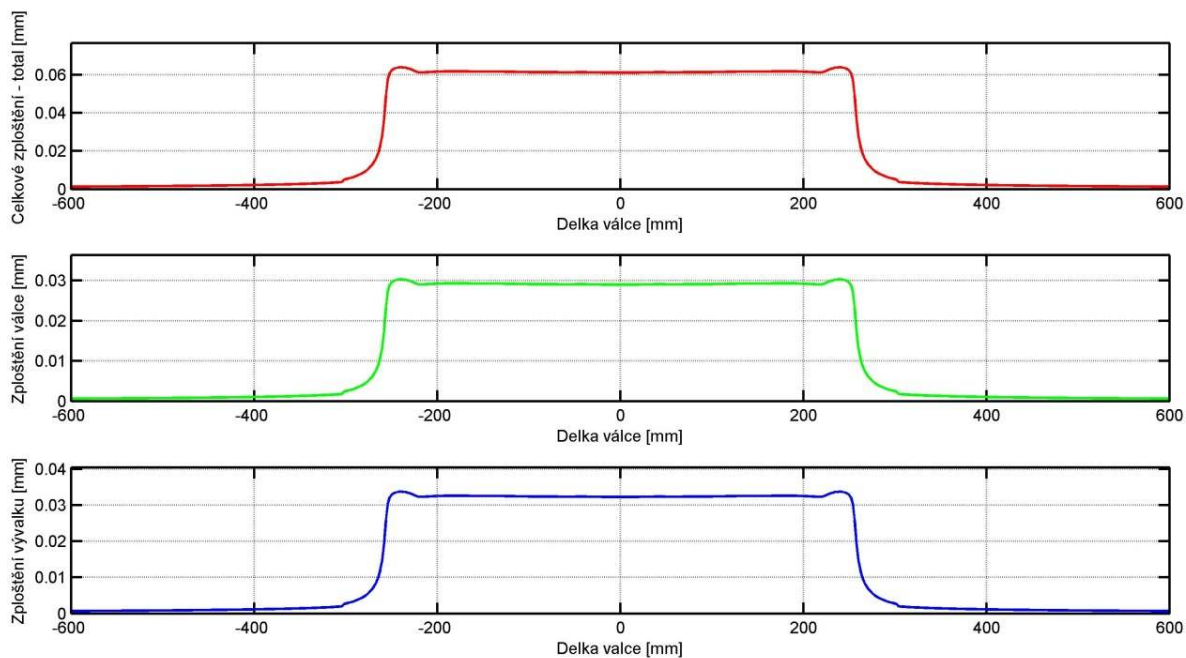
## *Tuhostní model pro výpočet silového profilu válce*

**Modelování zploštění válců a vývalků:** Daný výzkum a vývoj navazuje na předchozí aktivity a dosažené výsledky v předchozích fázích projektu, zejména na provedenou analýzu průhybu válců a návrh a implementaci zjednodušeného modelu čtyřválcové stolice s vývalkem, v němž byla použita teorie tuhostních matic k popisu průhybu válců, tj. pracovního a podpůrného. Za předpokladu znalosti materiálových a pevnostních parametrů obou válců a znalosti distribuce silových účinků (symetrických i nesymetrických) podél válců umožňují navržené postupy určit průhyb válců v jejich délce. Nevýhodou použití teorie tuhostních matic pro výpočet průhybu válců je, že zploštění válců v důsledku kontaktní mechaniky válců nelze podle této teorie určit s požadovanou a dostatečnou přesností. Vzhledem k tomu, že zploštění válců značně ovlivňuje profil vývalku, především jeho okraje, a délku kampaně válců (počet odválcovaných tun), tato fáze výzkumu byla zaměřena na modelování zploštění válců a vývalku, ke kterému dochází z důvodu elastické deformace materiálu jak samotných válců, tak i vývalku. Řešení tohoto problému je založeno na základě Businessqueho problému a Hertzových zákonů. Hlavním výsledkem této části výzkumu je software pro výpočet zploštění pracovních a podpůrných válců a vývalků.

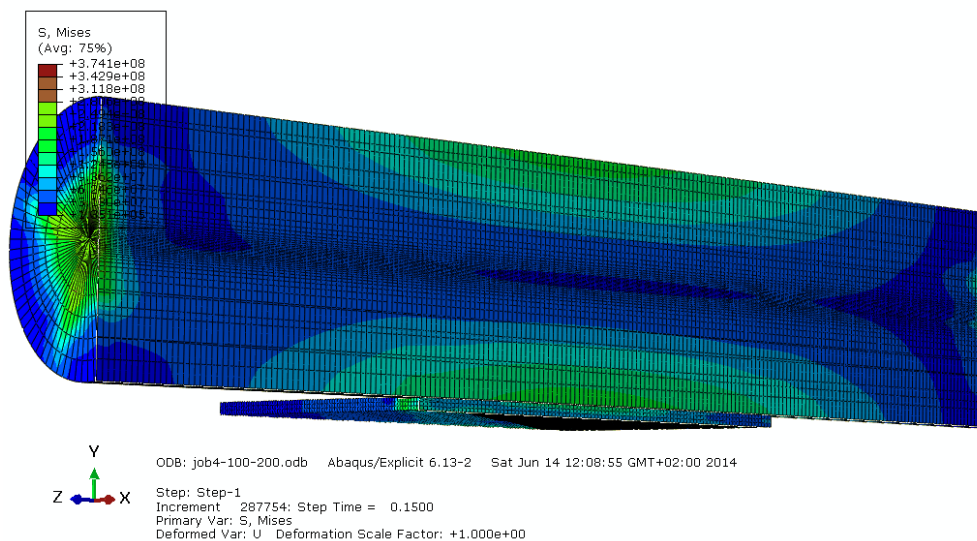
**Model zploštění válců použitím Hertzova zákona:** Je obecně známo, že okrajové části opěrného a pracovního válce nejvíce podléhají opotřebením – objevují se různé povrchové nehomogenity, jakými jsou např. pitting, vyštípení okrajových částí nebo vznik trhlin. Tyto poruchové vady mohou vést k lomu samotného válce a tudíž modelování zploštění válců má velký význam v syntéze řízení válcovacích procesů a přímo se odráží na délce kampaně pracovních a opěrných válců. Základní veličiny, které ovlivňují zploštění válců, jsou modul pružnosti, Poissonův koeficient, a šířka kontaktního povrchu mezi válcem a vývalkem. Kromě těchto veličin rozložení kontaktního napětí mezi válci anebo mezi pracovním válcem a vývalkem ovlivňuje profil okrajů vývalku. K estimaci zploštění válců byl použit diskretizovaný 2D model, který vychází ze znalosti liniové síly vypočtené integrací z rozloženého tlaku po kontaktním povrchu mezi válci anebo mezi válcem a vývalkem. Superponováním deformací válce spočítaných podle daného modelu lze určit výsledné zploštění válce a vývalku. Na Obr. 9 je uveden příklad profilu zploštění pracovního válce a vývalku, který je získán použitím daného modelu a to v případě, že se předpokládá rovnoměrně rozložené napětí, respektive rovnoměrná liniová síla v kontaktu mezi válcem a vývalkem. Na horním grafu je červenou čarou znázorněn celkový profil zploštění pracovního válce a vývalku. Prostřední graf znázorňuje zploštění samotného pracovního válce v důsledku kontaktního napětí mezi válcem a vývalkem a poslední graf na Obr. 9 znázorňuje zploštění vývalku. Pokud se místo rovnoměrně rozložené liniové síly použije rozložení získané výpočtem z FEM modelu, který byl pro účely testování sestaven v softwaru ANSYS, je získán profil, který je zobrazen na Obr. 10. Pro výpočet liniové síly použité v tomto případě byly použity výsledky napěťových výpočtů ze zmíněného FEM modelu válcovací stolice, který je znázorněn na Obr. 11. Na tomto obrázku je dáno rozložení napětí v příčném řezu válcovací stolice, kde se počítá zploštění pracovního válce a vývalku. Stejně jako v předchozím případě je na horním grafu znázorněno celkové zploštění, prostřední graf ukazuje zploštění válce a spodní zploštění samotného vývalku. Z předchozích obrázků je zřejmé, že zploštění může výrazně ovlivnit celkový profil vývalku.



Obr. 9. Zploštění pracovního válce a vývalku  
v případě rovnoměrně rozložené kontaktní liniové síly



Obr. 10. Zploštění pracovního válce a vývalku v případě nerovnoměrně rozložené kontaktní liniové síly získané pomocí FEM výpočtu v softwaru ANSYS.



Obr. 11. Napětové pole v příčném řezu válcovací stolice

**Software pro výpočet profilu zploštění válců a vývalku:** Použitím teorie rozpracované v předchozí sekci byl vytvořen software v jazyku C++ pro výpočet zploštění válcovaných povrchů. Na Obr. 12 je uvedeno grafické rozhraní (GUI) softwaru *Flattening* na výpočet profilu zploštění kontaktních povrchů mezi opěrným a pracovním válcem a mezi pracovním válcem a vývalkem. V případě pracovního a opěrného válce je nutné zadat jejich délku, modul pružnosti, který musí odpovídat válcovací teplotě, a Poissonův koeficient. Navíc pro vývalek musí být definována tloušťka vývalku na výstupu z válcovací stolice a jeho šířka.

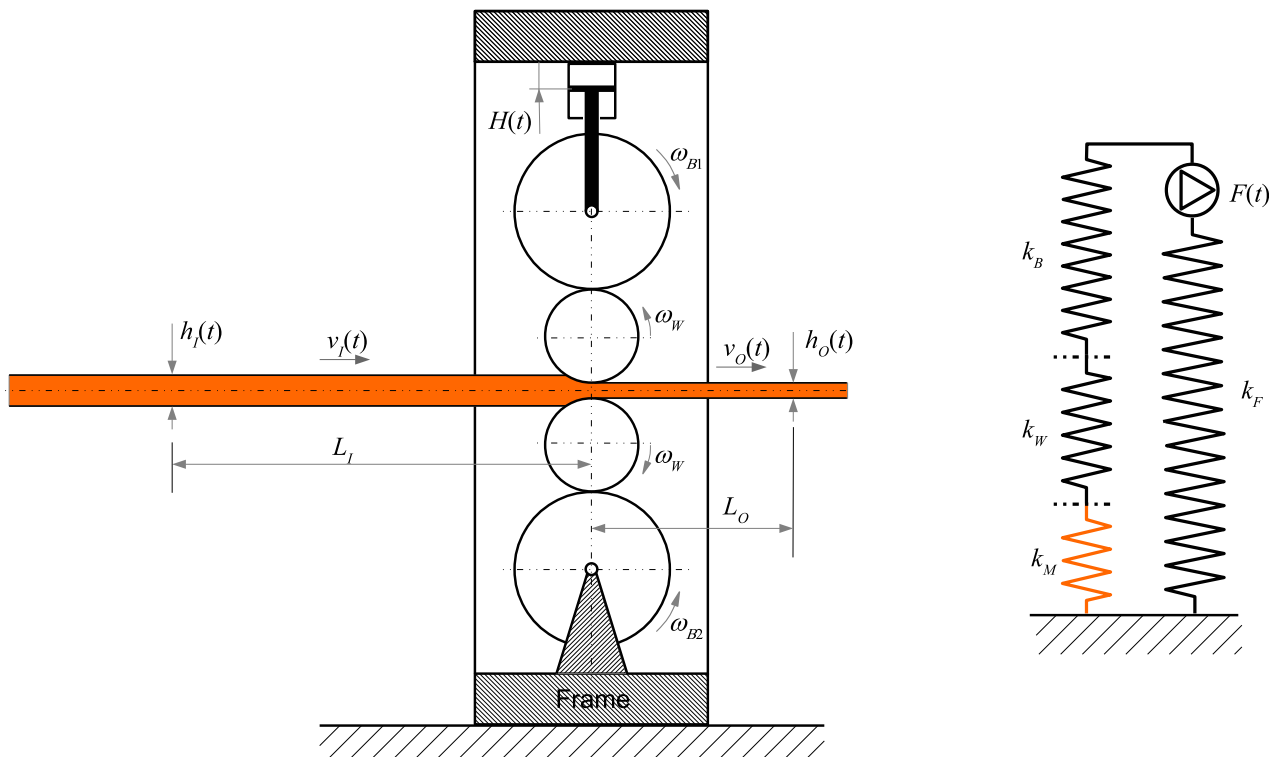


Obr. 12. Grafické rozhraní softwaru *Flattening*

Kromě již uvedených parametrů je dále nutné zadat válcovací sílu v [MN] a délku jednotlivých segmentů, tj. Hertzových elementů. Všechny jednotky jsou uvedeny vedle odpovídajících políček v grafickém rozhraní. Výstupem z programu je profil zploštění kontaktních povrchů ve formě grafu a datový soubor s vypočtenými hodnotami. Rychlost a přesnost výpočtu přímo souvisí s jemností zvolené fyzické diskretizace válců a vývalku. Tento software je implementovatelný do komplexního systému parametrizace válcovací trati společnosti PTSW, je ale možná jeho implementace i v rámci jiných platforem.

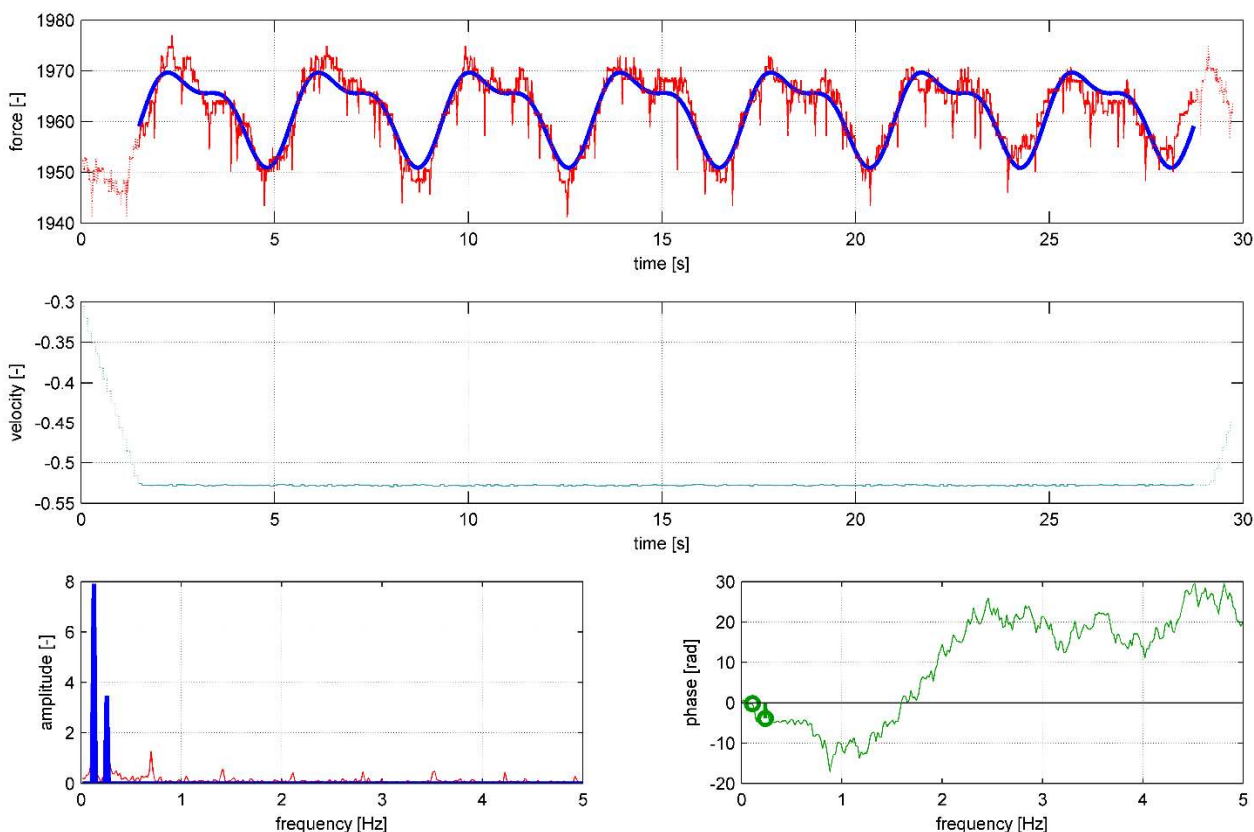
## Algoritmy pro kompenzaci excentricity válců a dopravního zpoždění

Výroba tenkých plechů na válcovacích linkách klade vysoké nároky na přesnost nastavení mezery mezi válci resp. přítlačné síly. Tloušťka výstupního zpracovaného materiálu je ovlivňována mnoha faktory, mezi něž patří také excentricita válců, která je způsobena jejich tvarovou odlišností a také jejich uložením v rámu. Odchylka válců od ideálního tvaru je dána možnostmi použité výrobní technologie. Není tedy v reálných podmínkách možné dosáhnout naprosté tvarové identity. Důsledkem těchto nepřesností je cyklicky proměnná odchylka tloušťky válcovaného materiálu na výstupu. Úkolem dané části aplikovaného výzkumu bylo navrhnout komplexní metodu aktivní kompenzace excentricity válců. V prvním kroku byly vytvořeny pomocné algoritmy pro identifikaci excentricity. Následně v druhém kroku byl navržen postup aktivní kompenzace excentricity založené na adaptaci přítlačné síly válců.



Obr. 13 Nákres čtyřválcové válcovací stolice a její náhradní schéma, s uvažováním symetrie daného problému.

**Kalibrace excentricity při chodu naprázdno:** Po uložení válců do válcovací stolice je provedena prvotní identifikace excentricity. Tato je založena na znalosti počáteční informace o vlastnostech válců, která je získána z inicializačního měření, kdy je nastavena nulová mezera mezi válci a je snímána změna přítláčné síly při konstantní rychlosti rotace válců bez založeného materiálu. Excentricita je estimována ze záznamů jejich silových účinků. Získaný signál je na základě předpokladu harmonického průběhu podroben analýze frekvenčních vlastností s využitím diskrétní Fourierovy (DFT) a rychlé Fourierovy transformace (FFT), pomocí nichž se vyhledají harmonické složky signálu. Zároveň se předpokládá určitý typický harmonický tvar signálu vycházející ze znalosti mechanického uspořádání válců. Například, při uvažování čtyř válcové stolice, viz Obr. 13, je identifikován signál se třemi harmonickými složkami. Vyšší harmonická složka odpovídá frekvenci otáčení pracovních válců (válce, které jsou v kontaktu s materiálem), které jsou mechanicky spojeny pomocí převodového mechanismu. Dvě nižší frekvence odpovídají frekvenci otáčení přítláčných válců. Jelikož tyto válce nejsou mechanicky propojeny, vyskytují se v signálu dvě frekvence, které se velmi málo liší, jelikož nominální průměr válců je stejný - malé odchylky průměrů, které způsobují mírně odlišné frekvence, vznikají během broušení, či běžným opotřebením válců. Ověření algoritmů detekce harmonických složek bylo po implementaci algoritmů provedeno jak na simulovaných, tak na získaných reálných datech, viz Obr. 14.

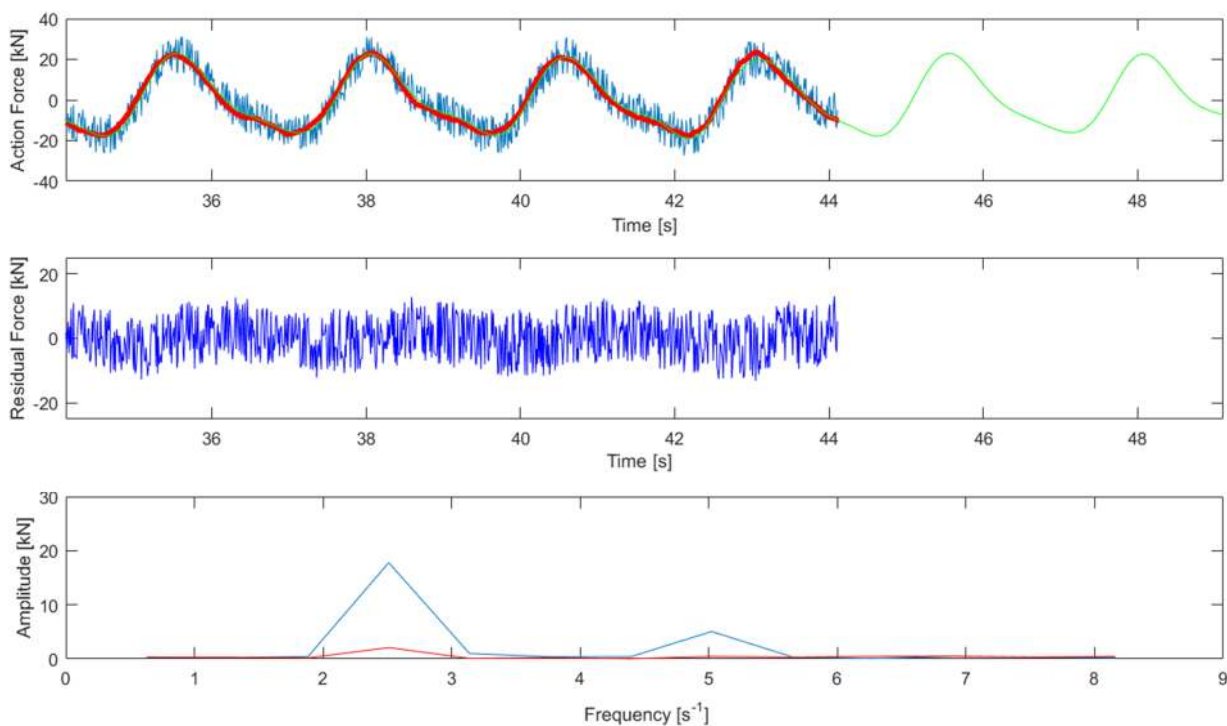


Obr. 14. Příklad výstupu analýzy signálu kalibrace excentricity při chodu válcovací stolice naprázdno

**Identifikace excentricity při provozu:** Online identifikace excentricity při provozu nezbytně nevyžaduje inicializační měření, jelikož je založena na obdobných rutinách jako při kalibraci. Inicializační měření je ale důležité pro stanovení kvality uložení válců. Znalost parametrů excentricity při uvedení válců do provozu též vede k zlepšení kvality prvotní série. Na rozdíl od offline identifikace excentricity je u provozního nasazení nutné brát v úvahu časovou náročnost

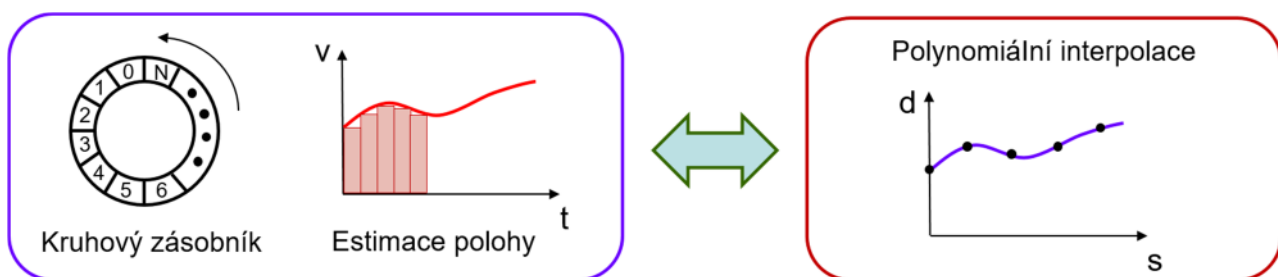
vyhodnocení signálu, kterou lze provádět pouze přes délku omezené časové pásmy. Z tohoto důvodu je nutné stanovit frekvenční okna, na kterých je signál vyhodnocen. Fourierova transformace je periodicky aplikována na vhodně zvolený časový rámec naměřených dat, přičemž jsou za účelem optimalizace kódu a odstranění parazitních jevů v měřených datech sledovány jen ta frekvenční pásma, která odpovídají konkrétnímu mechanickému uspořádání válcovací linky. Výstupem této metody je nepřímá informace o aktuální odchylce tloušťky materiálu, kterou lze vhodně využít pro aktivní kompenzaci excentricity. Při provozu je možné algoritmy aplikovat jak na záznamy průběhů silových účinků tak přímo na velikost válcovací mezery. V použitých algoritmech bylo nutné též respektovat fundamentální vliv rychlosti pásu na identifikované frekvenční vlastnosti signálů.

**Kompenzace excentricity:** Algoritmus pro kompenzaci silového účinku excentricity je založen na znalosti identifikované harmonické složky na dané, relativně krátké, historii dat. Typickým problémem je zde výše zmiňovaná blízkost frekvenčních účinků přítlačných válců, která se při analýze dat na krátkém časovém intervalu jeví jako frekvence jediná. Vlivem superpozice amplitud a fázových posunů blízkých frekvencí se ale v dlouhodobém časovém horizontu identifikované charakteristiky výrazně mění. Dalším problémem je identifikace excentricity z měření reziduálního silového účinku, který je po aplikaci kompenzace silového účinku řídicím systémem poměrně malý (v případě že kompenzace probíhá správně). Pro opakovanou identifikaci, sloužící k průběžné adaptaci frekvenčních charakteristik je tedy použita superpozice kompenzační síly a reziduální (měřené) síly na pozorovaném časovém intervalu. Pro účely off-line validace navržených algoritmů byl sestaven tuhostní model válcovací stolice, viz schéma v pravé části obr. 14, který bude v další fázi výzkumu využit jako estimátor silových účinků na jednotlivé segmenty systému, tj. přítlačný a pracovní válec s tuhostmi  $k_W, k_B$ , rám válcovací stolice s tuhostí  $k_W$ , a válcovaný materiál s tuhostí  $k_M$ . Příklad výsledků testu je na Obr. 15.



Obr. 15 Estimace frekvenčních účinků excentricity válců při aplikaci její kompenzace řídicím systémem

**Adaptivní estimátor tloušťky materiálu s využitím bloku dopravního zpoždění s proměnnou délkou:** Uspořádání válcovací linky zpravidla využívá umístění senzoru tloušťky plechu před válci ve známé konstantní vzdálenosti, viz. Obr. 13, což se ve smyčce řízení projevuje jako měnící se dopravní zpoždění v důsledku proměnné rychlosti válcování. Úkolem adaptivního estimátoru tloušťky materiálu je s efektivním využitím dostupné datové paměti řídicího zařízení simulovat časové zpoždění měření tloušťky válcovaného plechu. Pro tyto účely byl vytvořen algoritmus s kruhovým zásobníkem pevné délky pro ukládání dat. Vzorkování je realizováno ekvidistantně (s konstantní vzdáleností mezi uloženými vzorky v zásobníku, nikoli s konstantní periodou vzorkování, jak je běžné), což s výhodou odstraňuje problémy s proměnnou rychlostí válcování. Pro estimaci vzorkovací délky je využita numerická integrace rychlosti válcování, která je získávána ze sensorového vybavení válcovací linky, spolu s pomocnými filtry, které zajišťují stabilitu estimace v dlouhodobém časovém měřítku. Estimace mezilehlých hodnot mezi jednotlivými vzorky je prováděna pomocí Lagrangeova interpolačního polynomu volitelného řádu. Výstupem estimátoru je časově zpožděná spojitá hodnota tloušťky vstupního materiálu.



Obr. 16 Ideové schéma implementace dopravního zpoždění proměnné délky s variabilní periodou vzorkování

**Implementace navržených algoritmů a rutin:** Výše popsané algoritmy pro estimaci a aktivní kompenzaci excentricity a časově proměnného zpoždění byly implementovány ve formě ANSI C SW rutin pro nasazení v systému SIEMENS SIMOTION. Kódy a algoritmy jsou jednoduše přenositelné na jiné systémy řízení.

## 2.3 Aplikace moderních algoritmů řízení pro systémy s dopravním zpožděním a systémy s rozloženými parametry (A03)

### *Aplikovaný výzkum v oblasti řízení systémů se zpožděním a systémů komplexního charakteru*

**Algoritmus pro identifikaci parametrů procesů se zpožděním:** V této etapě řešení projektu byla dokončena publikace [2] a byla zaslána do časopisu Journal of Process Control. Daný článek popisuje metodu identifikace systémů se zpožděním s jedním vstupem a jedním výstupem. Předpokládá se, že zpoždění mohou být přítomná na vstupu i ve stavech systému se zpožděním. Původnost této metody spočívá v oddělené identifikaci zpoždění, která se provede v první fázi algoritmu, a následovně se v druhé části identifikují koeficienty systému. Identifikační postup se



může rozdělit do několika etap. S cílem vyhnout se nekauzální struktuře uvažovaného systému, zavádí se filtrace signálů. Transcendentní charakter tohoto problému se řeší diskretizací modelu, kterou je také nutné provést kvůli diskrétnímu charakteru měřených signálů. Pro diskretizaci filtrovaného systému se používá Tustinova transformace a aproximace zpoždění. Po diskretizaci původního filtrovaného modelu se v dalších dvou krocích metody identifikují zpoždění a koeficienty systému se zpožděním. Tato metoda je využitelná například v procesech válcování, v modelování pecních systémů, či systémů přenosu tepla, u kterých využití modelů se zpožděním umožňuje výhodně vystihnout distribuovaný charakter dynamických vlastností.

**Parametrizace PID regulátorů pro procesy s dopravním zpožděním:** Použitím integrálního kritéria IAE byla optimalizována regulační smyčka se zpožděním v publikaci [3], kde docílené optimální parametry PID regulátoru vedou na kmitavé regulační odezvy. Analýzou dominantních pólů regulačních smyček bylo zjištěno, že u nekmitavých procesů vychází po optimalizaci regulační odezvy jako nedostatečně tlumené a kmitavé s frekvencí vyšší o 20% než je kritická frekvence procesu. Naopak u kmitavých procesů byly optimalizací podle kritéria IAE dosaženy regulační odezvy dobře tlumené s dominantní frekvencí blízkou frekvenci kritické. Přitom klasifikace regulačních smyček podle bezrozměrových parametrů, tzv. kmitavosti a zpožděnosti procesu, umožnila dosažení obecných závěrů pro aplikaci optimálních PID regulátorů. Tatáž klasifikace stála u zrodu návrhu regulačního obvodu ve smyslu kritéria optimálního modulu [4]. Metoda optimálního modulu aplikovaná na procesy se zpožděním vede na co nejplošší amplitudovou charakteristiku přenosu regulačního obvodu na poruchu do co nejvyšší možné (zlomové) frekvence v závislosti na počtu parametrů regulátoru. Přitom přenos regulačního obvodu v důsledku výskytu zpoždění je meromorfní funkcí bezrozměrných parametrů, což její optimalizací dělá parametry PID regulátoru optimální pro celé třídy procesů. Dále zmíněná zlomová frekvence vychází systematicky mírně menší (maximálně o 20%), než je kritická frekvence procesu, ať kmitavého či nekmitavého. Rovněž relativní tlumení regulačních odezev vychází téměř konstantní a blízké hodnotě 0.4. Co je typické nejen pro optimální modul ale i optimalizaci ve smyslu IAE je, že dominantními póly regulačních smyček s optimálním PID regulátorem je čtveřice pólů, a sice dvě komplexně sdružené dvojice. Přitom druhá dvojice, tj. vzdálenější od počátku komplexní roviny než je ta první dvojice, komplexně sdružených pólů se v regulační odezvě prakticky neobjeví v důsledku příliš velkého útlumu této dvojice. Nezbytným nástrojem pro analýzu regulačních smyček se ukázalo křivkové kritérium dominantnosti pólů těchto smyček [5], které umožňuje rozhodnout, které kořeny ze spektra kořenů charakteristické rovnice regulační smyčky jsou dominantní, tj. nejbliže počátku komplexní roviny kořenů.

**Řešení antiwindupu pro regulátory s dopravním zpožděním:** Dalším z řešených témat, které navazovalo na výzkumná témata v předchozím roce řešení, je problematika návrhu zpětné vazby „anti-windupu“ pro regulátory s dopravním zpožděním. Výsledkem v této oblasti je publikace [6]. V návaznosti na tuto publikaci byla řešena metodika jednoznačného určení parametrů zpětné vazby za účelem optimálního řízení při omezení akčního zásahu.

**Metody přizpůsobení modelu:** Další téma výzkumu bylo věnováno analýze přizpůsobení přenosu systému danému modelu (“exact model matching”) pomocí stavové zpětné vazby, který byl publikován v článku [7]. Konstrukce řešení spočívá na manipulaci s polynomiálními maticemi a je snadno algoritmizovatelná. Dále byl navržen postup, jak úlohu “exact model matching” rozšířit na případ, kdy stavová zpětná vazba není regulární [8], [9]. V tomto případě existuje mnoho řešení a je potřeba mezi nimi vybrat takové, které stabilizuje výsledný systém. Takže byly odvozeny podmínky, za kterých stabilizující řešení existuje a bylo ukázáno, jak takové řešení nalézt. Dále byl navržen postup pro parametrizaci všech stavových regulátorů, které nemodifikují přenosové vlastnosti systému, viz. [10]. Jak je demonstrováno, tento problém lze interpretovat jako speciální

problém přístupu 'model matching'. Popsané výsledky nachází uplatnění při návrhu složitých systémů řízení průmyslových procesů.

## 2.4 Návrh a realizace SW pro subsystemy monitorování a řízení energeticky náročných procesů (A04)

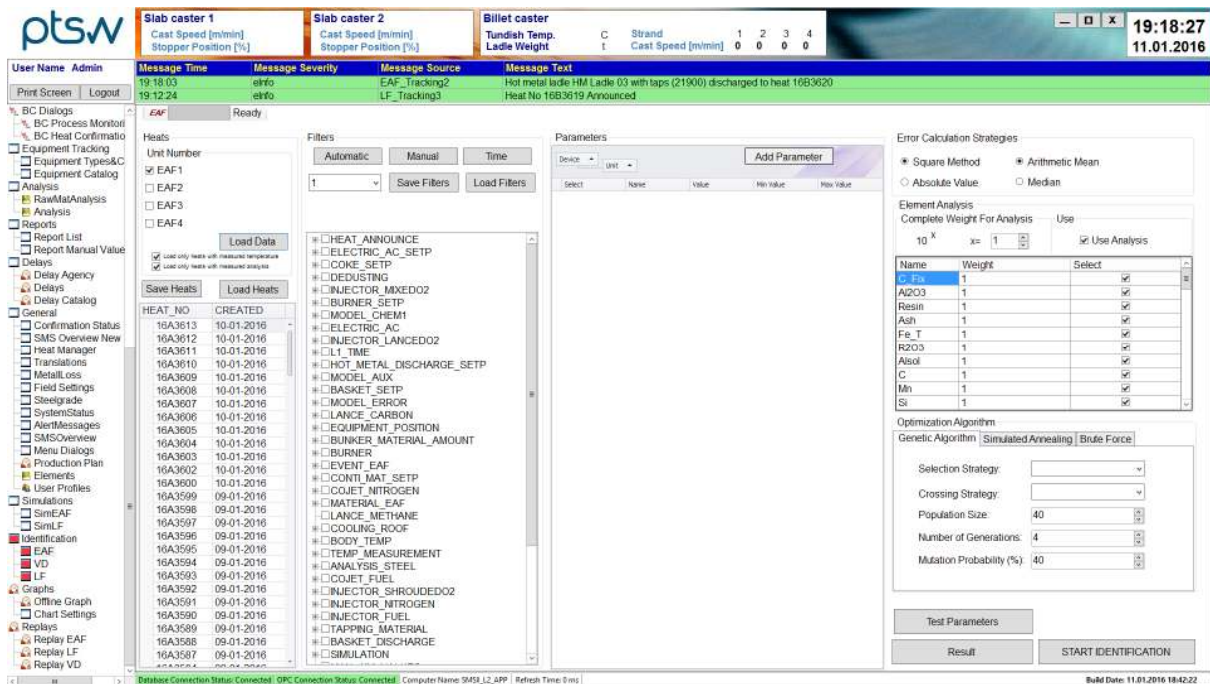
### *Moduly pro simulaci, identifikaci a adaptaci modelů pecí pro tavbu oceli*

**Softwarové sub-moduly zpracováváné v rámci balíčku:** Celkovým cílem bylo vyvinout softwarový nástroj pro automatizaci a optimalizaci ocelářských procesů, který může využívat vývojář při návrhu monitorovacího a řídicího systému, a poté operátor při běžném provozu. Navržený softwarový nástroj využívá vstupně-výstupní matematický model komplexního charakteru, který je nutné identifikovat na základě sady dostupných provozních dat a technologických informací. K identifikaci uživatelem definovaných parametrů přes velké množství dat jsou použity různé optimalizační metody, jejichž selekce závisí na charakteristice daného problému a požadavcích na přesnost, rychlost a stabilitu řešení. Na řešení dané problematiky se ve velké míře podíleli studenti a mladí vědečtí pracovníci, viz práce [11].

**Předzpracování a strukturované ukládání dat z provozu ocelárny, možnost konfigurace pro různé uspořádání ocelárny:** Proces automatické optimalizace parametrů je velice náchylný na použití správných a validních vstupů a dat modelovaného procesu. Provozní data mohou být například uložena v nekonzistentním stavu. Při zde použité metodě nejmenších čtverců tato nekonzistentní data vedou k velkým odchylkám v identifikovaných parametrech modelu procesu. Proto je nezbytné předzpracovat data a zajistit tak jejich konzistentnost. Softwarový nástroj by tedy měl být schopen odfiltrout nevalidní vstupní hodnoty před vstupem do identifikačního bloku. Při tomto procesu je nutné poskytnout operátorovi možnost daný výběr ovlivnit na základě poskytnutých statistických informací o daném procesu. Provozní data procesu jsou zpravidla uložena v databázi ve formě tabulek s danou strukturou, např.:

- Tabulka Px\_RECORD - data cyklických nebo událostních záznamů pro pec, kde x představuje pec EAF, LF nebo VD, viz níže v textu.
- Tabulka Px\_RECORD\_DET - konkrétní detailní data pro pece, význam a data jednotky jsou zaznamenány v tabulce C\_RECORD\_DESC.

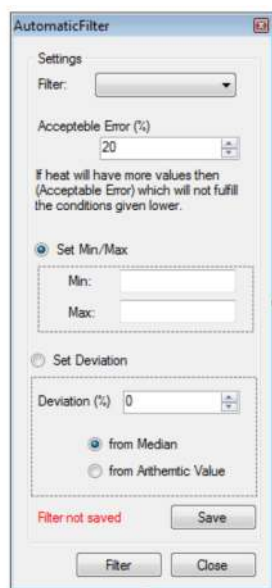
**Načítání a filtrace kompletních věrohodných dat, nastavení filtru a zobrazení dat pro zpracování pomocí grafického rozhraní:** V ocelárnách se během tavby oceli sbírá velké množství dat. Tato data nejsou vždy přesná a konzistentní, a to z mnoha různým důvodů, např. vlivem poruchy měřidel, komunikace mezi systémy, komunikace mezi operátory, špatně vložené hodnoty atd. Z důvodu nutnosti předzpracovat takto velké soubory dat z taveb je třeba vytvořit a použít automatický, či poloautomatický filtr pro jejich korekci. Data z těchto taveb jsou nejprve odfiltrována a posléze použita k identifikaci parametrů taveb. Hlavní dialog identifikačního bloku je vizuální třída, která je univerzální pro celý program a umožňuje tak použitelnost pro více typů pecí, viz Obr. 17.



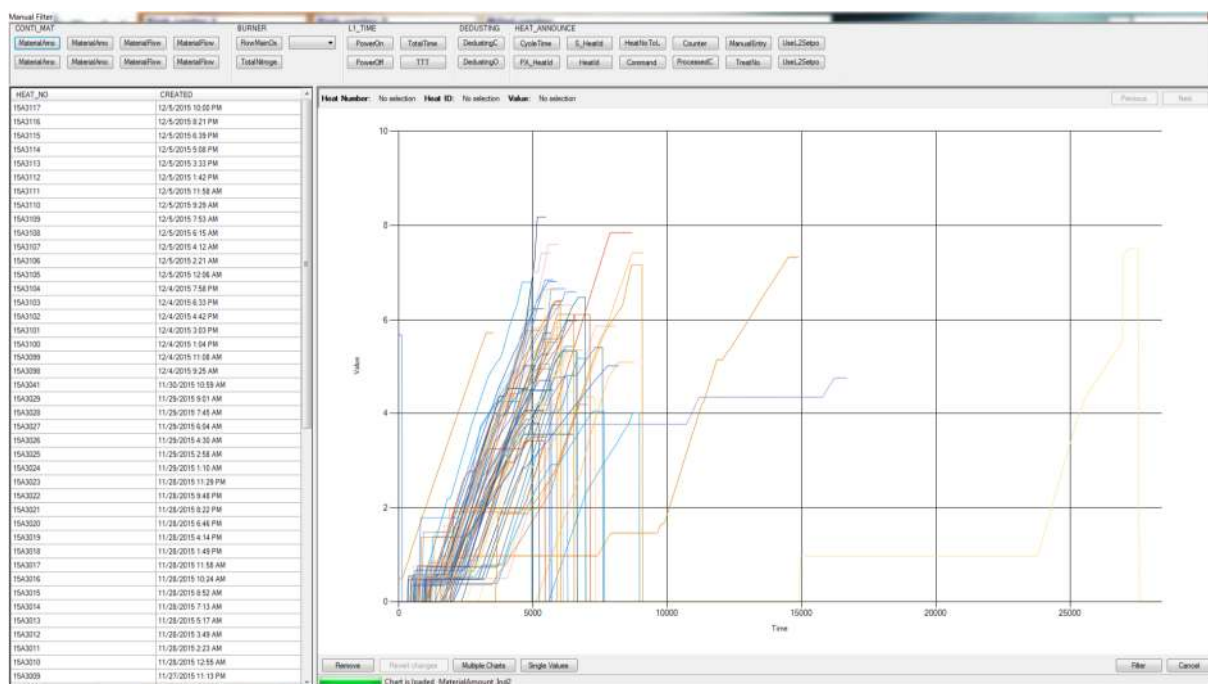
Obr. 17 Hlavní dialogové okno identifikačního nástroje s možností výběru vhodných taveb, filtrů, kritériální funkce a optimalizačního algoritmu.

**Filtrace taveb a procesních dat:** Filtr je jedna z nejdůležitějších částí celého modulu identifikace. Hlavní částí aplikace je vizuální komponenta, ve které se zobrazují názvy všech dostupných filtrů. Podle funkčních požadavků je třeba tuto skupinu filtru uložit, popřípadě načíst. Ukládání i načítání je prováděno přes databázové tabulky. Pro účely tohoto softwaru je databázový návrh rozdělen na tři databázové modely:

- **FilterModel** – Sada použitelných filtrů, či jejich segmentů uložených v tabulce Px\_RECORD\_DET. U filtrů, které se používají automaticky, je nutné definovat rozsah hodnot a filtrační strategii. Je nutné taktéž definovat, kolik procent hodnot může být nevalidních. Detaily FilterModelu, spolu s tím na kterém zařízení a které jednotce filtr pracuje, se ukládají do tabulek: C\_FILTER, P\_FILTER\_, P\_FILTER\_DET.
- **HeatModel** – Je určený pro ukládání a načítání taveb. Může se jednat o odfiltrované tavby, které chceme použít pro optimalizaci modelu. Je třeba taktéž ukládat upravené hodnoty taveb. Stejně jako v případě filtru, se i tavby sdružují do skupin. Máme tedy tři tabulky, do kterých se budou parametry ukládat.
- **ParameterModel** – Obsahuje parametry matematického modelu, a to v tabulce M\_PARAMETER. Nicméně, ne všechny parametry jsou určeny k optimalizaci. Optimalizují se pouze parametry uložené v tabulce M\_PARAMETER\_ADAPT. V případě, že hodnoty parametru budou upraveny tak, aby chyba modelu byla minimální, a uživatel si bude přát dané nastavení uložit, parametry se uloží do tabulky M\_PARAMETER.



Obr. 18 Dialogové okno pro nastavení automatického filtru.

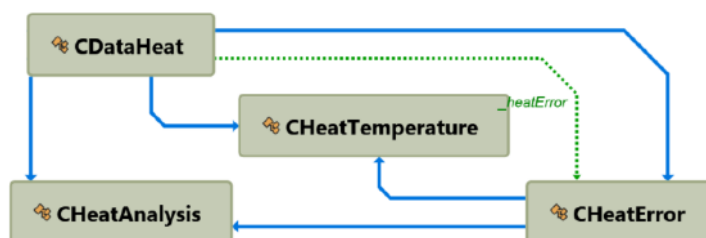


Obr. 19 Ukázka dialogového okna manuálního filtru. Zobrazení vybraného procesního vstupu v čase pro více taveb.

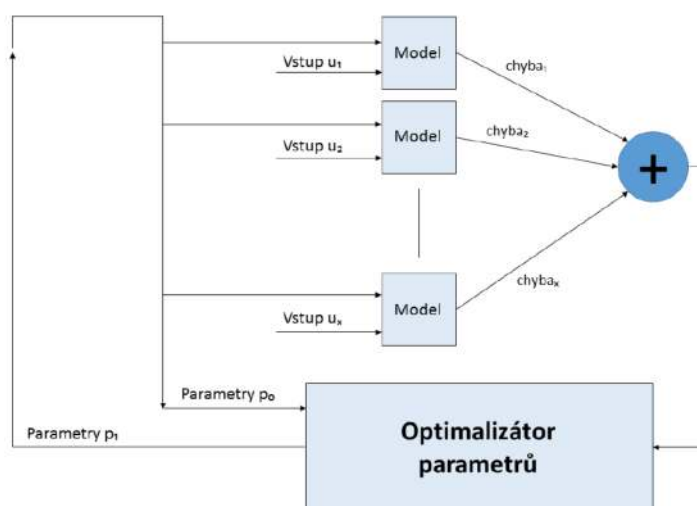
Výběr a filtrace kompletních věrohodných dat pro vybrané tavby lze provést pomocí zmiňovaného filtru (okno pro nastavení viz Obr. 18) a zobrazení dat pro zpracování pomocí grafického rozhraní, viz Obr. 19. V případě kliknutí na některou křivku grafu se v levé tabulce označí tavba, pro kterou je daná křivka platná. To samé platí i opačným způsobem. Pokud bude označená tavba v tabulce vlevo, bude zvýrazněna i křivka v grafu. Jakoukoli křivku lze z grafu odebrat, tímto odebereme i tavbu, v případě špatného odebrání je zde tlačítko „Reverse“, které tavbu vrátí zpět. Tlačítkem

„Filter“ v pravém dolním rohu ukončíme manuální filtrování a ve výběru taveb zůstanou pouze tavby, které nebyly v manuálním filtru odebrány. Tlačítkem „Cancel“ v pravém dolním rohu celou operaci zrušíme.

**Mechanismus rychlého vyhodnocení odchylek výstupů matematických modelů od měřených hodnot pro různé zvolené parametry modelů:** Tento model simuluje proces tavby oceli podle událostí, které se během tavby oceli vyskytly a jsou uloženy v databázi. Událost v tavbě přichází cca každých 10 vteřin. Několikrát během procesu tavby přijde i událost necyklická, ve které je změřená teplota popřípadě byl odebrán vzorek a změřena chemická analýza tavby. Vždy v tomto okamžiku, kdy do matematického modelu přijde necyklická událost, změní se odchylka (chyba) mezi reálnou změřenou hodnotou a hodnotou simulovanou matematickým modelem. Těchto odchylek (chyb) vznikne během jedné tavby zpravidla několik. Všechny tyto odchylky (chyby) jsou použity jako vstupy do kritériální chybové funkce (hodnota fitness funkce) skupiny parametrů, podle kterých se matematický model optimalizuje. Dané soubory dat jsou uloženy v CHeatTemperature a cHeatAnalysis tabulkách, viz Obr. 20. Data jednotlivých taveb jsou uložena ve třídě CDataHeat, do které se postupně přidávají instance tříd cHeatTemperature a cHeatAnalysis. Třída CDataHeat má ukazatel na třídu HeatError, kde jsou uchovávána a přes kterou se určuje celková chyba modelu tavby.



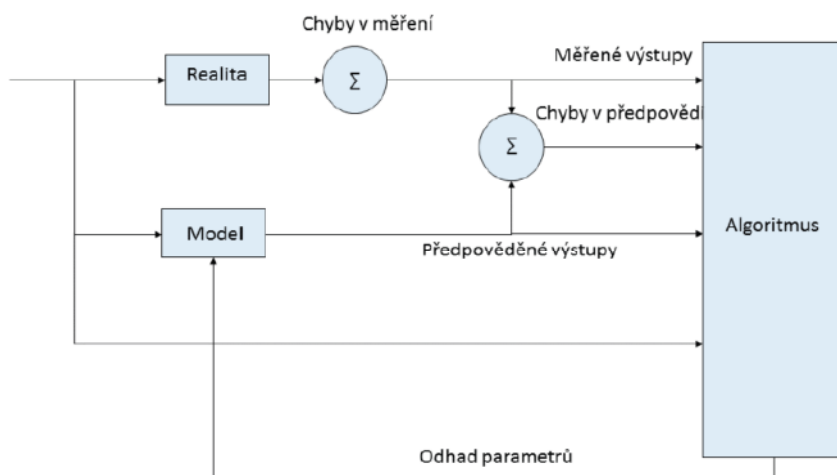
Obr. 20 Graf závislostí ve vyhodnocení chyb modelu



Obr. 21 Schéma volání modelů (replay taveb) pro větší množství taveb a vyhodnocení odchylek výstupů matematických modelů od měřených hodnot pro různé zvolené parametry modelů včetně optimalizace.

Aplikace vyhodnocení chyb pracuje se sadou chyb z mnoha taveb, viz Obr. 21. V tomto procesu dochází k volání modelů (replay tavby) pro větší množství taveb a vyhodnocení odchylek výstupů matematických modelů od měřených hodnot pro různé zvolené parametry modelů. V případě, že dojde v optimalizačním algoritmu k vyžádání fitness hodnoty, je spuštěno vyhodnocení chyby. Tím

se spustí matematický model a celá simulace vybraných taveb. Simulátor taveb zaznamenává události, které v tavně probíhají a v případě zaznamenání události měření teploty nebo chemické analýzy se zjistí daná hodnota z modelu a obě hodnoty se uloží. Po ukončení všech simulací taveb se spočítá hodnota kritéria chyby modelu.

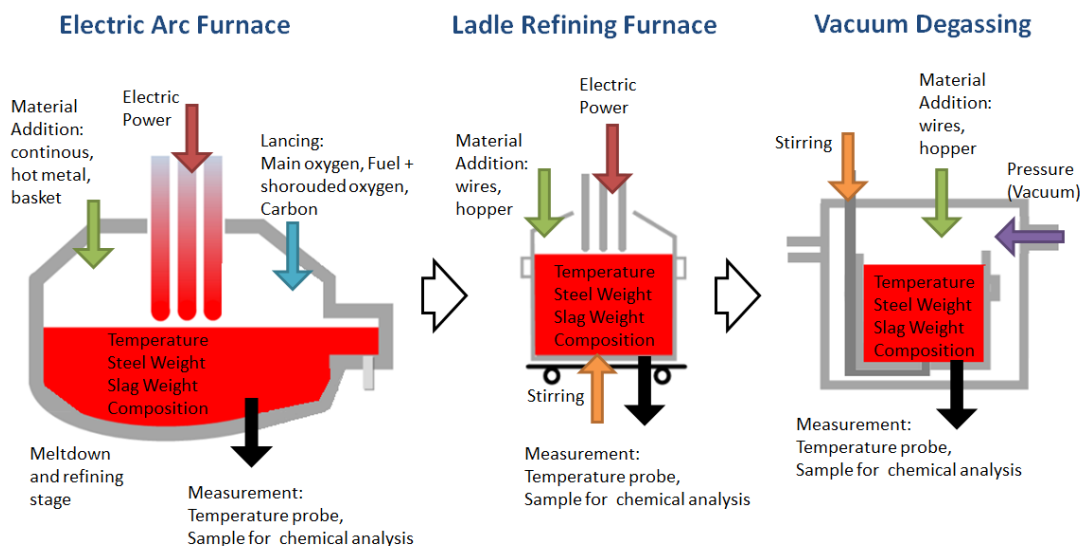


Obr. 22 Schéma identifikace parametrů

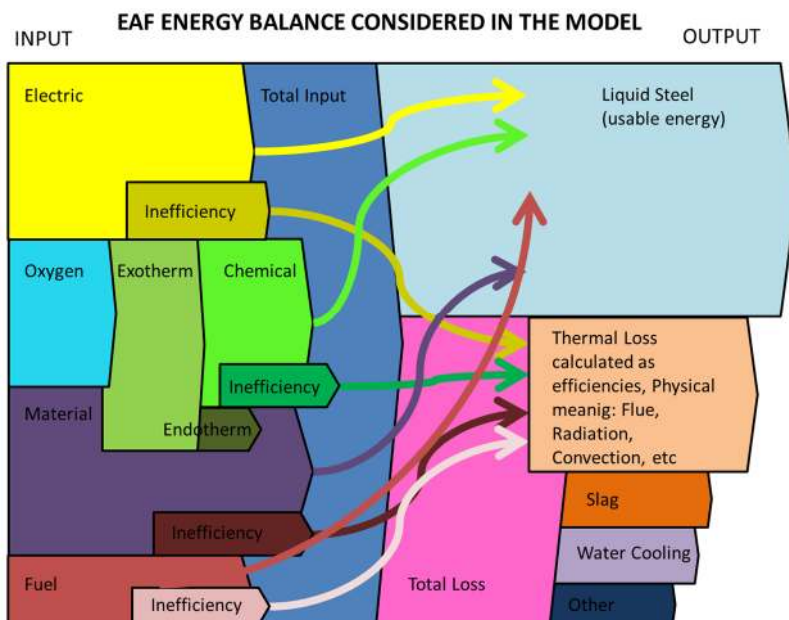
**Rozhraní pro testování různých optimalizačních nástrojů, nastavení kritériální funkce:** Na základě funkčních požadavků je nutné použít více optimalizačních algoritmů. Nicméně všechny tyto algoritmy podléhají určitému uživatelskému rozhraní. Tento interface, nebo spíše abstraktní třída, obsahuje dvě abstraktní metody `StartAlgorithm` a `GetResult`. Metoda `StartAlgorithm` spouští výpočet algoritmu a metoda `GetResult` vrací jeho výsledek. Tato abstraktní třída je nazvána `COptimizationAlgorithm`. Metoda `StartAlgorithm` tedy využívá jednotlivé definované algoritmy, a následně, přes interface `IOptimizationResult` vrací dosažené výsledky. Optimalizační algoritmus pracuje s parametry, které jsou načteny a zobrazeny na hlavní obrazovce aplikace. Parametry modelu jsou v systému reprezentovány třídou `M_PARAMETER`. Nicméně tato třída neobsahuje hodnoty, kterých může algoritmus nabývat. Z tohoto důvodu byla vytvořena třída `CParameterItem`, která obsahuje dané aditivní atributy třídy parametrů a rozsahy hodnot.

**Vlastní matematické modely procesů ocelárny:** Byly sestaveny matematické modely procesů elektrické obloukové pece (EAF), pánvové pece (LF) a vakuové jednotky (VD). Tyto modely predikují teplotu a materiálové složení na základě energetické a materiálové bilance (včetně oxidačního modelu), viz Obr. 23. Nejsložitější z těchto modelů, vzhledem ke komplexnosti dějů, které v nich probíhají, je model elektrické obloukové pece. V uvažovaném případě se jedná o pec se zásaditou vyzdívkou, ve které probíhají oxidačně-reduktivní chemické reakce, které vedou k snížení hladiny prvků v tavenině. Tyto nepříznivě ovlivňují jakost oceli tím, že je převedou na jejich oxidy, které přejdou do strusky a poté se z ní oddělí od taveniny. Samotný model cyklicky čte vstupy a na základě vzniklého složení taveniny pak počítá množství zoxidovaných prvků (oxidovatelné prvky v modelu jsou C, Si, P, Ti, Mn, Mg, Cr). Dále model obsahuje jednu redukční rovnici - redukci oxidu železnatého, FeO, na železo a kyslík. Předpokládá se, že rychlost reakcí je závislá na teplotě podle Arrheniova vztahu a že reakce jsou druhého řádu. Rovnovážné koncentrace prvků jsou parametry modelu. Rovnovážná koncentrace FeO je nepřímo úměrná koncentraci uhlíku. Zdrojem kyslíku pro reakce je čistý kyslík hnaný vysokou rychlostí směrem do taveniny a v menší míře pak kyslík vzniklý redukcí FeO. Vzhledem k jeho množství v poměru k tavenině se uvažuje, že veškeré jeho množství v jednom výpočetním kroku zreaguje. Probíhající oxidační reakce jsou silně exotermní a velkou měrou přispívají k ohřívání taveniny.

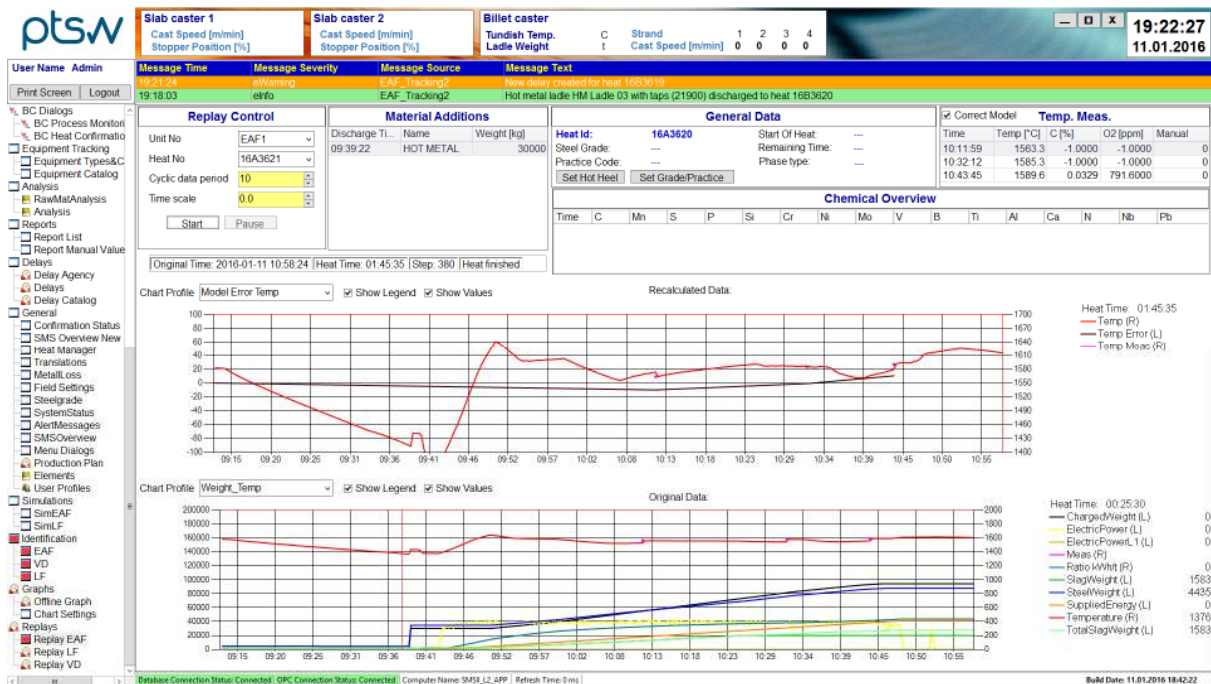
Vzhledem k velkému zjednodušení dějů v modelu se zavádí množství parametrů zohledňující ztráty jak energetické tak materiálové. Např. se uvažuje, že část vhněného kyslíku nepronikne povrchem taveniny a nemůže se tak účastnit reakcí nebo že část kyslíku vzniklého redukcí FeO „vybublá“ z taveniny nezreagována. V případě energií pak tyto parametry reprezentují tu část tepla, která vysálá ven z pece nebo odejde ve formě spalin či přetékající strusky, viz. Obr. 24.



Obr. 23 Schéma ocelárny (jednotky EAF, LF, VD) včetně hlavních vstupů, stavů a měřených výstupů.



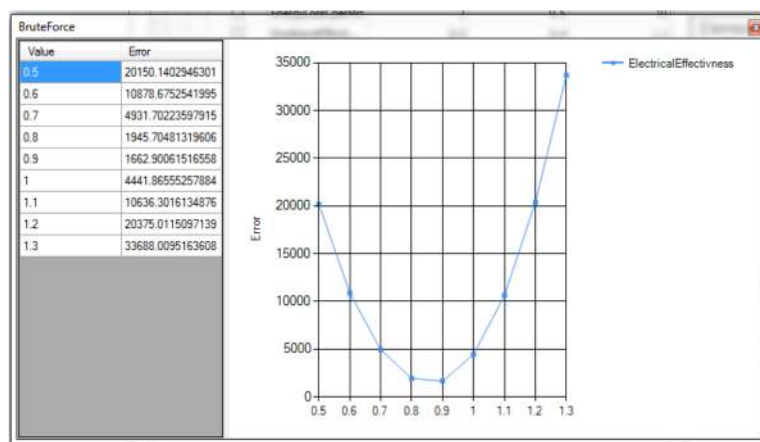
Obr. 24 Schéma energetické bilance uvažované v modelu elektrické obloukové pece EAF.



Obr. 25 Grafické rozhraní pro detailní analýzu vstupů, stavů a výstupů modelu. Simulace tavby.

Detailní simulace tavby (replay) umožňuje zpracovat a zobrazit časové průběhy všech vstupů přepočítaných výstupů v závislosti na různých změnách vnitřního modelu nebo změně parametrů. Komponenta replay umí zobrazit dva grafy nad sebou, a tím operátorovi umožnit revizi vlivu různých vstupů na výstupy a dalších příčin a následků. Každý graf dovoluje zobrazit řadu předdefinovaných profilů procesních veličin.

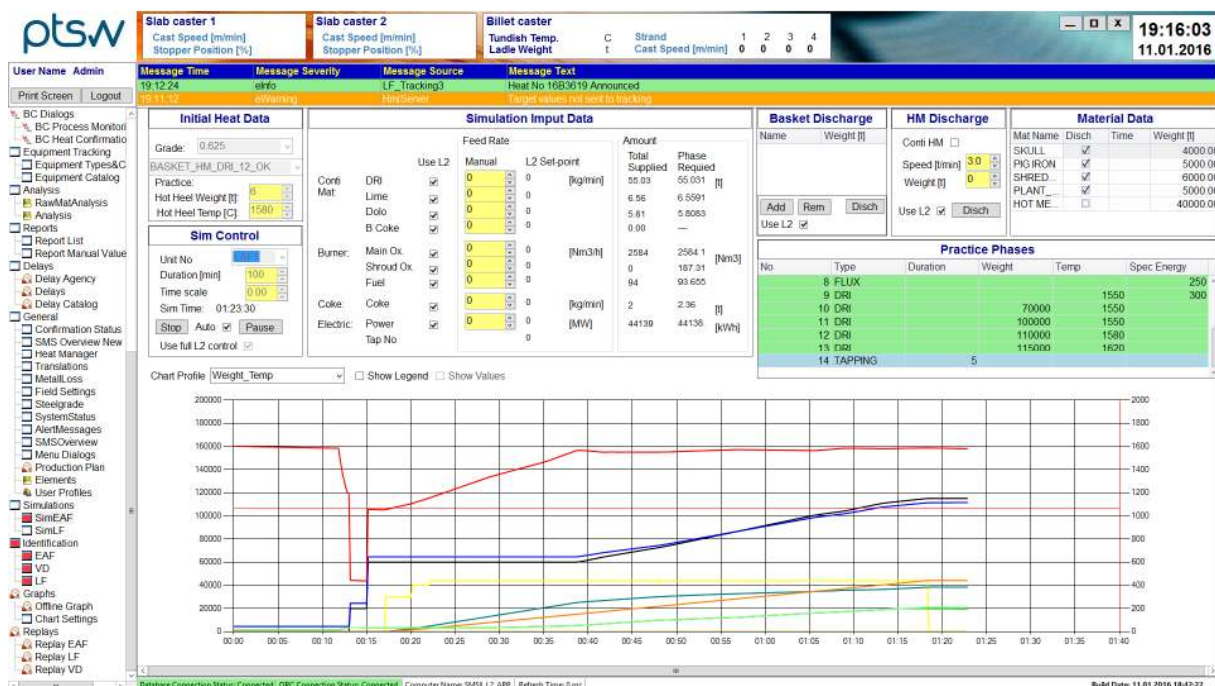
**Grafické rozhraní pro vyhodnocení výsledků identifikace a adaptace:** Software obecně vychází zejména z vizuální komponenty Identifikace. Jako doplňkové grafické rozhraní jsou k dispozici Replay tavby, Simulace tavby a Off-line grafy. Výsledky identifikace lze zhodnotit pomocí histogramu odchylek a zobrazení modelovaných veličin v porovnání s hodnotami měřenými.



Obr. 26 Vizuální komponenta, kde se zobrazuje výsledná závislost chyby matematického modelu a hodnoty jednoho parametru.



**Simulace a řízení tavby:** Simulace tavby umožňuje testování modelů pro uměle zvolená vstupní data. Vstupní data, která jsou určena k manipulaci se stavem procesu je také možno plnit hodnotami vypočtenými blokem řízení. Tak je možno testovat a ladit různé řídicí algoritmy a hledat optimální řízení. Manipulovatelné vstupy lze zadat i dle technologické praxe tavby. Úlohou řídicího bloku L2 elektrické obloukové pece EAF je neustálý a pravidelný výpočet aktuálních referenčních veličin pro podřízené systémy, které přímo řídí tok technologických veličin. Cílem řízení EAF procesu, jako primárního metalurgického procesu, je dosažení surové oceli o požadované teplotě, hmotnosti a složení s co nejnížší spotřebou elektrické energie a přídavných materiálů. Konkrétně jsou implementovány moduly pro řízení přidávání přímo redukovaného železa, které tvoří část vlastní vsázky pece a zároveň lze jeho rychlostí přidávání ovlivnit teplotu taveniny. Dále je implementován modul pro řízení struskotvorných přísad, jehož hlavním cílem je udržovat požadovanou zásaditost strusky. Dále modul pro řízení průtoku kyslíku určeného ke zkujňování oceli, který má za úkol dosáhnout žádaného odfosfoření a dekarbonizace. Tyto řídicí moduly jsou postaveny na bázi zjednodušených modelů (vzhledem ke složitosti modelu pro odhad aktuálního stavu tavby) a jsou převážně formulovány jako optimalizační úlohy a dále postoupeny univerzálnímu optimalizačnímu algoritmu, který vrátí řešení v oblasti požadovaných mezí. Úlohou řídicího bloku L2 pánvové pece LF je umožnit deoxidaci tavby, dosažení žádané teploty, vytvoření strusky a dosažení žádaných vlastností strusky zejména kvůli odsíření a v neposlední řadě dosažení žádané jakosti oceli. Akčními zásahy jsou nastavení napětového stupně a doba ohřevu elektrickým obloukem, přidávání struskotvorných, deoxidačních a legujících materiálů a nastavení parametrů probublávání inertním plynem. Jsou implementovány moduly pro výpočet optimálních přísad a doby ohřevu. Úloha řídicího bloku L2 vakuové jednotky VD je velmi podobná pánvové peci LF, jen s tím rozdílem, že místo řízení doby a napětového stupně elektrického oblouku se řídí doba vakua. Vylepšení řídicích metod a implementace a testování další pokročilých řídicích metod je předmětem další činnosti v rámci balíčku.



Obr. 27 Grafické rozhraní pro simulaci modelů procesu s manuálními nebo automaticky řízenými vstupy.

## 3. Dosažené výsledky dle struktury databáze

### RIV

#### **1xR – software: *Knihovna softwarových modulů pro monitorování a řízení průmyslových procesů***

Knihovna obsahuje následující softwarové moduly pro monitorování a optimalizaci řízení vybraných procesů hutního průmyslu, jejichž funkcionality byly popsány v Kapitole 2 této zprávy:

- Estimátor teplot vývalku na stolicích válcovací tratě implementovaný v C++ jako SW modul HSTE ver. 1.0
- Aplikace pro optimalizaci válcovací stolice za studena, obsahující SW moduly/rutiny pro výpočet průměru svitku, regulaci krouticího momentu navíječky/odvíječky, kompenzace třecích odporů, kompenzace dynamických momentů setrvačnosti při změně rychlosti válcování a vizualizaci formou operátorského panelu.
- Tuhostní model pro výpočet silového profilu válce, implementovaný v C++ jako aplikace Flattening
- Sada algoritmů a softwarových modulů pro estimaci a kompenzaci excentricity válců a proměnných dopravních zpoždění, implementovaných v ANSI C pro nasazení v systému SIEMENS SIMOTION.
- Moduly pro simulaci, identifikaci a adaptaci modelů pecí pro tavbu oceli - pecní modely, modul pro předzpracování provozních dat; modul pro filtraci věrohodných dat pro vybrané typy taveb; grafická rozhraní pro analýzu reziduí a adaptaci parametrů operátorem; optimalizační nástroje pro identifikaci parametrů procesů.

#### **Publikační výsledky k danému výstupu v letech 2014-2015:**

1 x Jimp [9]

5 x D – článek ve sborníku [3, 4, 7, 8, 10]

2 x C – kapitola v knize [5, 6]

## 4. Reference

- [1] Fišer, J., Zítek, P., Vyhlídal, T., Skopec, P., Knobloch, J., Applying Heat Transfer Models to Estimating the Strip Temperatures in Steel Rolling Mill Lines, výzkumná zpráva projektu CK-CAK3.
- [2] Simeunovic, G., Zítek, P., Vyhlídal, T., Separate Identification of Delays and Coefficients of Single Input Single Output Time Delay Systems, in review in Journal of Process Control
- [3] Fišer, J., Zítek, P., and Kučera, V. (2014), IAE optimization of delayed PID control loops using dimensional analysis approach. In: Proc 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), 2014, 262-265, IEEE, Athens.
- [4] Fišer, J., Zítek, P., Vyhlídal, T., Magnitude Optimum Design of PID Control Loop with Delay In Proc. 12th IFAC Workshop on Time Delay Systems TDS 2015 - Ann Arbor, Michigan, USA, 28–30 June 2015, IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 12, 2015, Pages 446–451
- [5] Zítek, P. - Fišer, J. - Vyhlídal, T.: Dominant Trio of Poles Assignment in Delayed PID Control Loop. In Delay Systems: From Theory to Numerics and Applications. New York: Springer, 2014, p. 57-70.
- [6] Zítek, P., Bušek, J., Vyhlídal, T. "Anti-Windup Conditioning for Actuator Saturation in Internal Model Control with Delays." *Low-Complexity Controllers for Time-Delay Systems*. Springer International Publishing, 2014. 31-45.
- [7] Kučera V., Castañeda Toledo E.: A review of stable exact model matching by state feedback. Proceedings 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, Palermo 2014, 85-90.
- [8] Castañeda Toledo E., Kučera V., Ruiz León J.: Model matching via stabilizing static state feedback. Preprints 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 2014, pp. 4709-4714
- [9] Castañeda-Toledo E., Kučera V., Ruiz-León J.: Realization of full column rank precompensators using stabilizing static state feedback. *Systems & Control Letters* 76 (2015), 2, 42–46.
- [10] Kučera V.: Which state feedback control laws will not alter the system's transfer function? In: Moreno-Díaz et al. (Eds.): EUROASYT 2015, Lecture Notes in Computer Science 9520, pp. 3-9, 20P15.
- [11] Kuchař, Jan. Návrh a implementace software pro adaptaci parametru modelu tavby oceli. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2016.