

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 614

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Vítězslav Máša

**Matematický model
kotle na biomasu
pro účely řízení**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav automatizace a informatiky

Ing. Vítězslav Máša

**MATEMATICKÝ MODEL KOTLE NA BIOMASU
PRO ÚČELY ŘÍZENÍ**

**MATHEMATICAL MODEL OF BIOMASS BOILER
FOR CONTROL PURPOSES**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Ivan Švarc, CSc.
Oponenti: prof. Ing. Jiří Klemeš, CSc.
prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.
Datum obhajoby: 22. 11. 2010

Klíčová slova

Spalování biomasy, regulace kotlů, identifikace systémů, bilanční model, analýza přechodové charakteristiky, simulace.

Keywords

Biomass combustion, boiler control, system identification, balance model, step response analysis, simulation.

Místo uložení dizertační práce

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

© Vítězslav Máša, 2010

ISBN 978-80-214-4234-4

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI	5
2.1 Modelování pro účely řízení	5
2.2 Řídicí systémy zdrojů středních výkonů.....	6
3 ZAMĚŘENÍ A CÍLE PRÁCE.....	8
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOSY PRÁCE	11
4.1 Sestavení a ověření bilančního modelu kotle v programu W2E.....	11
4.1.1 Představení experimentální jednotky a volba sledovaných veličin.....	11
4.1.2 Sestavení bilančního modelu.....	13
4.1.3 Verifikace a zhodnocení bilančního modelu	13
4.2 Vytvoření dynamického modelu kotle.....	13
4.2.1 Závislosti mezi vyšetřovanými veličinami	14
4.2.2 Modelování recirkulace spalin.....	16
4.2.3 Nelineární charakteristiky systému.....	16
4.3 Návrh modelu řízení a parametrizace regulátorů.....	16
4.4 Simulace a zhodnocení modelu.....	18
4.4.1 Simulace modelu regulované soustavy	18
4.4.2 Simulace uzavřeného regulačního obvodu včetně regulace	19
5 ZÁVĚR.....	21
LITERATURA	23
ŽIVOTOPIS.....	24
PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY	26
ABSTRACT	28

1 ÚVOD

Předložená práce je tématicky zaměřena na biomasové kotle, tedy tepelné zdroje spalující biomasu za účelem produkce horké vody nebo páry, která je dále využitelná pro výrobu elektrické energie. Spalování biomasy má dlouhou tradici, a proto lze považovat současné technologie za provozně ověřené. To však nijak nesnižuje význam dalšího vývoje biomasových kotlů, jak z pohledu účinnosti a s ní souvisejícími dopady na životní prostředí, tak z pohledu uživatelské náročnosti. Oproti spalování např. zemního plynu klade biomasa se svými proměnnými vlastnostmi vysoké nároky na řízení přívodu spalovacího vzduchu. Specifická je také konstrukce těchto jednotek. Výzva pro jejich další vývoj je univerzální, ať už mluvíme o malých zdrojích zajišťujících vytápění rodinných domů nebo výkonných jednotkách pro vytápění větších oblastí nebo průmyslových areálů. Pro investora, který zvažuje nasazení nového tepelného zdroje, je rozhodující zejména to, zda bude jeho využití dlouhodobě výnosné. Ekonomika provozu středních zdrojů tepla je určena vedle podmínek pro výkup vyrobeného tepla či elektřiny především cenou paliva. Přirozeně se tedy klade důraz na maximálně efektivní využití biomasy. Současné vývojové trendy jsou zaměřeny na hledání cest, jak snížit provozní náklady a zvýšit účinnost biomasových kotlů. V otázce dokonalosti spalovacího procesu a účinnosti zařízení přitom může sehrávat podstatnou roli nastavení řídicího systému. Manipulace s biomasou a její spalování je ovšem procesně výrazně komplikovanější, než je tomu např. u zmíněného zemního plynu. Zvyšování účinnosti kotlů na biomasu a snižování nároků na obsluhu jsou proto hlavní požadavky na automatizaci těchto technologií.

Kvalita řídicího systému ovšem závisí na objemu finančních prostředků, které jsou pro tyto účely vyhrazeny. Výše dostupných finančních prostředků je obvykle spojena s výkonem řízené technologie. Dizertační práce je zaměřena na tepelné zdroje *středních výkonů*, jejichž rozpočet umožňuje vývoj a nasazení sofistikovanějších řídicích systémů v porovnání s malými zdroji tepla. Také provozní náklady a potenciální úspory spojené s kvalitou regulace předpokládají zodpovědný přístup k jejímu návrhu. Volba středních zdrojů tepla na spalování biomasy jako předmětu dizertační práce také vychází z možnosti provozních zkoušek na reálné technologii z této kategorie zdrojů. Jedná se o moderní biomasovou jednotku o výkonu 1 MW, na jejímž vývoji se podílel *Ústav procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně*.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI

2.1 MODELOVÁNÍ PRO ÚČELY ŘÍZENÍ

Cílem dizertační práce je sestavení matematického modelu kotle jako regulované soustavy, který by byl vhodný pro návrh, příp. optimalizaci systému řízení. Tvorba matematických modelů a následná simulace pro účely řízení jsou v současné době využívány napříč průmyslovými odvětvími. Významný vývoj je znám především z oblasti modelování rafinačních procesů, kde se modely používaly pro podporu

vyšších forem řízení (Advanced Process Control, APC), byly integrovány do distribuovaných systémů řízení (Distributed Control System, DSC) a využívány v trenažérech pro operátory (Operator Training System, OTS) [1]. V rámci diskuse renomovaných odborníků z akademických pracovišť i z firem v oblasti modelování a simulace [2] byl dále zmiňován například automobilový průmysl, letectví, elektrotechnika, ale i řízení čistíren odpadních vod (ČOV) nebo sklářských procesů.

Pro návrh a nastavení řídicího systému (pro účely řízení) je podstatné, aby model postihoval chování regulované soustavy v závislosti na čase, hovoříme o tzv. *dynamickém modelu*. V literatuře [3] byla provedena rešerše odborných publikací zaměřených na dynamické modelování a simulaci v oblasti výroby a distribuce tepla. Ukázala však, že modely vznikají především pro dílčí komponenty technologií pro výrobu tepla, jako je plynový kotel nebo výměník tepla a méně často pro celé technologie. Tyto komplexnější modely jsou přitom pro návrh regulace klíčové, protože umožňují simulaci dynamického chování systému se všemi jeho vnitřními vazbami. Co se týká přímo kotlových zařízení, dynamické modely se v odborných publikacích objevují velmi zřídka a soustřeďují se na výkonné kotle spalující fosilní paliva [4],[5],[6],[7]. Jediná nalezená publikace věnující se dynamické simulaci kotle na biomasu [8] pracuje s příliš zjednodušeným modelem kotle a zaměřuje se více na návazné aparáty pro využití vyrobené páry a technologii jako celek. Sofistikovanější model pro účely řízení, který by popisoval dynamické chování kotle pro spalování biomasy, nebyl v rámci provedené rešerše nalezen.

2.2 ŘÍDICÍ SYSTÉMY ZDROJŮ STŘEDNÍCH VÝKONŮ

S vývojem konstrukce tepelných zdrojů středních výkonů, který musí respektovat všechna omezení spojená se spalováním biomasy, dochází k postupným změnám také v oblasti řízení. Ty souvisí především s rozšířením osobních počítačů, jejichž podpora je u zdrojů středních výkonů využívána čím dál častěji. Zřejmě nejvýrazněji se vývoj řídicích technologií projevuje v možnostech rozšířeného monitorování a v dálkovém řízení zdrojů pomocí internetu. Výkon současných počítačů umožňuje také realizaci složitějších výpočetních a optimalizačních algoritmů a kvalitní grafickou prezentaci řízené technologie. V posledních desetiletích byly vyvinuty nové formy řízení obecně označované jako moderní metody řízení (APC). Používány bývají především při řízení systémů s větším počtem vstupů a výstupů a v oblasti diskrétního řízení. Některé z těchto nových přístupů se zdají být velmi slibné v průmyslových aplikacích a vzbuzují stále vyšší zájem mezi výzkumnými pracovníky. Konkrétně můžeme zmínit například tzv. prediktivní řízení na základě modelu technologie (Model Predictive Control, MPC), jehož široké využití je známo v petrochemickém průmyslu [9], dále stavové řízení, fuzzy řízení apod.

U biomasových kotlů středních výkonů nejsou pokusy o nasazení těchto metod dosud známy. Jejich řídicí systém obvykle sestává z kombinace klasického zpětnovazebního (PID) řízení realizovaného stavebnicovým regulátorem nebo průmyslovým automatem a osobního počítače ve funkci centrály. PID algoritmus je standardní metoda řízení pro systémy s jedním vstupem a výstupem ze 40. let

minulého století. Je velmi dobře teoreticky zpracovaný a v praxi spolehlivě funguje [10]. Tam, kde to regulovaná soustava umožňuje, je využití PID řízení velmi efektivní volbou (např. u plynových kotlů). Podobně i v případě jednotek pro spalování biomasy je v současnosti využití PID regulátorů standardem. Proces spalování biomasy je však určován větším množstvím vstupů a výstupů a důležité veličiny jsou na sobě do značné míry závislé. Kromě přívodu paliva je totiž dokonalost spalovacího procesu ovlivňována také množstvím přiváděného vzduchu a místem jeho přívodu. Navíc je často žádoucí spalovat více druhů biomasy, přičemž spotřeba a nastavení přívodu spalovacího vzduchu jsou pro každý z nich specifické. Jedná se tedy o systém s větším množstvím parametrů, které je třeba pro optimální spalování přizpůsobit. Tato skutečnost, která zvyšuje nároky na regulaci, biomasové kotle výrazně odlišuje od tradičních kotlů (spalujících nejčastěji uhlí nebo zemní plyn). Dynamické chování i klasická PID regulace zdrojů na fosilní paliva je dobře popsána a ověřena i v praxi [11]. Bližší znalost těchto zdrojů poskytuje cenná vodítka také pro hlubší pochopení dynamiky kotlů na biomasu, jejichž regulace za sebou ještě nemá tak dlouhý vývoj. PID regulační smyčky se u biomasových kotlů obvykle starají o nižší řídicí okruhy (např. udržování teploty topné vody nebo přívod spalovacího vzduchu v závislosti na množství přiváděného paliva), zatímco na člověku zůstává ruční nastavení žádaných parametrů regulovaných a často i akčních veličin (např. žádané teploty výstupní a vratné vody, průtoku spalovacího vzduchu apod.) v závislosti na typu paliva. Nevýhoda této strategie je zřejmá - zvýšené nároky na obsluhu. Stálá přítomnost operátora je přitom u zdrojů středních výkonů z ekonomického hlediska těžko myslitelná. Omezené možnosti dozoru však často vyvolávají nežádoucí provozní režim technologie, jehož častým projevem bývá opakované odstavování a najíždění systému. Příčinou tohoto tzv. *cyklování* bývá překročení žádané hodnoty regulované veličiny nebo zásahy bezpečnostních prvků při překročení mezi některé z dalších sledovaných veličin, viz kap. 3 .

Důsledkem popsaných jevů je snížení životnosti a účinnosti zařízení a také nárůst emisí znečišťujících látek. Předností klasického PID řídicího systému je na druhé straně ověřenost a nízké náklady na jeho projekci i realizaci ve srovnání s jakoukoli moderní metodou řízení. Přínosem moderních metod řízení oproti PID regulaci mohou být úspory na provozních nákladech ([12] udává rozsah úspor od 2 do 6 %) a příznivé dopady na stabilitu regulace. Je však nutné zohlednit náklady spojené s návrhem a seřízením těchto sofistikovaných řídicích systémů. Možnost jejich využití v nové oblasti – u tepelných zdrojů na biomasu – je jedním ze zajímavých směrů, kterými se mohou vyvíjet další výzkumné práce.

Lze konstatovat, že jednotky pro spalování biomasy jsou svým charakterem vhodnou technologií pro využití moderních metod řízení. Jak již však bylo uvedeno, v praxi tento předpoklad nedochází naplnění. Vedle skutečnosti, že samotný vývoj a implementace moderních metod je složitý a finančně náročný proces, je jedním z hlavních důvodů také nedostatek vhodných dynamických modelů tohoto procesu. Pro testování a případné zavádění moderních metod řízení (zejména MPC) je totiž zpravidla nezbytná znalost modelu regulované soustavy [13]. Model dynamického

systemu je určité pravidlo, podle něhož můžeme z předem známých nebo změřených veličin vypočítat časový průběh sledovaných veličin systému. Lze říci, že úkolem modelu je co nejspíšeji predikovat či reprodukovat chování systému. Význam takového modelu se ukazuje i tam, kde je požadována optimalizace parametrů klasické PID regulace (PID tuning) a není možné rozsáhlejší testování v provozním měřítku.

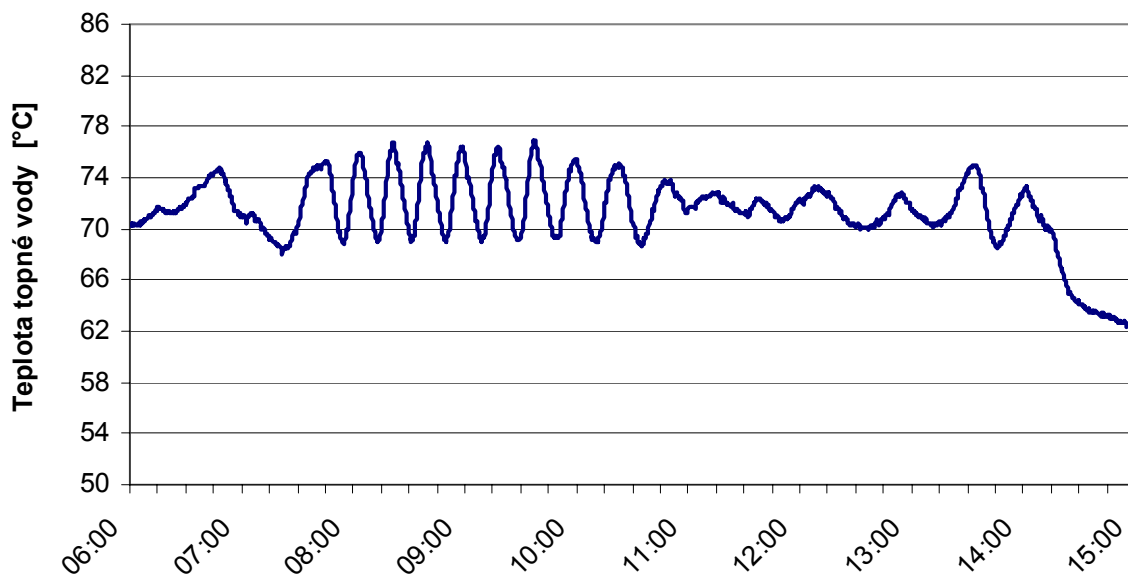
3 ZAMĚŘENÍ A CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem předložené dizertační práce je aplikace teoretických poznatků a přístupů dynamického modelování při řešení praktické úlohy, kterou je *sestavení matematického modelu kotle na biomasu jako regulované soustavy a následný návrh modelu regulace této soustavy*. Jak již bylo zmíněno, existence dynamického modelu je spojena zejména s možností širšího simulačního testování alternativních nastavení parametrů kotle a jeho regulace bez nutnosti přímé vazby na provozované zařízení. Rozsáhlejší testování těchto zařízení je v praxi velmi problematické a často omezené, protože ihned po realizaci musí kotel plnit svoji funkci. Zhoršená setrvačnost biomasových kotlů navíc prodlužuje dobu provozních testů, což zvyšuje časovou náročnost výzkumných prací. Experimentální měření a záznam dat navíc předpokládá přístrojové vybavení, které zvyšuje náklady na výzkum těchto zařízení. Regulátory kotlů na biomasu proto bývají v praxi nastaveny na základě předchozích provozních zkušeností. Toto zdánlivě kvalitní nastavení však může být často daleko od optimálního. Negativními projevy takto nastaveného regulátoru jsou např. příliš dlouhá doba ustálení po změně žádané hodnoty regulované veličiny nebo zhoršená stabilita regulace při nižších výkonech. Takové nestabilní chování systémů má negativní dopad na životnost zařízení a produkci emisí znečišťujících látek.

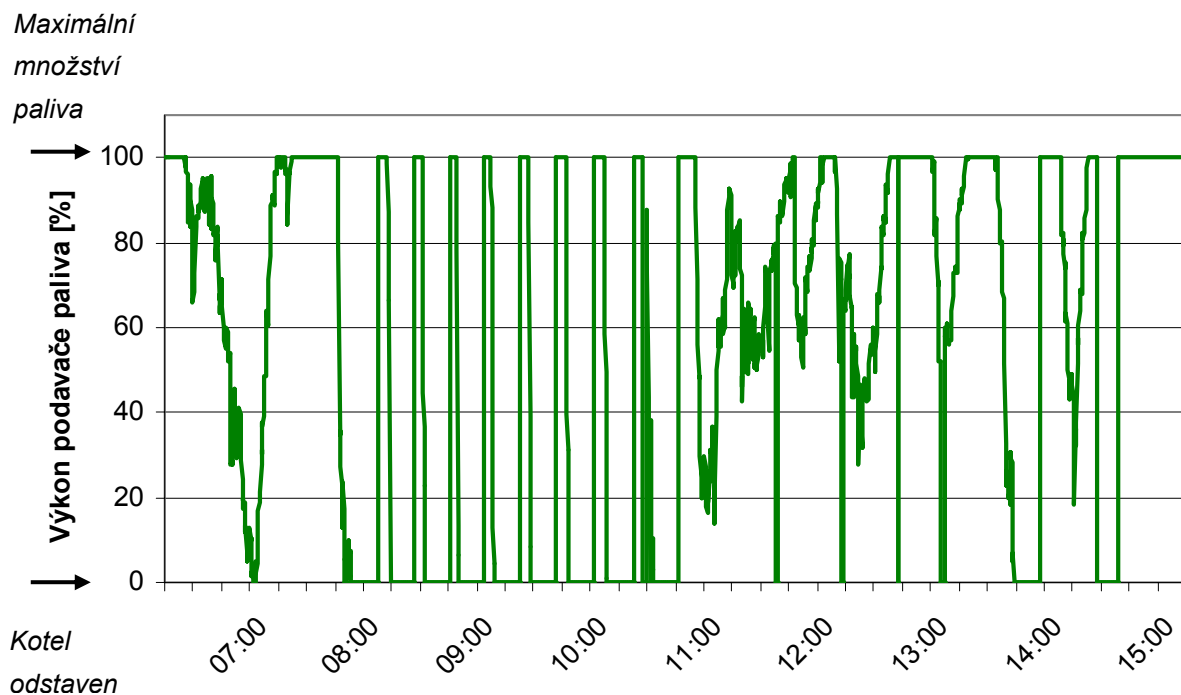
Na obr. 1 je ukázka průběhu teploty výstupní topné vody při běžném provozu vyšetřované jednotky. Jedná se o pracovní den, kdy v době od 7:00 do 14:00 probíhala regulace teploty topné vody na konstantní hodnotu 75 °C. Díky přibližně stálým tepelným ztrátám vytápěné haly není systém zatížen výraznými výkyvy odběru tepla. Přesto se regulátoru nepodařilo teplotu topné vody (dále TV) ustálit. Tento nepříznivý regulační průběh je způsoben zejména problematickou setrvačností biomasových kotlů a dopravním zpožděním dodávky paliva. Akční veličina (průtok paliva a adekvátní množství spalovacího vzduchu) během takto nestabilního regulačního pochodu kolísá mezi svojí maximální a minimální hodnotou. Zásahy regulátoru ukazuje pomocná veličina *Výkon podavače paliva [%]* na obr. 2. Je patrné, že prakticky není využito regulačního rozsahu a veličina opakovaně střídá extrémní polohy 0 a 100 %. Toto odstavování a najíždění celé technologie (tzv. cyklování) výrazně zatěžuje akční členy používané pro regulaci (ventilátory, pohony) a vyvolává zmíněné snižování životnosti celého zařízení.

Záměrem dizertační práce je sestavení modelu kotle jako regulované soustavy. Následná simulace regulačního obvodu s tímto modelem umožní hlubší pochopení dynamiky zkoumaného systému a poskytne prostředek k efektivnímu návrhu vhodnějšího způsobu regulace (resp. modelu regulace). Úprava systému řízení by

měla přinést především stabilizaci regulace kotle při provozu v nižších výkonových úrovních. Pokud bude přechodový děj spojený s akčním zásahem regulátoru stabilní, je možné další úpravou parametrů regulace zvýšit její kvalitu (maximální překmit, rychlost regulace). Základním požadavkem na model přitom je, aby s dostatečnou přesností popisoval chování reálného, provozovaného kotle. Jen na tomto základě lze navržené úpravy regulace použít v provozu.




Obr. 1 Nežádoucí kolísání výstupní teploty topné vody při běžném provozu kotle



Obr. 2 Průběh výkonu podavače paliva při běžném provozu kotle

Úspěšná úprava regulace v provozním měřítku by znamenala odstranění všech nežádoucích dopadů nestabilního chodu jednotky. Ve výsledku by tedy měla tato dizertační práce přispět k pokroku v oblasti řízení kotlů na biomasu. Jedná se o významnou součást cesty k maximálně efektivnímu energetickému využívání biomasy. Dílčí kroky vedoucí k naplnění cíle dizertační práce upřesňuje tab. 1.

	Dílčí cíl	Způsob řešení
1	Příprava provozních dat	Experimentální měření na kotli, sběr dat a tvorba jednotné databáze záznamů
2	Sestavení bilančního modelu	Analytická identifikace – sestavení bilančního modelu v SW <i>W2E</i>
3	Popis dynamického chování kotle	Experimentální identifikace - matematický popis závislostí mezi vstupními a výstupními veličinami systému
4	Popis nelineárního chování kotle	Matematický popis nelineárních závislostí pomocí statických charakteristik na základě bilančního modelu v SW <i>W2E</i>
5	Návrh modelu regulace a jeho nastavení	Sestavení modelu konvenční regulace a její parametrizace podle přechodové charakteristiky regulované soustavy
6	Ověření platnosti modelu	Provedení simulačních výpočtů a porovnání výsledků s experimentálními daty
7	Ověření a seřízení modelu regulace na modelu	Provedení simulačních výpočtů a testování různých nastavení regulace
 <p>HLAVNÍ CÍL PRÁCE : <i>sestavení matematického modelu kotle na biomasu jako regulované soustavy a následný návrh modelu regulace této soustavy</i></p>		

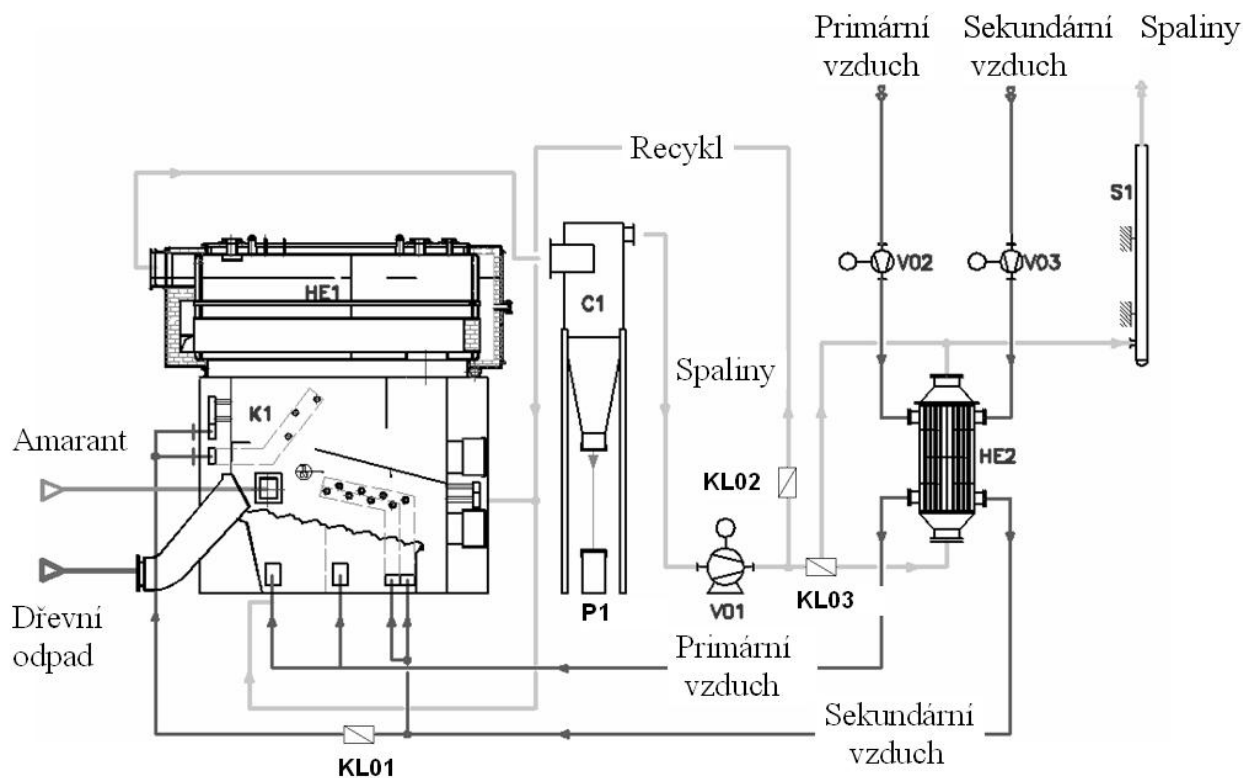
Tab. 1 Přehled cílů dizertační práce a způsoby jejich realizace

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOSY PRÁCE

4.1 SESTAVENÍ A OVĚŘENÍ BILANČNÍHO MODELU KOTLE V PROGRAMU W2E

4.1.1 Představení experimentální jednotky a volba sledovaných veličin

Pro tvorbu modelu byla využita experimentální data získaná měřeními na biomasovém kotli, jehož vývoj proběhl pod záštitou Ministerstva průmyslu a obchodu, jako součást programu Impuls FI-IM3/166 „Prototyp jednotky o výkonu 1 až 3 MW pro energetické využití různých druhů biomasy a fytohmoty“ a výzkumného záměru MŠMT č. MSM 0021630502 „Ekologicky a energeticky řízené soustavy zpracování odpadů a biomasy“ (dále předmětná jednotka). Na řešení se podílel také Ústav procesního a ekologického inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Projekt byl v r. 2009 úspěšně dokončen. V průběhu trvání projektu a po jeho skončení bylo možné realizovat opakovaná měření za účelem sběru dat pro identifikaci systému. Technologické uspořádání experimentální jednotky ukazuje obr. 3.



- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| K1 – Spalovací komora | V01 – Spalinový ventilátor |
| HE1 – Teplovodní výměník | V02 – Ventilátor primárního vzduchu |
| HE2 – Rekuperační výměník | V03 – Ventilátor sekundárního vzduchu |
| C1 – Multicyklon | KL01 – Klapka sekundárního vzduchu |
| S1 – Komín | KL02 – Klapka recirkulace spalin |
| P1 – Popelnice | KL03 – Klapka rekuperace tepla spalin |

Obr. 3 Zjednodušené technologické schéma jednotky [14]

Jedná se o kotel se šikmým hydraulickým roštem o výkonu 1 MW sloužící k ohřevu topné vody. Kotel disponuje některými technologickými prvky, které se u zdrojů středních výkonů v širší míře začaly používat až v nedávné době. Jde o:

- rekuperační výměník pro přehřev spalovacího vzduchu,
- systém recirkulace spalin,
- distribuci proudů spalovacího vzduchu a recirkulovaných spalin do určených oblastí spalovací komory.

Prvním krokem identifikace dynamického systému je volba klíčových vstupních a výstupních veličin k měření a vyhodnocení. Ta byla provedena na základě znalosti stávajícího řídicího systému a rozšířena o další veličiny, jejichž znalost byla nutná pro zpřesnění okrajových podmínek vytvářeného bilančního modelu i pro úspěšnou experimentální identifikaci jednotky (tab. 2).

Významným parametrem systému je také použité palivo. Jako referenční palivo byla zvolena směs dřevní štěpky a kůry s výhřevností (LHV) 16,8 MJ/kg a obsahem vody 40,0 %.

	Označení	Jednotka	Předpokládaný provozní rozsah	Zdroj dat
VSTUPNÍ VELIČINY				
Průtok (množství) paliva	$u_1(t)$	kg/h	150÷350	Výpočet PC
Průtok sekundárního vzduchu	$u_2(t)$	m_N^3/h	1400÷2400	PC
Otevření kl. recirkulace spalin	$u_3(t)$	%	0÷100	PC
VÝSTUPNÍ VELIČINY				
Teplota výstupní topné vody	$y_1(t)$	°C	70÷90	PC
Teplota ve spalovací komoře	$y_2(t)$	°C	max. 950	PC, termočlánek
Koncentrace O ₂ ve spalinách	$y_3(t)$	%	5÷15	Analyzátor spalin
DALŠÍ SLEDOVANÉ VELIČINY				
Průtok primárního vzduchu	-	m_N^3/h	700÷1100	PC
Průtok recirkulovaných spalin	-	m_N^3/h	0÷800	PC
Objemový průtok topné vody	-	m_N^3/h	30÷35	DataLab, SDI
Teplota vratné topné vody	-	°C	50÷65	PC, Ni 1000
Tep. výst. spalin z výměníku	-	°C	100÷140	PC, Ni 1000

Tab. 2 Přehled zvolených veličin pro identifikaci regulované soustavy

4.1.2 Sestavení bilančního modelu

V první fázi tvorby dynamického matematického modelu kotle jako regulované soustavy byl vytvořen tzv. bilanční model tohoto kotle. Bilanční model poskytuje důležité informace o předpokládaných provozních podmínkách, např. o spotřebě spalovacího vzduchu, paliva nebo o množství a složení vznikajících spalin. Vytvořený bilanční model byl po svém přizpůsobení reálným provozním podmínkám využit i pro sestavení dynamického matematického modelu, přičemž poskytl důležité informace o statickém chování procesu. Přesný bilanční model předmětné technologie umožňuje definovat konkrétní hodnoty vstupních a výstupních veličin v ustáleném stavu. Pro jeho tvorbu byl využit SW *W2E* [15]. Výslednou strukturu modelu, která odpovídá technologickému uspořádání předmětné jednotky (obr. 3), ukazuje příloha č. 3 dizertační práce.

4.1.3 Verifikace a zhodnocení bilančního modelu

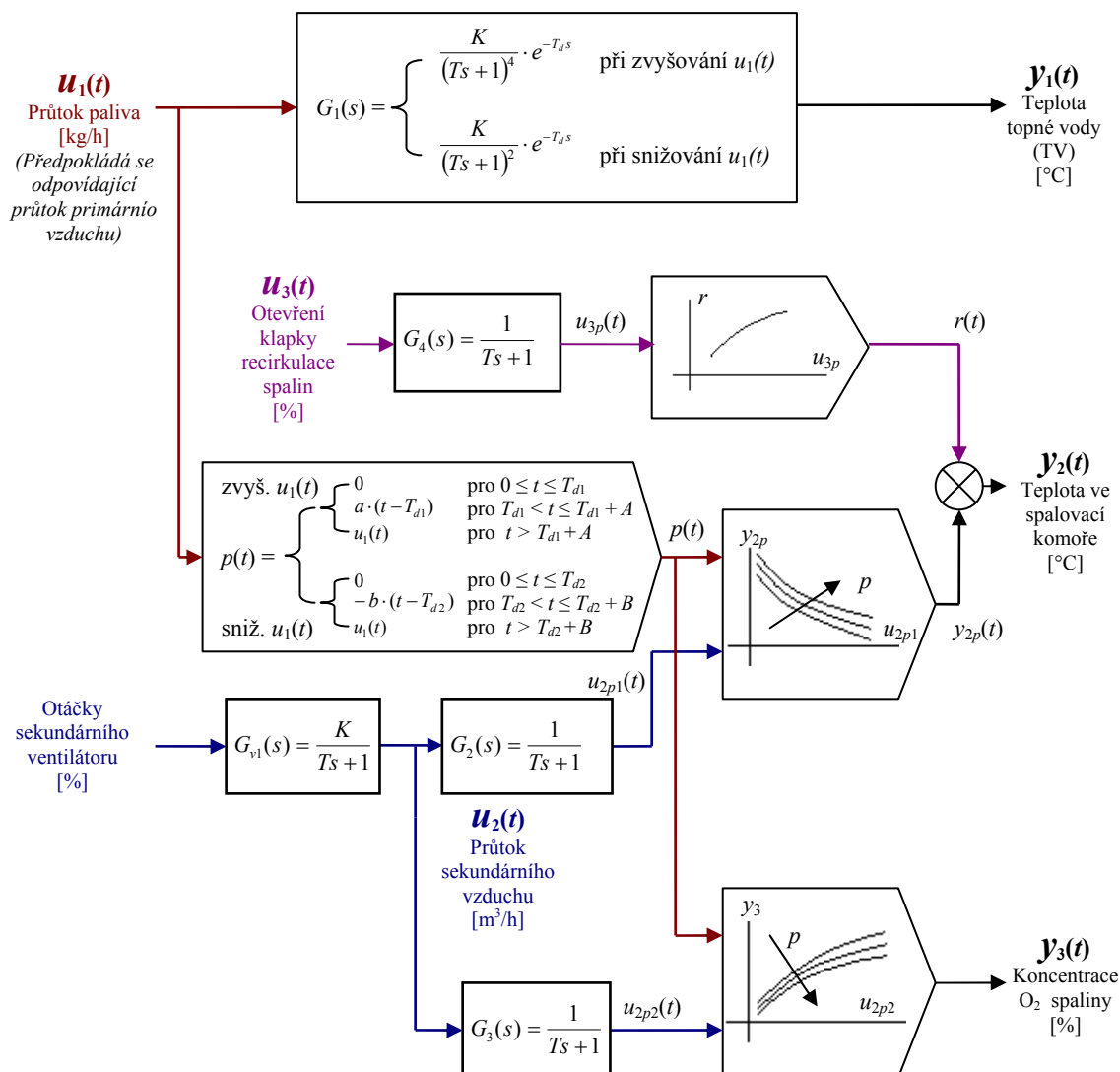
Již v rámci návrhu jednotky pro termické zpracování různých druhů biomasy byl v prostředí *MS Excel* vytvořen bilanční model, který vychází ze stejného matematického popisu jako program *W2E*. Porovnání obou modelů umožnilo nejprve vyloučit chybu metodiky sestavení modelu ve *W2E* a ověřilo platnost jeho struktury. Dalším krokem bylo ověření bilančního modelu jeho porovnáním s naměřenými daty. Na základě tohoto porovnání bylo možné konstatovat, že bilanční model popisuje chování reálného systému s dostatečnou přesností tehdy, když není využito recirkulace spalin. Pokud je recirkulace v provozu, je třeba provést dodatečnou korekci vypočtené teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$. Vzhledem k omezenému počtu měření s vyhodnocením průtoku recirkulovaných spalin není možné parametry této korekce přesněji kvantifikovat. Využití recirkulace spalin v bilančním modelu se tedy nabízí především pro posouzení jejího vlivu na koncentraci O_2 ve spalinách $y_3(t)$, kde není odchylka tak výrazná. Jak dokládají následující kapitoly, další využití bilančního modelu (pro definici ustálených stavů pro přechodové charakteristiky systému) uvedené závěry o jeho přesnosti potvrdilo.

4.2 VYTVOŘENÍ DYNAMICKÉHO MODELU KOTLE

Prvním a často velmi náročným krokem k úspěšnému sestavení věrohodného modelu je návrh jeho struktury. Model jednotky pro spalování biomasy se vyvíjel postupně s přibývajícimi zkušenostmi z jejího provozu. Výsledná struktura modelu, která postihuje všechny důležité komponenty a vnitřní vazby regulované soustavy (kotle na biomasu) je znázorněna na obr. 4. Jedná se o klíčový obrázek celé dizertační práce.

Přesnějšího a jednoduššího popisu modelované technologie lze docílit jejím rozložením na dílčí bloky. Dynamické chování systému je v souladu s tab. 2 popsáno pomocí tří vstupních veličin $u(t)$ a tří výstupních veličin $y(t)$. Jejich vazby jsou definovány propojením bloků s lineárním popisem (v obdélnících) a

nelineárním popisem (v pětiúhelnících). Parametrizace bloků probíhala s využitím metod analytické a experimentální identifikace.



Obř. 4 *Návrh struktury modelu regulované soustavy – kotle na biomasu*

4.2.1 Závislosti mezi vyšetřovanými veličinami

Všechny funkce a rovnice získané na základě analýzy přechodových dějů (experimentální identifikace) uvnitř identifikovaného zařízení shrnuje tab. 3. Modelování recirkulace spalin a tvorba nelineárních charakteristik, které vycházejí především z bilančního modelování (analytické identifikace), jsou popsány v následujících podkapitolách (4.2.2 a 4.2.3).

Matematický popis	Závislost v systému
$G_1(s) = \frac{0,0615}{(200s + 1)^4} \cdot e^{-480s}$	odezva teploty výstupní TV $y_1(t)$ na <i>zvýšení</i> průtoku paliva $u_1(t)$
$G_1(s) = \frac{0,06}{(165s + 1)^2} \cdot e^{-150s}$	odezva teploty výstupní TV $y_1(t)$ na <i>snížení</i> průtoku paliva $u_1(t)$
$p(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } 0 \leq t \leq 165 \\ 0,21 \cdot (t - 165) & \text{pro } 165 < t \leq 165 + A \\ u_1(t) & \text{pro } t > 165 + A, \end{cases}$ <p>kde $A = 4,77 \cdot u_1(t)$</p>	dynamika teploty ve spal. komoře $y_2(t)$ při <i>zvýšení</i> průtoku paliva $u_1(t)$
$p(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } 0 \leq t \leq 20 \\ -0,116 \cdot (t - 120) & \text{pro } 120 < t \leq 120 + B \\ u_1(t) & \text{pro } t > 120 + B, \end{cases}$ <p>kde $B = 8,78 \cdot u_1(t)$</p>	dynamika teploty ve spal. komoře $y_2(t)$ při <i>snížení</i> průtoku paliva $u_1(t)$
$G_2(s) = \frac{1}{310s + 1}$	dynamika teploty ve spal. komoře $y_2(t)$ při změně průtoku sek. vzduchu $u_2(t)$
$p(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } 0 \leq t \leq 165 \\ 0,21 \cdot (t - 165) & \text{pro } 165 < t \leq 165 + A \\ u_1(t) & \text{pro } t > 165 + A, \end{cases}$ <p>kde $A = 4,77 \cdot u_1(t)$</p>	dynamika konc. O_2 ve spalinách $y_3(t)$ při <i>zvýšení</i> průtoku paliva $u_1(t)$ pozn. stejné jako u teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$
$p(t) = \begin{cases} 0 & \text{pro } 0 \leq t \leq 20 \\ -0,116 \cdot (t - 120) & \text{pro } 120 < t \leq 120 + B \\ u_1(t) & \text{pro } t > 120 + B, \end{cases}$ <p>kde $B = 8,78 \cdot u_1(t)$</p>	dynamika konc. O_2 ve spalinách $y_3(t)$ při <i>snížení</i> průtoku paliva $u_1(t)$ pozn. stejné jako u teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$
$G_3(s) = \frac{1}{10s + 1}$	dynamika konc. O_2 ve spalinách $y_3(t)$ při změně průtoku sek. vzduchu $u_2(t)$
$G_{v1}(s) = \frac{24}{2,2s + 1}$	odezva průtoku sek. vzduchu $u_2(t)$ na změnu otáček sek. ventilátoru

Tab. 3 Souhrn sestavených přenosových funkcí a rovnic pro popis dynamického chování kotle

4.2.2 Modelování recirkulace spalin

Vliv průtoku recirkulovaných spalin na teplotu ve spalovací komoře $y_2(t)$ je značně nelineární v závislosti na aktuálním poměru průtoku paliva a průtoku spalovacího vzduchu. Jinak řečeno, stejný skok recirkulace vyvolá jinou odezvu teploty v komoře při nízkém výkonu kotle a jinou při vysokém. Hlubší výzkum bilančního modelu ovšem ukázal způsob, jak se vyhnout složitému popisu této nelinearity a jak ji efektivně zapracovat do modelu. Podařilo se najít následující závislost mezi otevřením klapky recirkulace $u_3(t)$ (v %) a poklesem teploty ve spalovací komoře $r(t)$ (v % aktuální teploty):

$$r(t) = -0,0068 u_3^2(t) + 1,3891 u_3(t) - 28,709 \quad (1)$$

Rovnice je platná pouze pro rozsah 30 až 80 % otevření klapky recirkulace a vychází z bilančního modelu $W2E$. Mimo tento rozsah nelze z naměřených dat doložit charakteristiku klapky recirkulace. Veličina $r(t)$ je pomocná veličina, kterou je třeba zahrnout do výsledné teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$.

Rychlost změn teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$ v závislosti na změnách otevření klapky recirkulovaných spalin $u_3(t)$ je popsána pomocí veličiny $u_{3p}(t)$. Dynamika této odezvy se předpokládá stejná jako v případě odezvy na skok sekundárního vzduchu $u_2(t)$ a můžeme ji tedy popsat přenosovou funkcí (2). Její začlenění do modelu regulované soustavy je zřejmé z obr. 4.

$$G_4(s) = \frac{1}{310s + 1} \quad (2)$$

4.2.3 Nelineární charakteristiky systému

Jako nelineární se vedle odezvy systému na otevření klapky recirkulace spalin (viz výše) projevuje také

- závislost teploty v komoře $y_2(t)$ na průtoku sekundárního vzduchu $u_2(t)$
- závislost koncentrace O_2 ve spalinách $y_3(t)$ na průtoku sek. vzduchu $u_2(t)$

U těchto závislostí nelze předpokládat konstantní zesílení nezávisle na výkonu kotle a toto nelineární chování je třeba matematicky popsat. Pro analýzu uvedených nelinearit a sestavení jejich charakteristik bylo využito bilančního modelu $W2E$. Obě nelineární charakteristiky byly následně začleněny do matematického modelu regulované soustavy.

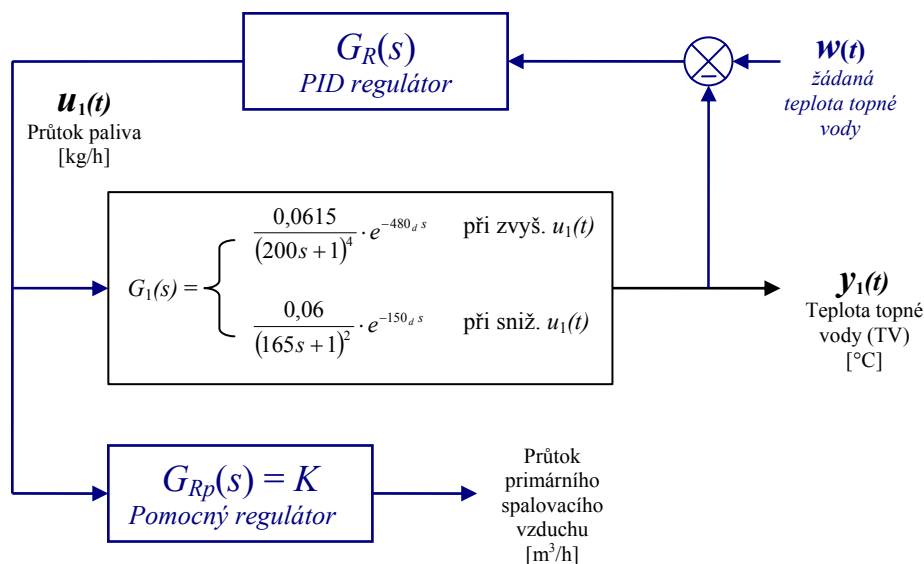
4.3 NÁVRH MODELU ŘÍZENÍ A PARAMETRIZACE REGULÁTORŮ

Na základě matematického popisu dynamického chování regulované soustavy, jehož sestavování bylo předmětem předchozích kapitol, je možné provést návrh modelu řízení.

Pro správný chod jednotky musí řídicí systém zajišťovat především:

- regulaci výkonu jednotky podle teploty výstupní topné vody,
- ovládání průtoku sekundárního vzduchu podle teploty ve spalovací komoře,
- ovládání recirkulace spalin podle teploty ve spalovací komoře.

První z uvedených bodů představuje hlavní úkol regulace jednotky. Během provozních zkoušek na kotli a následné analýzy naměřených dat se ukázalo, že hlavní regulovaná veličina *teplota výstupní topné vody* $y_1(t)$ je ovlivňována pouze jedinou akční veličinou *průtokem paliva* $u_1(t)$. Pro návrh regulace je tedy možné vyčlenit z regulovaného obvodu přenos $G_1(s)$ viz obr. 4, který uvedenou závislost popisuje a navrhnout model regulace této smyčky nezávisle na zbývajících vstupních a výstupních veličinách. K tomuto účelu byl do systému zaveden model PID regulátoru $G_R(s)$ v konvenčním zpětnovazebním uspořádání (obr. 5). Pro zajištění potřebného průtoku primárního vzduchu je do této části obvodu zapojen ještě pomocný regulátor $G_{Rp}(s)$ který v závislosti na aktuálním průtoku paliva $u_1(t)$ ovládá průtok primárního spalovacího vzduchu a tím zajišťuje stechiometrické podmínky hoření.



Obr. 5 Návrh modelu regulace hlavní regulační smyčky systému včetně pomocného regulátoru pro ovládání průtoku primárního vzduchu

Díky znalosti regulované soustavy můžeme použít metodu nastavení regulátoru podle její přechodové charakteristiky [10]. Parametrizovaný přenos $G_R(s)$ má výsledný tvar:

$$G_R(s) = 72,3 \cdot \left(1 + \frac{1}{510s} + 472,5s \right) \quad (3)$$

Zbývající dva úkoly řídicího systému, ovládání průtoku sekundárního vzduchu $u_2(t)$ a recirkulace spalin $u_3(t)$, jsou zajištěny dalšími dvěma pomocnými regulátory P_1 a P_2 na základě aktuální teploty ve spalovací komoře $y_2(t)$.

4.4 SIMULACE A ZHODNOCENÍ MODELU

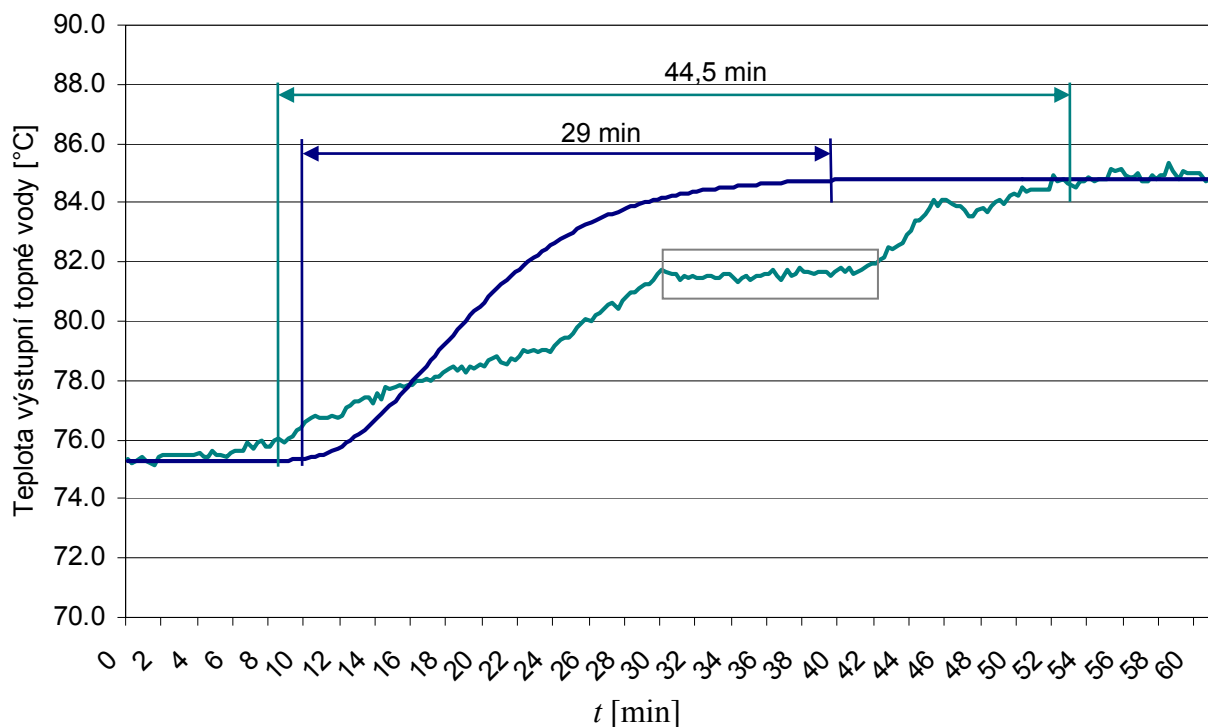
4.4.1 Simulace modelu regulované soustavy

Testování vytvořeného modelu regulované soustavy probíhalo zavedením známých signálů na jeho vstupy. Veškeré testovací signály vycházely z reálných provozních zkoušek. Díky tomu bylo možné porovnat odezvu na výstupech modelu (simulaci) s měřeními. Ověřování modelu bylo realizováno postupně pro každou vstupní veličinu, aby bylo možné přesněji specifikovat důvody případných odchylek.

Srovnání reálného průběhu teploty výstupní TV $y_2(t)$ a výsledků simulace s využitím modelu vytvořeného v SW *Simulink* ukazuje obr. 6. Je patrné, že ustálené hodnoty těchto charakteristik se téměř shodují. Dynamika obou přechodových dějů se však liší. Reálná měření ukazují výrazně pomalejší (o 15,5 min.) a méně plynulý náběh. Tato odchylka byla pravděpodobně spojena s výrazným zvýšením výkonu kotle během testu (o více než 300 kW). Na průběhu se mohla projevit nehomogenita paliva, kdy strmější nárůst křivky odpovídá dávkám s nižším obsahem vody (tedy vyšší výhřevností).

Druhým nežádoucím vlivem na dynamiku charakteristiky je rychle rostoucí teplota ve spalovací komoře, která vyvolala zvýšení průtoku sekundárního vzduchu $u_2(t)$. Tím však došlo k ovlivnění primárního vzduchu (díky tlakovým poměrům v komoře), jehož průtok klesl výrazně pod hodnotu potřebnou pro zachování stechiometrického spalování a krátkodobě došlo k tzv. „dušení“ kotle. Zejména stagnace teploty mezi 30. a 40. minutou je pravděpodobně důsledkem poklesu průtoku primárního vzduchu. Po zavedení korekce tohoto nežádoucího průběhu (v obr. 6 označeno šedým obdélníkem) lze považovat vyšetřované charakteristiky za blízké.

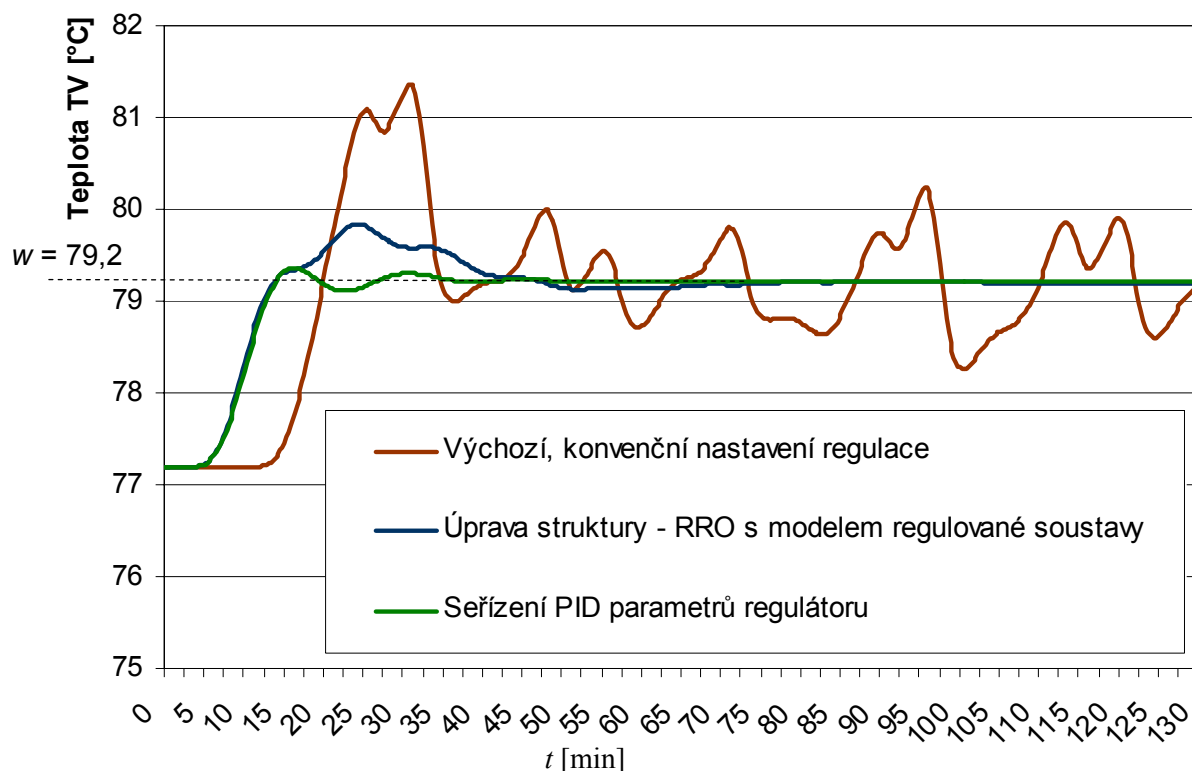
Přenos $G_1(s)$ nebyl na základě verifikačního intervalu upravován. Výchozí přechodová charakteristika použitá pro parametrizaci přenosu $G_1(s)$ vykazuje výrazně plynulejší odezvu a je bezpochyby věrohodnější reprezentací reálných změn teploty TV.



Obr. 6 Porovnání výsledků simulace (modrá křivka) s reálnou odezvou teploty výstupní TV $y_1(t)$ (zelená křivka) na skokové zvýšení průtoku paliva $u_1(t)$; šedý obdélník vyznačuje interval s nežádoucím průběhem $y_1(t)$

4.4.2 Simulace uzavřeného regulačního obvodu včetně regulace

Jak již bylo řečeno, hlavní regulovaná veličina *teplota výstupní topné vody* $y_1(t)$ je ovlivňována pouze jedinou akční veličinou *průtokem paliva* $u_1(t)$, a kvalitu regulace teploty topné vody $y_1(t)$ zajištěnou regulátorem $G_R(s)$ je proto možné posuzovat nezávisle na ostatních veličinách systému. Ústřední regulační smyčka systému byla v první fázi testována ve svém výchozím uspořádání dle obr. 5 a s parametry regulátoru $G_R(s)$ nastavenými dle rovnice (3). Výchozí teplota topné vody v modelu byla $y_1(t) = 77,2$ °C. V čase $t = 0$ min byla zavedena skoková změna žádané veličiny o 2 °C na $w(t) = 79,2$ °C. Výsledný průběh regulované veličiny $y_1(t)$ ukazuje hnědá křivka na obr. 7.



Obr. 7 Průběh regulované veličiny $y_1(t)$ při zvýšení žádané teploty $TV w(t)$ a postupných úpravách regulace

Je patrné, že takto navržený regulační obvod nebyl schopen zajistit ustálení regulované veličiny $y_1(t)$. Regulační obvod byl nestabilní zejména díky přítomnosti vyššího dopravního zpoždění T_d (u vyšetřované soustavy je $T_d = 480$ s). Ani opakované změny nastavení parametrů regulátoru $G_R(s)$ nezajistily jeho stabilitu. Proto bylo nezbytné provést úpravu zapojení.

Pro eliminaci vlivu dopravního zpoždění bylo použito zapojení nazývané *rozvětvený regulační obvod (RRO) s modelem regulované soustavy* [10]. K výchozímu regulačnímu obvodu na obr. 5 je v tomto zapojení přidán tzv. *model regulované soustavy* $G_{m1}(s)$. Po zavedení tohoto uspořádání došlo ke stabilizaci regulace. Odpovídající průběh regulované veličiny je znázorněn na obr. 7 modrou křivkou.

Následně byla provedena optimalizace nastavení regulátoru pomocí opakovaných simulací s postupnými změnami jeho PID parametrů. Postupná manuální úprava parametrů přinesla další výrazné zvýšení kvality regulace, viz zelená křivka v grafu na obr. 7. Maximální překmit regulované veličiny se snížil z $0,6$ °C na $0,15$ °C, přičemž došlo také k výraznému zkrácení doby regulace (asi na polovinu). Zavedená úprava tedy velmi příznivě ovlivnila kvalitu regulace.

5 ZÁVĚR

Biomasové kotle středních výkonů jsou pro svou zhoršenou dynamiku a zpožděnou odezvu na změny dodávky paliva považovány za soustavy s vyššími nároky na regulaci. Zkušenosti provozovatelů ukazují významné nedostatky v kvalitě regulace současných biomasových zdrojů. Aby byly jednotky na biomasu schopné konkurovat zdrojům na fosilní paliva, musí umožňovat stabilní regulaci v širokém regulačním rozsahu. Řídicí systém navíc musí s dostatečnou rychlostí reagovat na změny odběru tepla. Pro naplnění těchto požadavků je nutné pokračovat ve výzkumu a vývoji řídicích systémů těchto technologií. Ten se však zdá být úzce spojen s dostupností kvalitních dynamických modelů regulovaných soustav. Na základě rešerše dostupné literatury bylo zjištěno, že úspěšné sestavení dynamického matematického modelu biomasového kotle jako regulované soustavy nebylo dosud publikováno. Předložená dizertační práce reaguje na tuto neuspokojivou situaci vytvořením účinného prostředku – dynamického matematického modelu – pro další vývoj regulace biomasových kotlů středních výkonů.

Jádrem dizertační práce je identifikace kotle na biomasu, na jejímž základě vznikl dynamický model popisující chování kotle jako regulované soustavy. Model byl sestaven na základě vhodné kombinace bilančních výpočtů a rozsáhlých experimentálních měření. Práce tedy představuje konkrétní možnosti a omezení metod *experimentální a analytické identifikace* v oblasti, kde dosud nebyly komplexním způsobem využity. Výsledkem je historicky první model svého druhu zahrnující všechny důležité nelineární charakteristiky systému a popisující chování kotle v celém jeho provozním rozsahu. Provedené simulace potvrdily blízkost modelu a reálné technologie, přičemž ukázaly významnou slabinu kotlů na biomasu, kterou je vysoké dopravní zpoždění dodávky paliva. Model regulované soustavy (kotle) byl využit pro sestavení modelu regulace, který vycházel z tradiční koncepce zpětnovazebního řízení používaného v provozu. Potvrdilo se, že klasický přístup je problematický z hlediska dosažení stability regulačního pochodu. Byl proto navržen model řízení s novou strukturou, díky níž došlo ke stabilizaci regulačního pochodu. Opakované simulace s různým nastavením parametrů regulátoru pak přinesly jeho další výrazné zkvalitnění. Vzhledem k vysoké přesnosti použitého modelu lze předpokládat, že by zavedení zmíněných úprav do reálného řídicího systému přineslo stabilní regulaci s výrazně lepší dynamikou, než je u aktuálně provozovaných kotlů na biomasu běžné.

Předložená dizertační práce vyšla z teoretických i praktických poznatků získaných během spolupráce s *Ústavem procesního a ekologického inženýrství* VUT v Brně při provozních zkouškách na experimentálním biomasovém kotli. Dalším cenným příspěvkem předchozího výzkumu na tomto ústavu byl SW *W2E*, který umožnil efektivní sestavení bilančního modelu předmětné jednotky a provedení velkého počtu bilančních výpočtů. Z tohoto kvalitního základu bylo možné vycházet v další fázi dizertační práce, která svoji pozornost zaměřila na oblast regulace těchto zdrojů. V této fázi bylo klíčové seznámit se s teoretickými východisky experimentální identifikace systémů a vytváření modelů regulovaných soustav. Velkou podporou

přítom byly zkušenosti s identifikací kotlů na fosilní paliva z výzkumu, který dříve probíhal na *Ústavu automatizace a informatiky VUT v Brně*.

Předložená dizertační práce je tedy v první řadě příspěvkem pro teorii modelování a identifikace systémů. Aplikuje efektivní kombinaci přístupů analytické a experimentální identifikace při řešení zcela nové úlohy a vytváří tak metodický rámec pro tvorbu dynamických modelů dalších technologií a průmyslových procesů. Díky tomu mají výsledky práce odborný přesah a jsou využitelné v širokém spektru technických oborů. Přínos práce pro teorii automatického řízení je spojen především s možností syntézy regulace pro soustavy se zhoršenou setrvačností, příp. vyšším dopravním zpožděním. Matematických modelů těchto soustav není mnoho a pro navrhování a parametrizaci regulace kotlů na biomasu nebyly dosud dostupné vůbec. Dizertační práce přináší kvalitní prostředek pro návrh a simulaci řídicích systémů nejrůznějších struktur s možností okamžitého vyhodnocení všech významných veličin. Kromě optimalizace stávajících řídicích systémů tradiční koncepce umožňuje vytvořený model výzkum prediktivního řízení založeného na modelu (MPC). Součástí navazujících výzkumných aktivit bude ověření použitelnosti vytvořeného modelu pro tuto velmi slibnou metodu řízení.

Hlavním přínosem práce pro praxi je možnost dalšího zvýšení efektivity energetického využívání biomasy. Výrazný pokrok v konstrukci kotlů na biomasu již vzhledem k vysokým účinnostem provozovaných technologií nelze očekávat. V oblasti regulace je však pro další vývoj ještě dostatek prostoru. Využití výsledků práce se předpokládá především při projekci a optimalizaci řídicích systémů biomasových kotlů. V rámci dizertační práce byla navržena nová struktura regulace, která se během simulací ukázala jako výrazně vhodnější než stávající konvenční způsob regulace, který je použit u plně provozního prototypu jednotky umožňující experimentální měření (předmětné jednotky). Navržený model řídicího systému vykazuje výrazný posun v kvalitě regulace oproti běžně používanému způsobu řízení a po jeho aplikaci v reálném provozu se dá předpokládat výrazné zlepšení provozních charakteristik kotle, zejména v otázce stability a rychlosti. U předmětné jednotky sloužící k vytápění průmyslové výrobní haly v Kojetíně to znamená zvýšení stability dodávky topné vody žadaných parametrů a udržení tepelné pohody ve vytápěných prostorách bez ohledu na náhlé tepelné ztráty (otevření vrat haly). Zvýšení výkonu stávajícího řídicího systému má dopady také na účinnost, životnost a environmentální aspekty provozu biomasového kotle.

Nakonec je třeba také zmínit přínos práce pro akademické prostředí. Sestavený a ověřený matematický model biomasového kotle je možné používat při výuce technických oborů, jako je procesní inženýrství nebo energetika. Studenti se mohou pomocí dynamických simulací seznámit s jednotlivými technologickými prvky kotlů i jejich provozními charakteristikami, aniž by museli navštívit reálný provoz. V rámci studia automatizace je možné aktivní zapojení studentů při návrhu nebo seřizování regulace těchto tepelných zdrojů. Využití vytvořeného modelu se nabízí také při zaškolování obsluhy biomasových kotlen.

LITERATURA

- [1] Trčka M., Hensen J. L. M., *Overview of HVAC system simulation*. Automation in Constuction, 2010, 19:93-99.
- [2] Vaculíková E. (ed.), Šmejkal L. (ed.), *Modely, simulace a dobrodružství praxe*, diskuse o modelování a simulaci, Automa, 2006, 49:258-261.
- [3] Lianzhong L., Zaheeruddin M., *Dynamic modeling and fuzzy augmented PI control of a high-rise building hot water heating system*, Energy for Sustainable Development, 2008, 12:49-55.
- [4] Haryanto A., Hong K.-S., *Modeling and simulation of an oxy-fuel combustion boiler system with flue gas recirculation*, Computers & Chemical Engineering, Elsevier Ltd., 2010, in Press.
- [5] Keshavarz M., Yazdi M. B., Jahed-Motlagh M. R., *Piecewise affine modeling and control of a boiler-turbine unit*, Applied Thermal Engineering, 2010, 30:781-791.
- [6] Solberg B., Andersen P., Karstensen C. M. S., *Control properties of bottom fired marine boilers*, Energy, 2007, 32:508-520.
- [7] Aström K. J., Bell R. D., *Drum-boiler dynamics*, Automatica, 2000, 36:363-378.
- [8] Mahlia T. M. I. et al., *Dynamic modeling and simulation of a palm wastes boiler*, Renewable Energy, 2003, 28:1235-1256.
- [9] Hurák Z., *Moderní metody řízení vs. PID regulátor*, Automa, 2007, 13:7-12.
- [10] Švarc I., *Automatizace – Automatické řízení*. Brno: CERM, 2002, ISBN 80-214-2087-1.
- [11] Karták J. et al., *Dynamika a regulace parních kotlů*. Praha: SNTL, 1981.
- [12] Anderson J. S., *Process control opportunities and benefits analysis*. Proc. Advanced Control for the Process Industries, Cambridge, 1992.
- [13] Mikleš J., Fikar M., *Process Modelling, Identification and Control*, Berlin : Springer-Verlag, 2007, ISBN 978-3-540-71969-4.
- [14] Urban L., Máša V., Pavlas M., Stehlík P., *Novel type of technology for biomass utilization*. In 10th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2007, Ischia Porto, Italy, 2007, 12:465-470.
- [15] Pavlas M., *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Dizertační práce na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc. VUT v Brně, 2008.

ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Příjmení, jméno Máša, Vítězslav
Datum narození 9. srpna 1982
Stav svobodný
Adresa Šromova 36, 643 00 Brno

Kontakt

Mobilní telefon +420 723821363
E-mail masa@upej.fme.vutbr.cz

Vzdělání

07/2008 University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, Chorvatsko, *Studijní stáž* v rámci projektu CEEPUS

2007 – dosud Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Procesní a ekologické inženýrství, Ph.D. student

2001 – 2006 Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Inženýrská informatika a automatizace, Ing. Diplomová práce: *Regulace tepelného zdroje, kombinace plynových a biomasových kotlů*

1997 – 2001 Gymnázium Táborská Brno, všeobecné gymnázium, maturita

Pracovní zkušenosti

2005 – 2008 Johnson Controls Int., Jihlavská 7, Brno, 625 00
Asistent vedoucího projektu, brigádně
Zavádění měření a regulace v průmyslových a obchodních budovách, vizualizace procesů.

2009 – dosud Ústav procesního a ekologického inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
Technický pracovník

Znalosti a dovednosti

Jazykové znalosti

anglický jazyk aktivně, FCE 2008

Počítačová gramotnost

práce v programech Matlab, Simulink, AutoCAD, ControlWeb, MS Office,
psaní na klávesnici,

Pedagogické zkušenosti

2006 – 2009 vedení cvičení v oblasti informatiky a automatizace na
Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně

Další dovednosti

Řidičský průkaz sk. B

Odborná způsobilost v elektrotechnice dle vyhlášky č. 50/78 Sb. § 6

Zájmy

Sporty (futsal, fotbal, badminton, cyklistika), teologie (Bible, dějiny církve)

PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY

- [1] Urban L., Máša V., Pavlas M., Stehlík P., *Novel type of technology for biomass utilization*, In: Chemical Engineering Transactions, volume 12, pp 465–470, 2007.
- [2] Dvořák R., Máša V., Chlápek P., Solodyankin K., *Novel types of equipment for off-gas cleaning*, In: Computer-aided chemical engineering, volume 24, pp 101-106, 2007.
- [3] Urban L., Máša V., Pavlas M., Stehlík P., *Sběr a vyhodnocení experimentálních dat z jednotky na biomasu*, výzkumná zpráva VZMPO-2007/01, VUT Brno, Česká republika, 2007.
- [4] Máša V., Pavlas M., Hájek J., Skoupý A., *Effective and environmental friendly energy utilization of forest biomass*, IUFRO - All Division 5 Conference, Taipei, Taiwan, 2007.
- [5] Urban L., Máša V., Pavlas M., Stehlík P., *Efektivní využití různých druhů biomasy a fytomasy v nové experimentální jednotce o výkonu 1 MW*, 54. konference chemického a procesního inženýrství, Srní, Česká republika, 2007.
- [6] Urban L., Máša V., *Nový typ zařízení pro spalování biomasy a fytomasy I. Technologie a koncepce experimentální jednotky*, Seminář Energie z biomasy VI, Ostrava, Česká republika, 2007.
- [7] Máša V., Urban L., *Nový typ zařízení pro spalování biomasy a fytomasy II. Zvyšování termické účinnosti a řízení*, Seminář Energie z biomasy VI, Ostrava, Česká republika, 2007.
- [8] Máša V., Urban L., *Termická účinnost a měření emisí na experimentální jednotce pro spalování biomasy*, Seminář Energie z biomasy VII, Brno, Česká republika, 2007.
- [9] Pavlas M., Máša V., Urban L., Hájek J., Stehlík P., *Novel technology for biomass combustion with heat recovery and optimized operation*, Heat Transfer, Fluid Mechanics & Thermodynamics HEFAT 2008, Pretoria, Jihoafrická republika, 2008.
- [10] Urban L., Máša V., Pavlas M., Stehlík P., *Up-to-date design of unit for biomass utilization - analysis of efficiency*, In: 11th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2008, Praha, Česká republika, 2008.
- [11] Máša V., *System Identification of a Technology for Biomass Combustion*, CEEPUS Summer School 2008, Automatic Control for the 21. century, Split, Chorvatsko, 2008.
- [12] Máša V., Pavlas M., *Efektivní a environmentálně šetrné energetické využívání různých druhů biomasy v zařízeních středních výkonů*, Seminář Udržitelná energie a krajina, Hostětín, Česká republika, 2008.

- [13] Chlápek P., Máša V., *Identifikace a řízení distribuce přívodu spalovacího vzduchu*, 56. konference chemického a procesního inženýrství, Srní, Česká republika, 2009.
- [14] Máša V., Pavlas M., Švarc I., *Mathematical model of biomass boiler for control purposes*, 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2011, Florence, Itálie, 2011, (accepted for publication in *Chemical Engineering Transactions*).

ABSTRACT

The thesis focuses on building of dynamic mathematical model of biomass boiler as a controlled system and the use of this model in practise. At the first part of the thesis the area of energy production using biomass is introduced and the current development at the area of the automatic control of biomass boilers with medium energy output (in units of MW) is described. Although the main topic of the thesis is the construction of model of biomass boiler for control purposes, thesis deals with technology of boilers and principles of its inner processes as well. Creation of the model comes out not only from these important findings, but also from experimental data collected during measurements in real operation. Heat and mass balance calculations were made according to these data and they serve to precise static properties of experimental unit for biomass combustion. Central part of the thesis presents development of the final model that resulted from balance calculations and from step responses of the system obtained by measuring. Built dynamic model is compared with experimental data through simulations in Simulink and verified. At the next part the model of controlled system is completed with control system and closed-loop control circuit is validated and verified by simulation. Then the design of new controller configuration, which improves the quality of control considerably, is presented. At the final part of the thesis, possibilities of other use of the model of boiler are given, both in control theory and in industrial practice.

ABSTRAKT

Práce se zabývá vytvořením dynamického matematického modelu biomasového kotle jako regulované soustavy a praktickým využitím tohoto modelu. V úvodní části práce je představena problematika energetického využívání biomasy a popsán aktuální vývoj v oblasti automatického řízení biomasových kotlů středních výkonů (jednotky MW). Přesto, že je tématem práce tvorba matematického modelu pro účely řízení, pozornost je věnována také technologii kotlů a fyzikální podstatě dějů, které v nich probíhají. Tvorba modelu vychází nejenom z těchto důležitých poznatků, ale také z experimentálních dat získaných během měření v reálném provozu. Na základě získaných dat byly provedeny bilanční výpočty sloužící k upřesnění statických vlastností experimentální jednotky pro spalování biomasy. Ustřední část práce popisuje tvorbu dynamického matematického modelu, který vycházel právě z těchto bilančních výpočtů a dále z naměřených přechodových charakteristik systému. Sestavený dynamický model byl ověřen porovnáním s experimentálními daty pomocí simulací v programu Simulink. Model regulované soustavy je v další části práce doplněn modelem regulátoru a následnou simulací je ověřena platnost celého zapojení. Dále je proveden návrh nové struktury řízení, která s sebou přináší výrazné zlepšení kvality regulace. V závěru práce jsou uvedeny možnosti dalšího využití modelu kotle v teorii automatického řízení i průmyslové praxi.