

IDENTIFIKACE REGULOVANÉ SOUSTAVY – APLIKACE PRO PARNÍ KOTEL

Ing. Zdeněk Němec, CSc.

VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky

1. Úvod, vymezení problematiky

Příspěvek souvisí s řešením automatizace provozu spalovny pro pevný komunální odpad. Náplň řešení je popsána v [1], realizované experimentální vývojové práce se konaly ve spalovně SAKO Brno, a.s.

Dostí velká část problémů v provozu spalovny se týká stabilizace provozu spalovenského kotle, čímž rozumíme hlavně udržování konstantní dodávky páry z kotle do distribuční sítě. Příčinou nerovnoměrné výroby páry je velmi různorodé složení spalovaného odpadu a jeho značně proměnlivá výhřevnost. Snaha o stabilní provoz též souvisí s potřebou co nejnižší produkce škodlivých spalin. Kromě uvedené nepravidelnosti ve vlastním spalovacím procesu na roštu kotle může být stabilita provozu negativně ovlivněna i nedokonalým provozem souvisejících technologických uzlů. Dostí velký vliv na provoz má správné řízení napájecí vody, tj. regulace výšky hladiny vody v bubnu kotle.

Předkládaný článek uvádí poznatky z řešení regulace napájecí vody spalovenského kotle, ale výsledky jsou obecně použitelné i pro jiné parní kotle. Rozdílnost je v tom, že u spalovenských kotlů jsou změny tepelného výkonu relativně velké a tudíž nároky na kvalitu regulace jsou vyšší. Hlavní pozornost je zde věnována první fázi návrhu regulace, tj. popisu vlastností regulované soustavy. Podnětem k podrobnému rozboru je nepříznivé chování dané regulované soustavy, která má vlastnosti soustavy s neminimální fází. To spočívá v tom, že při změně vstupní veličiny se výstup soustavy změní zpočátku na opačnou stranu a teprve později se ustálí na očekávané polaritě a hodnotě.

Při identifikaci byly zpracovány časové průběhy provozních veličin pomocí programového vybavení Matlab a k vlastnímu vyhodnocování bylo použito produktu „System Identification Toolbox“.

2. Získání dat pro identifikaci

Ke kvalifikovanému návrhu regulace je nezbytné znát matematický popis statických a hlavně pak dynamických vlastností soustavy, která se má regulovat. K tomu účelu je nutné odpovídající technologickou část podrobit tzv. identifikaci, tj. změřit vstupní a výstupní veličiny soustavy a následně vyhodnotit závislosti mezi nimi.

Charakter provozu spalovny neumožňuje použít základní jednoduché metody identifikace, např. měřením přechodových nebo frekvenčních charakteristik. Proto musely být aplikovány statistické metody, popsané např. v [2], které umožňují sběr potřebných dat bez narušení zkoumaného provozu. Měření lze tedy realizovat za normálního provozu a bez nutnosti rozpojení regulačního obvodu, ale je žádoucí aby se během měření vyskytovaly nějaké změny vstupních a výstupních veličin soustavy (při relativně ustáleném chodu je identifikace nepřesná).

Data pro identifikaci bylo možno získat dvojím způsobem. Zpočátku byly využívány data z existujícího monitorovacího systému spalovny, ve kterém jsou k dispozici údaje o hlavních provozních veličinách. Velkou překážkou je, že tato data jsou poskytována jen v časových intervalech po 1 minutě, což je pro účely řízení napájecí vody příliš hrubé časové rozlišení. Proto bylo později uskutečněno speciální měření s intervalem záznamu po 12

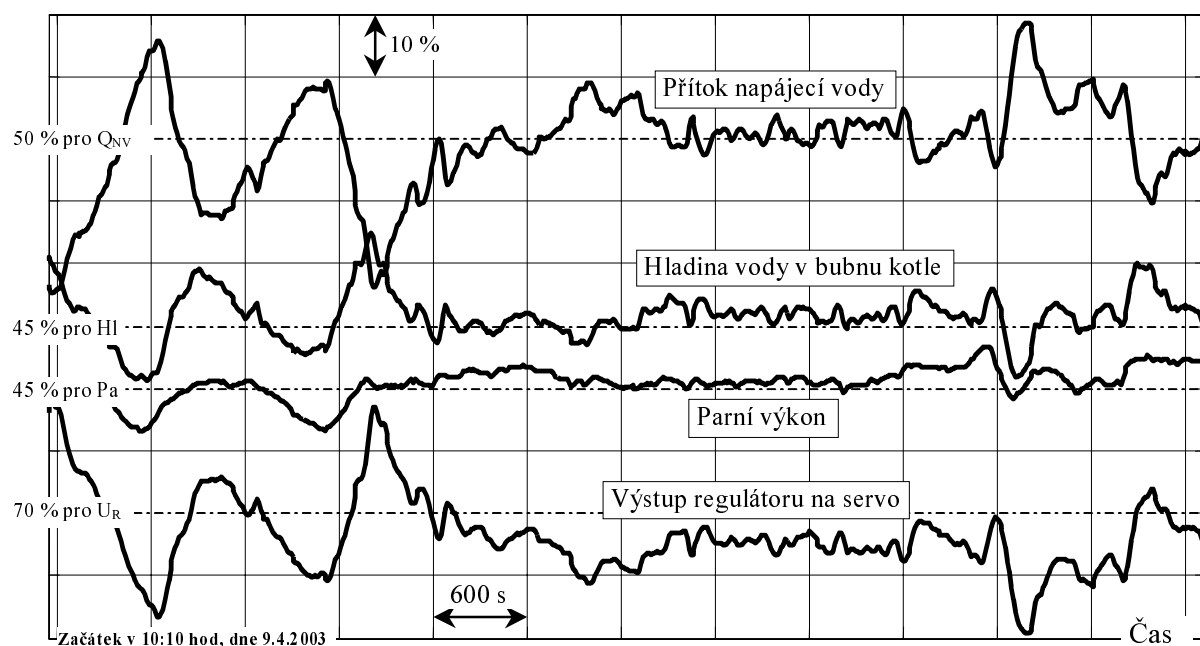
sekundách. Celá doba měření o délce asi 6,6 hodin obsahuje téměř 2000 intervalů, což je i pro statistické vyhodnocení dostačující.

Měření soustavy se uskutečnilo na kotli K3 a byly snímány 4 veličiny, které těsně souvisejí s regulací hladiny a jejich stručný popis je uveden v tabulce Tab.1.

Tab.1. Měřené veličiny, použité pro identifikaci regulované soustavy

Měřená veličina	Označení zkratkou	Rozsah (pro 0 až 100%)	Vztah k regulaci hladiny
			Poznámka
Hladina vody v bubnu kotle	HI	-25 cm až +25 cm	Regulovaná veličina Žádaná hodnota je ve středu rozsahu
Přítok napájecí vody	Q_{NV}	0 až 63 t/hod	Akční veličina (nadřazené smyčky) Přítok do bubnu kotle
Parní výkon	Pa	0 až 63 t/hod	Nepřímá (zpožděná) poruchová veličina Výstupní množství páry z bubnu kotle
Výstup regulátoru na servo	U_R	0 až 100%	Akční vel. z podřízené smyčky reg. vody Servoventil má inverzní charakteristiku

Příklad časových průběhů uvedených veličin je na obr.1. Jsou z něho zřejmé vazby mezi výstupem soustavy (HI), užitečným vstupem (Q_{NV}) a „nežádoucím“ vstupem (Pa). Nutno též konstatovat, že změny napájecí vody a změny úrovně hladiny jsou relativně velké, což svědčí o nepřilíš kvalitní regulaci, která byla v době záznamu v činnosti.

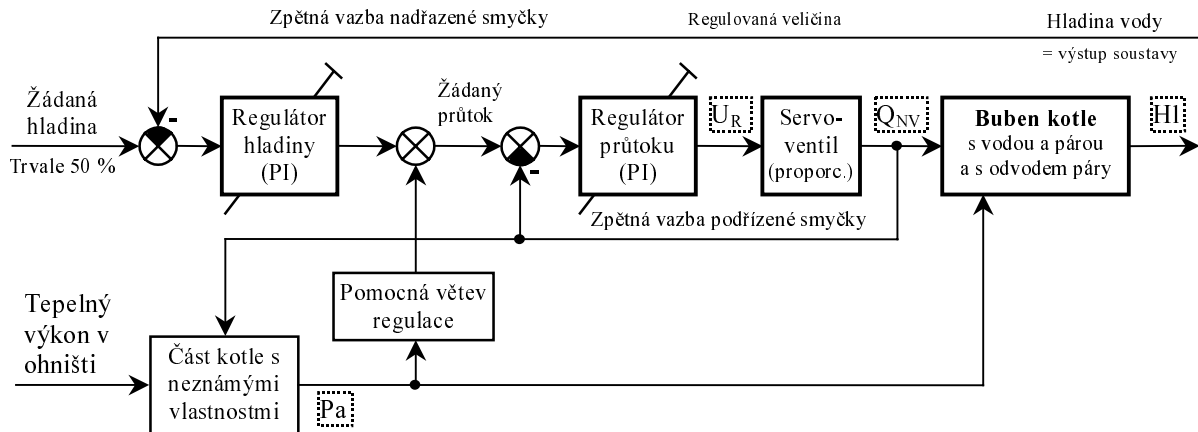


Obr.1. Časové průběhy veličin, použitých pro identifikaci (ukázka dílčího úseku)

3. Model regulované soustavy

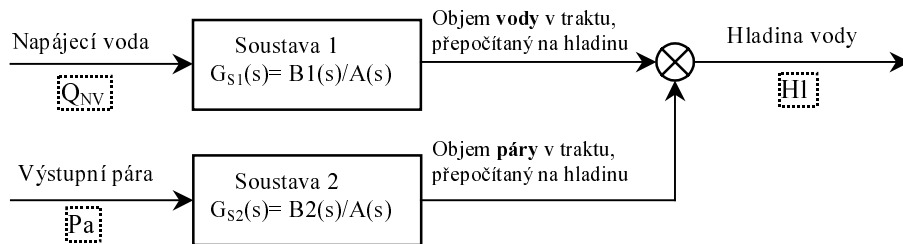
Při návrhu modelu regulované soustavy je žádoucí nejprve vycházet z celkového zapojení regulačního obvodu – viz obr.2, protože z něho vyplývají signálové toky, význam vstupů, výstupů, atd.

Model regulované soustavy může mít několik variant, ale zúžení výběru nastává už tím jaké veličiny soustavy jsou reálně měřitelné (ve schématech jsou tečkovaně ohraničené). Např. v uvažovaném by bylo ideální měřit tepelný výkon ohniště, protože ten je z fyzikálního hlediska prvotním vstupem celé soustavy výroby páry.



Obr.2. Celkové schéma regulace hladiny vody v bubnu kotle

Obecně má uvažovaná regulovaná soustava 2 vstupy a 1 výstup – viz obr.3. Pro dané podmínky byly navrženy 2 alternativy modelu. Zde uvedeme jen jednodušší, který pracuje jen s vnějšími měřenými veličinami a neprezentuje veličiny průtoků, které mají svůj fyzikální původ v efektu navhnutí (zvětšení objemu bublinek páry při zvýšení teploty) a efektu ochlazení (snížení objemu bublinek při přítoku vody). Obě cesty vstupů na výstup přes dílčí soustavy označíme jako přenosy $G_{S1}(s)$ a $G_{S2}(s)$.



Obr.3. Schéma modelu regulované soustavy

4. Výsledky identifikace

K identifikaci byla z prostředí Matlab použita nadstavba „System Identification Toolbox“. Podstatou je stanovení parametrů modelu statistickými metodami, přičemž strukturu modelu si volíme. Bylo experimentováno s většinou možných struktur, ale zde uvedené výsledky jsou prezentovány modelem, který je v uvedeném prostředí označován jako N4s3. Zkoumaná soustava je vyjádřena stavovým popisem třetího řádu, dopravní zpoždění nebylo uvažováno.

Výchozí model identifikace je časově diskrétní, zde s vzorkovací periodou $T_v = 24s$. Výsledek platí pro obecnější tvar

$$\mathbf{x}(t+T_v) = \mathbf{A}^* \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^* \mathbf{u}(t) + \mathbf{K}^* \mathbf{e}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}^* \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}^* \mathbf{u}(t) + \mathbf{e}(t),$$

kde $\mathbf{x}(t)$ je vektor veličin stavových, $\mathbf{u}(t)$ vstupních, $\mathbf{y}(t)$ výstupních, $\mathbf{e}(t)$ chybových. Procesem identifikace byly vyčísleny hodnoty prvků matic \mathbf{A} , \mathbf{B} a vektorů \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{K} .

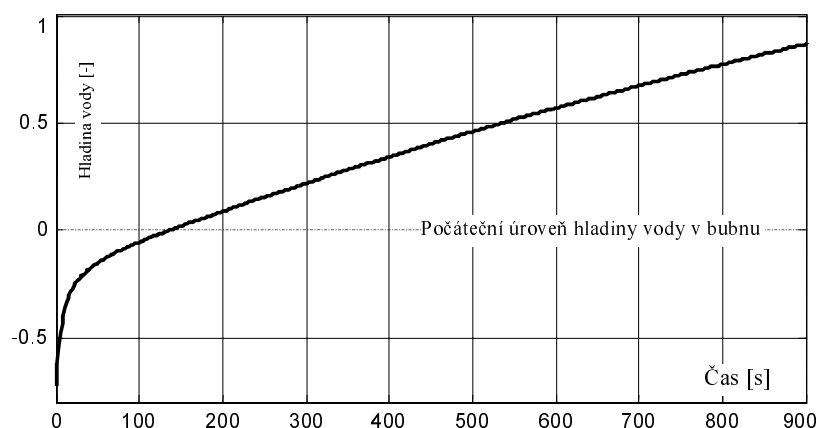
Pro klasický návrh regulace je ale potřeba popis ve formě oprátorových přenosů. Proto byl model převeden (transformován) instrukcí `model = d2c(N4s3, 'tustin')` do spojité oblasti a pak instrukcí `tf(model)` na přenosy ve zlomkovém tvaru, přičemž v čitateli i jmenovateli získáme součin kořenových činitelů.

Pro daný kotel a hledané přenosy tedy platí:

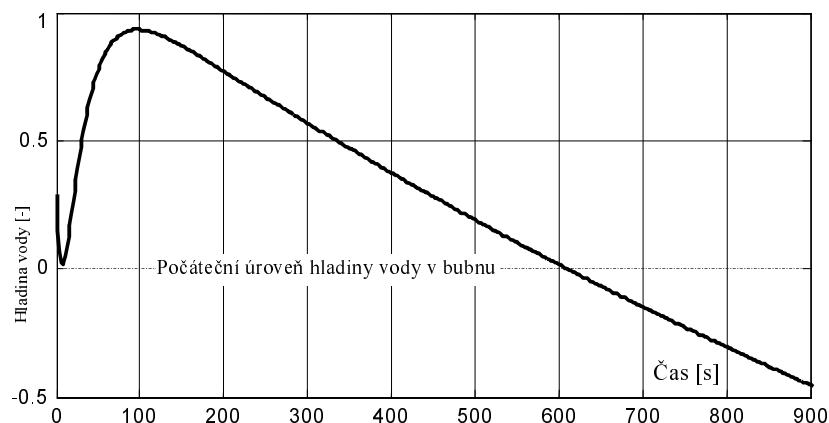
$$G_{S1}(s) = \frac{HI(s)}{Q_{NV}(s)} = \frac{-0.72713 \cdot (s + 0.1015) \cdot (s + 0.01924) \cdot (s - 0.005876)}{(s + 0.1708) \cdot (s + 0.0354) \cdot (s + 0.0005301)}$$

$$G_{S2}(s) = \frac{HI(s)}{Pa(s)} = \frac{0.29186 \cdot (s - 0.001502) \cdot (s^2 - 0.1377 \cdot s + 0.02325)}{(s + 0.1708) \cdot (s + 0.0354) \cdot (s + 0.0005301)}$$

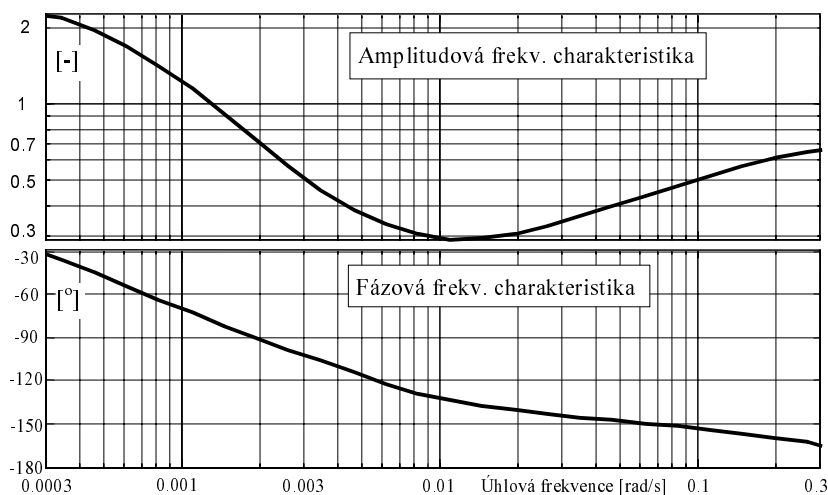
Dominantní význam v $G_{S1}(s)$ má nula přenosu (kořen čitatele), která leží v kladné polorovině komplexních čísel a má velikost 0.0059 rad/s. Přenos $G_{S2}(s)$ má též kladnou nulu. Jejich nepříznivý dopad se projevuje na přechodových charakteristikách v počátcích jejich průběhů.



Obr.4.
Přechodová charakteristika subsystému se vstupem napájecí vody (pro přenos $G_{S1}(s)$)



Obr.5.
Přechodová charakteristika subsystému se vstupem odběru páry (pro přenos $G_{S2}(s)$)



Obr.6.
Frekvenční charakteristiky subsystému se vstupem napájecí vody (pro přenos $G_{S1}(s)$)

5. Regulační vlastnosti soustavy

Oba subsystémy vyšetřovaného kotle vykazují vlastnosti tzv. soustav s neminimální fází. V matematickém popisu to souvisí s již uvedenými kladnými hodnotami kořenů čítenelů v jejich přenosech. Regulační vlastnosti takových systémů jsou velmi nepříznivé, protože pro rychlejší změny vstupu mají změny na výstupu obrácenou polaritu než je očekáváno a než odpovídá pomalejším změnám.

Pro syntézu regulace má větší význam subsystém napájecí vody, protože je přímo ve smyčce regulace hladiny vody. Z časového průběhu na obr.4 je vidět, že po skokovém nárůstu napájecí vody nejprve hladina vody poklesne, za 130s se vrátí na výchozí hodnotu a teprve pak lineárně roste. Ve frekvenční charakteristice na obr.6 se komentované vlastnosti projevují tím, že amplituda (modul) přenosu monotónně neklesá, ale zde od úhlové frekvence 0.01 rad/s naopak stoupá. Při seřizování regulace to vede k rozkmitání celého regulačního obvodu už při relativně malých zesíleních. Rovněž použití derivační složky v regulátoru není možné. S uvedenými vlastnostmi soustavy je dosažitelná jen relativně malá dynamika celé regulace, což vede k značně velkým změnám hladiny vody v bubnu kotle i při obvyklých změnách tepelného výkonu spalovenského kotle.

6. Závěr

Příspěvek shrnuje výsledky prací, uskutečněných pro přípravu rekonstrukce regulace spalovenského kotle. Zde uvedená problematika se týká hlavně systému napájecí vody bubnu kotle. Pro kvalifikované řešení regulace je bezpodmínečně nutné znát vlastnosti dotyčné regulované soustavy. V tomto případě jde o značně složitou soustavu, proto byla zvolena cesta identifikace z měřených provozních veličin. Díky vlastnostem použitého programového produktu „System Identification Toolbox“ fy MathWorks lze použít i měřených dat z normálního provozu, tj. není nutné soustavu podrobovat specializovaným zkouškám, což by bylo v provozu spalovny těžko uskutečnitelné.

Výsledky identifikace ukazují, že daný spalovenský kotel jako regulovaná soustava má velmi nepříznivé vlastnosti z hlediska řízení napájení bubnu vodou. Dosavadní regulace klasickými PID regulátory má omezené možnosti v dosažení kvalitní regulace. Vhodnější by bylo aplikovat některou z vyšších forem řízení, neboť ty jsou schopné alespoň částečně eliminovat zjištěné nepříznivé vlastnosti dané soustavy. Výsledky identifikace jsou užitečným podkladem k takovým záměrům.

Literatura:

- [1] Němec, Z.- Skála, Z.- Koňářík, M.:
Návrh automatického řízení spalování u spalovenského kotle.
[Etapová zpráva řešení projektu GAČR 101/02/0477]. Brno, VUT v Brně – FSI, 2002.
- [2] Noskivič, P.: Modelování a identifikace systémů. Montanex, Ostrava, 1999.

Příspěvek vznikl v souvislosti s řešením úkolu GAČR 101/02/0477.

E-mail autora: nemec@uai.fme.vutbr.cz