

Aplikace robustního regulátoru na řízení hladiny bubnového kotle

Michal, Menkina

Abstrakt

Příspěvek prezentuje modelování regulace výšky hladiny bubnového kotle s implementací robustního H_∞ regulátoru. Použitý model bubnového kotle je sofistikovaný nelineární stavový model, který vychází z globálních bilancí hmoty a energie. Vlastní modelování je realizováno v softwarovém prostředí MatLab/Simulink. Robustní H_∞ regulátor byl vytvořen na základě minimalizace smíšené citlivosti. Na závěr jsou porovnány dynamické vlastnosti robustního H_∞ regulátoru a klasického PID regulátoru navrženého podle některé klasické metody.

Klíčové slová: model bubnového kotle, robustní řízení, robustní H_∞ regulátor.

Úvod

Simulace výrobních procesů je jeden z nejdůležitějších částí vývoje zařízení. Na simulačním modelu je možno získat kompletní chování systému, objevit nejasnou část a následně navrhnout a ověřit řídicí algoritmus. V tomto článku se budeme zabývat model bubnového kotle, který byl namodelován v prostředí MatLab/Simulink [3]. Pro vytvoření našeho modelu jsme použili matematický model [1]. Tento model je založen na zákonu zachování hmoty a zákonu zachování energie. Při syntéze regulačního obvodu vycházíme z matematického modelu regulované soustavy, zvoleného kritéria jakosti regulace a dalších kladených podmínek. Výsledkem je pak model uzavřeného regulačního obvodu, který svými dynamickými vlastnostmi vyhovuje jak kritériu jakosti regulace, tak i dalším kladeným podmínkám. V technické praxi se občas nedosahuje dobré shody mezi matematickým modelem a regulovanou soustavou. Příčinou neshody může být složitost obvodu nebo změna dynamických vlastností (změna parametrů a také změna řádu soustavy) regulované soustavy. V tomto důsledku se hovoří o *neurčitosti modelu*. Výsledek je, že reálný regulační obvod nesplní požadovaná kritéria jakosti regulace, ale může být i nestabilní. V literatuře [4] je popsáno mnoho typů neurčitostí, které mohou být použity při vyšetřování stability uzavřeného regulačního obvodu.

1. Model bubnového kotle

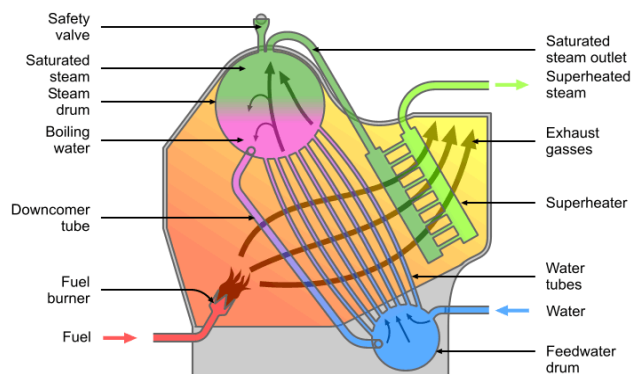
1.1 Popis kotle

Z pohledu řízení má daný systém tři vstupy a tři výstupy. Akční veličinou je hmotnostní průtok napájecí vody, měřitelnou poruchou je hmotnostní průtok páry. Řídicí veličinou je hladina vody v bubnu. Výstupy jsou tlak v bubnu a kvalita páry (Obr.1). Model je vytvořen jako nelineární. Kotel je popsán třemi základními rovnicemi. První rovnice je celková balance hmotnosti (1), druhá vyjadřuje celkovou bilanci energie (2) a třetí rovnost objemů (3).

$$\frac{d}{dt}[\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}] = q_f - q_s \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}[\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p t_m] \quad (2)$$

$$V_t = V_{st} + V_{wt} \quad (3)$$



Source: www.wikipedia.org

Obr.1 Schéma bubnového kotle

Fig.1 Schema of drum-boiler

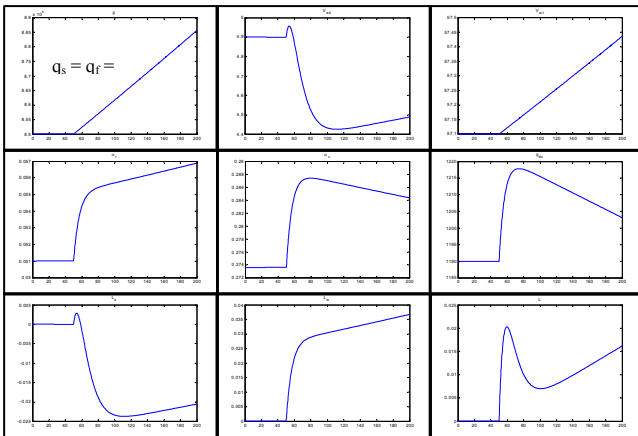
Tento model docela dobře popisuje vlastnosti kotle, odezvu tlaku na změnu výkonu, průtok napájecí vody a průtok páry na vstupu. Avšak zde chybí informace o hladině vody. Proto byl sestaven komplexní model. Komplexní model má čtyři stavy, tlak, celkový objem vody, objem páry v bubnu a kvalita páry (4).

$$\begin{aligned} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} &= q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s \\ e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} &= Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} & \end{aligned} \quad (4)$$

V koeficientech e_i jsou všechny parciální derivace závislé pouze na tlaku. Jednotlivé koeficienty e_i jsou podrobně rozepsány v literatuře [1], [3].

1.2 Simulační model

Simulační model byl vytvořen v prostředí MatLab/Simulink. Pro řešení problémů s parciálními derivacemi bylo využito steam tables. Celkový model je velmi složitý, protože je zde mnoho různých signálů. Chování modelu bylo ověřeno s výsledky publikovanými v [1]. Na Obr.2 jsou vidět odezvy jednak v ustáleném stavu a v čase 50s je provedena skoková změna na vstupním výkonu $\Delta Q=10\%$.



Obr.2 Simulační odezvy ($q_s = q_r = 33.4\text{kg/s}$, $Q = 85.6\text{MW}$, $\Delta Q = +10\%$)

Fig.2 Simulation results ($q_s = q_r = 33.4\text{kg/s}$, $Q = 85.6\text{MW}$, $\Delta Q = +10\%$)

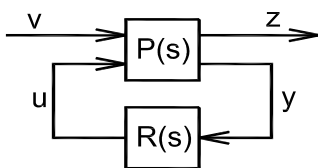
2. Robustní řízení

2.1 Návrh H_∞ regulátoru

Z modelu, probraném v kapitole 2, byl identifikací získán přenos F_{LQ} mezi výkonem Q a hladinou v bubnu L . Přenos má tvar:

$$F_{LQ}(s) = \frac{20.9357s^2 + 0.1214s + 0.0043}{338.95s^3 + 81.13s^2 + 4.1075s + 0.025} \quad (5)$$

Struktura zobecněného modelu uzavřeného regulačního obvodu je znázorněna na Obr.3. Vstupní signál v představuje vnější signály (poruchy d , žádanou hodnotu w , ...) a signál u akční veličinu. Výstupní signál z je nazýván „chyba“ signálů, které jsou minimalizovány ve smyslu splňující cíl řízení, tedy kritériální veličina. Signál y je měřený výstup, který obsahuje přímo měřené veličiny na soustavě a vstupuje do regulátoru $R(s)$.



Obr.3 Zobecněný model zpětnovazebního obvodu

Fig.3 The schema of generalit control circuit

Tento systém můžeme popsat následovně:

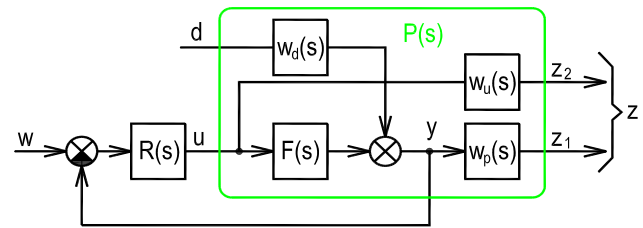
$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$u = R(s)y$$

Nechť existuje $\gamma > 0$, pak úkolem suboptimálního H_∞ řízení je nalézt všechny přijatelné regulátory $R_\infty(s)$, jestliže nějaké existují, které splňují podmínku $\|T_{zv}\|_\infty < \gamma$. H_∞ norma je definována vztahem:

$$\|G\|_\infty = \sup_{\text{Re}(s) > 0} \bar{\sigma}[G(s)] = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \bar{\sigma}[G(j\omega)] \quad (7)$$

Pro systém popsaný v kapitole 2 navrheme H_∞ regulátor. Pro návrh uvažujme strukturu regulačního obvodu, který je znázorněn na Obr.4.



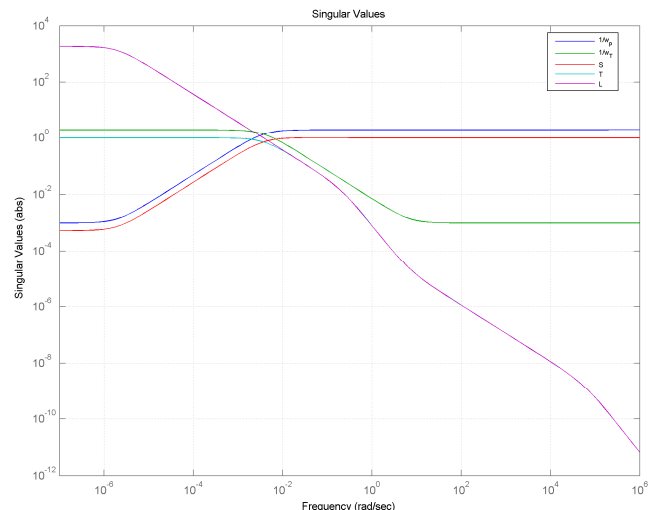
Obr.4 Schéma regulačního obvodu

Fig.4 Control circuit schema

Tvar a struktura jednotlivých váhovacích funkcí w_p , w_u , w_d , je podrobně popsána v [4]. Výpočet regulátoru je založen na minimalizaci citlivostní funkce. Vlastní výpočet optimálního H_∞ regulátoru $R_\infty(s)$ je proveden v prostředí MaTLab. Pro systém popsaný v kapitole 2 vyšel regulátor s přenosem (8).

$$R_\infty(s) = \frac{914.4458(s+7)(s+0.171)(s+0.0613)(s+0.007035)}{(s+5.765 \cdot 10^{-4})(s+0.2173)(s+1.971 \cdot 10^{-6})(s^2+0.0058s+0.0002043)} \quad (8)$$

Na Obr.5 jsou zobrazeny frekvenční odezvy S , T , L , $1/w_p$, $1/w_u$ pro regulátor $R_\infty(s)$.



Obr.5 Frekvenční odezvy S , T , L , $1/w_p$, $1/w_u$

Fig.5 Frequency behavior

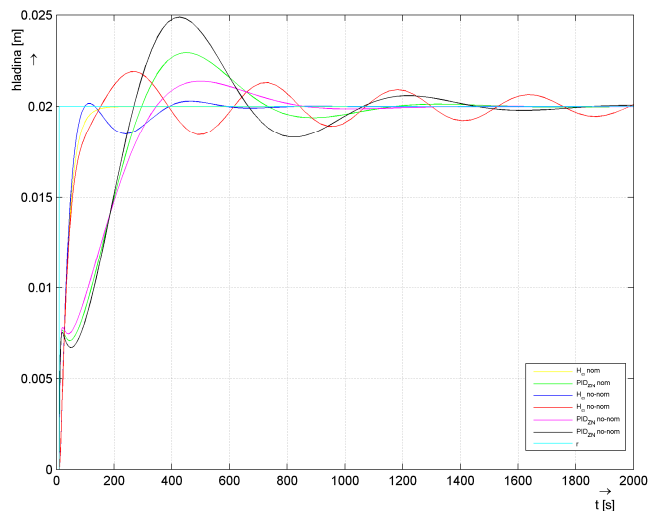
2.2 Návrh PID regulátoru

Pro porovnání byl navržen PID regulátor pomocí Ziegler-Nicholsonovy metody. Optimální hodnoty parametrů PID regulátoru vyšli:

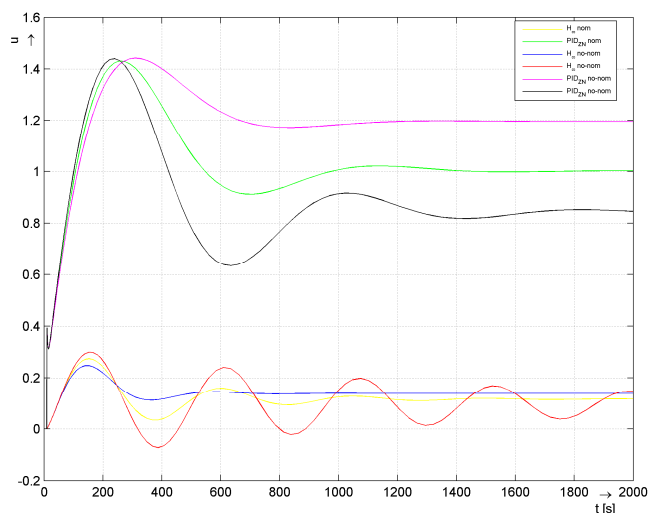
$$k_p = 19.7336, \quad k_i = 0.6498, \quad k_d = 0 \quad (9)$$

3. Porovnaní H_∞ regulátoru s PID regulátorem

Porovnaní navrženého H_∞ regulátoru a PID regulátoru ukážeme na průběhu regulované veličiny a akčních veličiny na Obr.6 a Obr.7.



Obr.6 Průběh regulované veličiny
Fig.6 Desired value response



Obr.7 Průběhy akční veličiny
Fig.7 Action vaule response

Závěr

V úvodní části je rozebrán a popsán model bubnového kotle v prostředí MatLab/Simulink. Dále je rozbrána návrhová metoda robustního H_∞ regulátoru. Pro syntézu robustního H_∞ regulátoru byl vybrána metoda smíšené citlivosti. Získané poznatky ze syntézy byly aplikovány na modelu bubnového kotle.

V závěru je navržen PID regulátor pomocí klasické metody (Zichler-Nichols), který je následně porovnán s navrženým robustním H_∞ regulátorem.

Při porovnání byla očekávána lepší regulace s robustním H_∞ regulátorem než s klasickým PID regulátorem. Z Obr.6 a Obr.7 je vidět, že naše očekávání se vyplnila. Je zde ještě ukázán průběh regulačního průběhu a akční veličiny pro regulovanou soustavu se změněnými parametry se stejnými regulátory, které byli navrženy na nominální soustavě.

Poděkování

Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky projektem číslo 1M06059 Pokročilé technologie a systémy pro energetiku.

Literatura

[1] ASTRÖM, K., J., BELL, R., D.: Drum-boiler dynamics. Automatica 36, 2000, p. 363-378, ISSN 0005-1098.
 [2] DATTA, A., HO, M.-T., & BHATTACHARYYA, S. P.: Structure and Synthesis of PID Controllers, London: Springer Verlag, 2000, 235p. ISBN 1-85233-614-5.
 [3] HUBKA, L., Menkina, M., Školník, P.: Modelling of the drum-boiler in Matlab. In.: 8th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals ECMS 2007 & Doctoral School (EDSYS, GEET), Books of Abstracts + CD-ROM, Liberec: Technical University of Liberec, Czech Republic, 2007. ISBN 978-80-7372-202-9.
 [4] SKOGESTAD, S.: Multivariable feedback control. Analysis and Design. England: John Wiley & Sons Ltd., 1996. 548p. ISBN 0-471-94330-4.

Abstract

This paper presents the modeling of control problem the drum water level in the drum boiler. As a controller there is implemented a robust H_∞ controller. The used model of the drum boiler is very sophisticated nonlinear state model, which is based on the global balances of mass and energy. The simulation model is created in the Matlab. The synthesis of the robust H_∞ controller is based on a minimization of mixed sensitivity function. At the end there is compared the dynamic behavior of the robust controller and a PID controller designed by some standard method.

Ing. Michal Menkina

Technická univerzita v Liberci
 Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií
 Ústav řízení systémů a spolehlivosti
 Studentská 2
 461 17 Liberec, ČR
 Tel.: +420 485353756
 E-mail: michal.menkina@tul.cz