

Ing. Jan HRDLIČKA, Ph.D.,  
Prof. Ing. Bohumil ŠULC, CSc.  
ČVUT Praha, Fakulta strojní  
Ústav energetiky

# Problematika řízení automatických kotlů na biomasu



## Problems of Controlling Automatic Boilers for Biomass

Recenzent  
Prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

*Autoři se zabývají náhradou dvoustavové regulace spojitým PI řízením u kotlů na tuhá paliva. Přístup demonstrují na experimentálně získaných výsledcích pro automatický roštový kotel o tepelném výkonu 25 kW, který spaluje dřevěné pelety. Výsledky výzkumu přináší optimalizaci provozu kotle z hlediska emisí a účinnosti, aniž by byla ovlivněna základní regulace teploty výstupní vody.*

**Klíčová slova:** kotel, regulace, tuhá paliva, spojitá regulace, pelety

*The author deals with the substitution of two-position action regulation by the modulating PI control for the solid fuel boilers. The access is demonstrated on experimentally obtained results for the automatic grate (stoker) boiler with thermal output 25 kW in which wooden pallets are burnt. Research results bring optimization of the boiler operation from the viewpoint of emissions and efficiency, without affecting the essential regulation of the output water temperature.*

**Key words:** boiler, control, solid fuel, modulating control, pellets

## ÚVOD

V průběhu posledních let neustále stoupá počet prodaných a instalovaných automatických kotlů malých výkonů (do 50 kW) spalujících biomasu a lze předpokládat, že se jejich počet bude i nadále zvyšovat. Typická oblast využití těchto kotlů je vytápění domácností nebo menších provozních budov [1]. Přestože je takové využití biomasy obecně podporováno a propagováno jako náhrada tzv. „neekologického“ vytápění, kdy se obvykle myslí zejména spalování hnědého uhlí, mohou i zde nastat obdobné problémy, například v případě nesprávného provozování kotle. Pokud pomíne použití jiného, než výrobcem udaného paliva, jedná se zejména o špatné nastavení spalovacího procesu uživatelem, jehož důsledkem jsou zvýšené emise CO a uhlovdíků, a snížení tepelné účinnosti a tím i stupně využití paliva. V praxi se může stát, že ačkoliv výrobce uvádí tepelnou účinnost kotle např. 90 % a kotel splňuje z hlediska emisí normu ČSN EN 303–5 v kategorii třídy účinnosti 3, nesprávně provozovaný kotel může dosahovat např. pouze 60% účinnosti a skutečné emise mohou být i řádově vyšší. V takových případech využití biomasy pozbývá propagovaných výhod, navíc se takové využití paliva stává ekonomicky nevýhodným. Specifikem malých kotlů je využití v zastavěných lokalitách menších obcí, kde mohou výrazným způsobem ovlivňovat kvalitu lokálního ovzduší. Podle dostupných údajů [2] se počet prodaných malých kotlů na biomasu pohybuje v EU v řádech desítek tisíc kusů se stoupajícím trendem. Stále se přitom zvyšuje počet kotlů s automatickou regulací, jejichž výhodou je omezení možnosti neodborného zásahu nepoučeného uživatele a samozřejmě i výrazné zvýšení komfortu obsluhy a vytápění. Zásah uživatele je pak možný jen v omezené míře a zužuje se z hlediska vlastního spalovacího procesu prakticky pouze na nastavení žádané teploty výstupní vody, resp. tepelného výkonu. Použití řídicích jednotek pak otvírá široké možnosti další optimalizace spalovacího procesu, zaměřené např. na minimalizaci emisí pocházejících z nedokonalého spalování (CO, uhlovdíky), nebo na další zvýšení účinnosti kotle při zachování požadovaného tepelného výkonu. Řídicí jednotky automatických kotlů na biomasu jsou obvykle jednoúčelově vyráběné integrované obvody zajišťující základní funkce provozu kotle, jako je regulace příkládání paliva v závislosti na požadované teplotě vody, množství spalovacího vzduchu a pohyb roštu. Vyšší kategorie kotlů jsou někdy vybaveny i řízením spalovacího vzduchu na základě signálu z lambda–sondy. Kotle bez lambda–sondy mají množství spalovacího vzduchu nastaveno pevně podle typu spalovaného paliva při nominálním výkonu, případně je řídicí jednotka schopna v diskretních stupních množství vzduchu měnit, někdy je možné toto množství měnit i manuálně uživatelem. U většiny kotlů jsou řídicí jednotky relativně jednoduché, pracující v režimu dvoustavové on-off regulace [3].

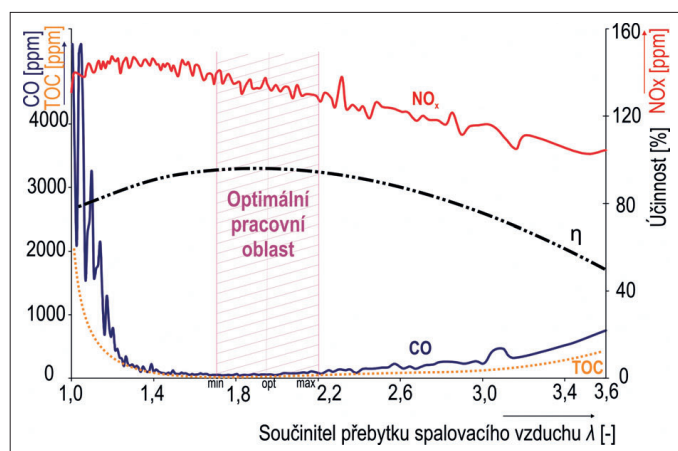
V tomto článku je ukázána náhrada dvoustavové regulace spojitou PI regulací, ke které je poté možné vytvořit další dodatečné algoritmy, které mohou optimalizovat provoz kotle z hlediska emisí i účinnosti, aniž by základní regulace (tj. regulace výstupní teploty vody) byla jakkoliv ovlivněna. To běžná dvoustavová regulace neumožňuje. Tento přístup byl demonstrován na příkladu automatického roštového kotle o výkonu 25 kW spalujícího dřevěné pelety. Pro vytvoření této regulace byl použit programovatelný automat (PAC), takovou regulaci je však možné stejným způsobem naprogramovat do jednoúčelového integrovaného obvodu.

## ŘÍZENÍ MALÉHO KOTLE NA BIOMASU

Hlavním cílem řízení kotle je dosáhnout a udržet požadovaný tepelný komfort v objektu, který je obvykle reprezentován teplotou výstupní vody z kotle a řeší se manipulací s množstvím dodávaného paliva. Další součástí regulace je řízení vlastního spalovacího procesu. Spalování tuhého paliva na roštu probíhá v několika fázích. Proces začíná po přívodu paliva na rošt, kdy dochází nejprve k sušení paliva, poté dojde k uvolnění a zapálení prchavé hořlaviny a poslední fází je vyhořívání fixní hořlaviny. Zatímco krok uvolnění a spálení prchavé hořlaviny je relativně rychlý, spalování fixní hořlaviny je nejdéle trvajícím procesem a odpařování vody je druhým nejdelším procesem. Cílem regulace je proto řídit provoz kotle tak, aby všechny fáze spalování probíhaly s co nejvyšší konverzí, tj. aby se proces co nejvíce blížil dokonalému spalování.

Důležitým krokem je optimalizace příkládání paliva a pohybu roštu, které mají vliv na celkový chod kotle z hlediska stability. Není vhodné, aby se v místě vstupu tvořila větší vrstva paliva. S tím úzce souvisí posun roštu, který je rovněž nutné optimalizovat tak, aby se nevytvářela na roštu příliš vysoká vrstva, a rovněž aby došlo ke kompletnímu vyhoření paliva, zejména v koncové části roštu, kde probíhá prakticky pouze spalování fixní hořlaviny.

Spalovací proces ovlivňuje rovněž přívod spalovacího vzduchu, a to jeho množství i poměr mezi primárním a sekundárním vzduchem. Specifikem biomasy je velký obsah prchavé hořlaviny (obvykle se pohybuje hodnota  $V_{daf}$  v rozsahu 75 až 85 %). Spalování takového paliva vyžaduje rozdělení přívodu spalovacího vzduchu. Obecně se primární vzduch přivádí pod rošt a zajišťuje spalování fixního uhlíku a sušení paliva a sekundární vzduch se přivádí nad rošt a zajišťuje spálení uvolněné prchavé hořlaviny. U kotlů na biomasu je obvykle možné, poměr primárního a sekundárního vzduchu řídit klapkou, jejíž ovládání lze rovněž začlenit jako optimalizační algoritmus



Obr. 1 Závislost účinnosti, CO, TOC a NO<sub>x</sub> na součiniteli přebytku spalovacího vzduchu

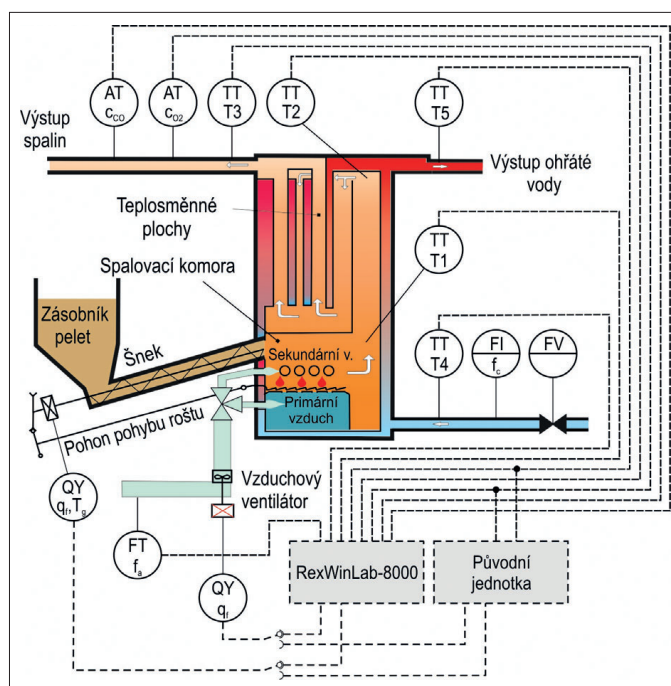
k základní PI regulaci teploty vody. K přesnému nastavení celkového množství spalovacího vzduchu je možné použít lambda-sondu, která je v principu elektrochemickým analyzátelem kyslíku. Hodnota součinitele přebytku spalovacího vzduchu  $\lambda$  je určena vztahem:

$$\lambda = \frac{21}{21 - C_{O_2,mer}}$$

Na součiniteli přebytku spalovacího vzduchu závisí účinnost kotle. Z pohledu tepelných ztrát se jedná o ztrátu komínovou, která roste s rostoucí hodnotou  $\lambda$ . Z pohledu kvality spalování na hodnotě  $\lambda$  závisí emise všech sledovaných nežádoucích složek spalin. Z hlediska nedokonalosti spalování se jedná o emise CO a uhlovodíků, a dále pak např. o emise oxidů dusíku. Existuje určité rozmezí hodnot  $\lambda$ , ve kterém jsou emise CO a TOC minimální, a účinnost maximální. Pro NO<sub>x</sub> je závislost odlišná, minimum NO<sub>x</sub> se obvykle nekryje s minimem CO a TOC. To je ukázáno na obrázku 1.

## EXPERIMENTÁLNÍ KOTEL

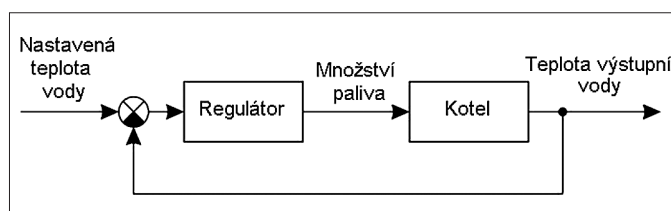
Pro experimenty byl použit běžně na trhu dostupný automatický kotel na pelety. Jedná se o teplovodní kotel o nominálním výkonu 25 kW určený pro spalování dřevních i alternativních pelet o průměru 6 až 8 mm. Kotel se skládá z vyzděné spalovací komory s ocelovým roštem s pohyblivými roštnicemi, na který je šnekovým dopravníkem přiváděno palivo. Spalovací vzduch je přiváděn vzduchovým ventilátorem do dvou úrovní – primární vzduch pod rošt a sekundární vzduch otvory v bočních stěnách komory nad rošt. Rozdělení vzduchu není aktivně řízené, lze je manuálně nastavit klápkou, která oba proudy vzduchu rozděljuje. Na spalovací komoru pak navazují sekce teplosměnných ploch. Kotel je řízen dvoustavovou on-off regulací, která zajišťuje periodické přikládání paliva, jehož intervaly jsou v servisním menu výrobcem přednastavené. Běžný uživatel nemůže nastavení měnit. Původní regulace rovněž umožňuje měnit otáčky vzduchového ventilátoru mezi čtyřmi hodnotami. Výchozí hodnota je nastavitelná v servisním menu (tj. opět bez možnosti zásahu běžným uživatelem), regulace otáčky ventilátoru mění pouze při přechodu do vyhořivacího režimu, tj. v situaci, kdy je překročena cílová teplota výstupní vody z kotle. V takovém okamžiku jsou otáčky ventilátoru sníženy a je zastaveno přikládání paliva. Pokud stále dochází k odběru tepla, po poklesu teploty vody pod určitou hodnotu je opět aktivován běžný režim hoření. Současná regulace kotle tedy využívá jediný aktivní vstup – teplotu vody na výstupu z kotle. Jinak tato regulace neumožňuje žádné další zásahy do spalovacího procesu. Byl proto navržen a zkonstruován nový rozvaděč, který byl paralelně připojen ke stávající řídicí jednotce, založený na použití PAC (Programmable Automation Controller) řady Wincon 8000, detailněji viz [4] a [5]. Schéma kotle je na obrázku 2.



Obr. 2 Schéma experimentálního kotle se zapojením původní řídicí jednotky a PAC

## POROVNÁNÍ ŘÍZENÍ KOTLE S PŮVODNÍ REGULACÍ A PI REGULACÍ

Oba způsoby regulace kotle byly porovnány za analogických podmínek, aby dosažené výsledky byly srovnatelné. V obou případech byl experiment realizován dlouhodobě, přibližně 4 až 5 hodin. Schéma PI regulace je znázorněno na obrázku 3. V obou případech byla nastavena žádaná teplota 70 °C a byl nastaven stejný průtok chladicí vody, aby výsledky byly srovnatelné z hlediska odebraného tepelného výkonu. V obou případech byla vyhodnocena měrná spotřeba paliva a rovněž byly vyhodnoceny střední hodnoty, maxima, minima a směrodatné odchylky u výstupní teploty vody, teploty za prvním výměníkem a koncentrace CO a kyslíku ve spalinách. Teplota spalin za prvním výměníkem byla sledována jako indikace stability tepelného výkonu ohniště a koncentrace CO jako míra kvality spalování. Teplota spalin za prvním výměníkem je na obrázku 2 značena jako TT 2. Záznam funkce obou regulací je obrázku 4.

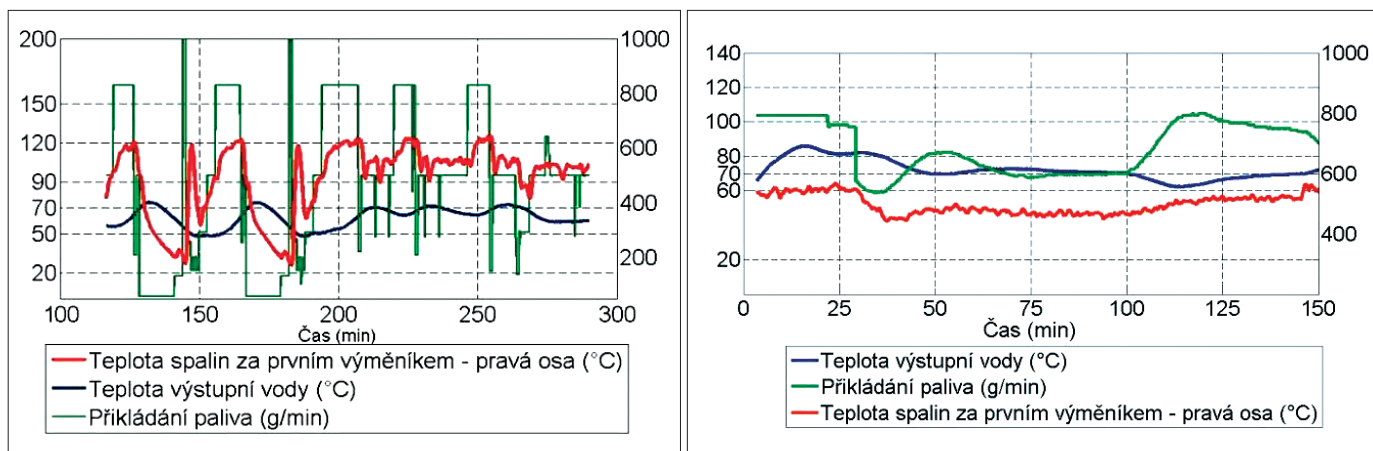


Obr. 3 Schéma PI regulace teploty výstupní vody

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot pro dvoustavovou regulaci je uvedeno v tabulce 1, kde byly vypočteny střední hodnoty, maxima a směrodatné odchylky za celou dobu experimentu. Měrná spotřeba paliva je uvažována jako množství paliva, které se spotřebuje na převedení 1 MJ tepelného výkonu do otopné vody při stejných podmínkách, tj. cílová teplota vody 70 °C, stejná tepelná zátěž kotle a samozřejmě stejné palivo.

## ZÁVĚR

Cílem tohoto článku bylo ukázat na výhody použití spojité PI regulace. Ty se projevily nejen výrazným zlepšením stability ale i průměrných hod-



Obr. 4 Záznam experimentu s původní řídicí jednotkou (vlevo) a PI regulací (vpravo)

noty regulované teploty výstupní vody. Jedná se o regulaci, která se více přiblížila žádané hodnotě, ale rovněž i snížila emise CO a zlepšila účinnosti o téměř 6 %, což je reprezentováno snížením měrné spotřeby paliva ze 72 na 67 [g/MJ] při stejném tepelném výkonu a cílové teplotě výstupní vody. Závěrem lze konstatovat, že spojitá regulace přináší do provozu malého kotle na biomasu nesporné výhody, zejména co se týká jeho účinnosti a omezení některých nežádoucích plynných emisí. Pro studium možností PI regulace byl sice kotel vybaven relativně náročnou instrumentací (zejména programovatelný automat), nicméně je samozřejmě možné řídicí algoritmy naprogramovat do jednoúčelového mikročipu, což umožní udržet cenu kotle i s pokročilou regulací na přijatelné úrovni. Ani v případě PAC by se cena takového kotle nezvýšila o víc než 5 až 8 %, počítáno z průměrné současné ceny automatického kotle na pelety a programovatelného automatu.

V dnešní době jsou již některé kotle vybavovány i širokopásmovou lambda-sondou, což představuje další významnou možnost rozšíření optimalizačních funkcí, jako je například maximalizace účinnosti nebo minimalizace emisí. Hlavním cílem je zajistit ekologický i ekonomický provoz malého kotle na biomasu s maximálním uživatelským komfortem.

Kontakt na autora: jan.hrdlicka@fs.cvut.cz

Tab. Statistické vyhodnocení experimentů

	Původní regulace				PI regulace			
	průměr	max	min	sm. odch.	průměr	max	min	sm. odch.
Twout [°C]	64	84	48	10	72	86	62	6
T2 [°C]	451	655	177	143	501	569	441	32
CO [ppm]	644	3445	14	824	85	1342	27	159
O <sub>2</sub> [%]	14,1	20,5	5,8	4,5	9,5	13,6	4,4	1,8
Palivo [g/MJ]	72				67			

**Použité zdroje:**

- [1] Lackner M., Winter F., Agarwal A., K. editors 2010. Handbook of Combustion, Wiley-VCH Verlag. Vol. 4., pp. 85–136
- [2] The RES-H Initiative and related directives Heat from Renewable Energy Sources, dostupné on-line: [http://ec.europa.eu/environment/climat/.../renewable\\_energy\\_srcs\\_heat.pdf](http://ec.europa.eu/environment/climat/.../renewable_energy_srcs_heat.pdf)
- [3] Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H., Energie aus Biomasse, Heidelberg: Springer, 2009.
- [4] Šulc B., Vrána S., Hrdlička J., Lepold M., Control for ecological improvement of small biomass boilers, IFAC Symposium Power Plants & Power Systems, 5–8 July, 2009, Tampere, Finland
- [5] Lepold M., Plaček V., Šulc B., Vrána S., Pilotní ověřování nákladově efektivního řízení provozu malých kotlů na biomasu. Energetika a biomasa 2010, 169–175, ČVUT, Fakulta strojní, 2010. ■

**\* Větrná elektrárna produkující pitnou vodu**

V Chile byla ukázkově instalována firmou Eole Water větrná elektrárna, která produkuje až 200 l pitné vody za den. V elektrárně je instalováno malé chladicí zařízení, které ochlazuje listy elektrárny. Na listech pak kondenzuje vlhkost, která je odváděna sběrači na jejich koncích. Pohon chladicího zařízení zajišťuje právě větrná elektrárna, která navíc produkuje i elektřinu do sítě (asi o 25 % více než spotřebuje chladicí zařízení). Produkce vody je závislá na rychlosti větru a jeho teplotě. Ve vývoji je elektrárna s výkonem až 1000 l pitné vody za den.

(IIR Newsletter No. 42)

(MP)

**\* Nový VDMA návrh předpisu „Energetická inspekce“**

Koncem února 2011, představila Asociace údržby budov (AIG) ve VDMA (Německý svaz pro stavbu strojů a zařízení) návrh nové řady předpisů VDMA 24 197 „Energetická složka inspekce stavebních objektů“.

V současné době existují tři části:

- Část 1: Klimatizační a větrací prvky a zařízení (19 stran)
- Část 2: Prvky a zařízení pro vytápění (16 stran)
- Část 3: Chladicí zařízení a výrobky pro chlazení a vytápění (14 stran)

Ve směrnici jsou navrženy formuláře kontrolních zápisů ze záznamů průběhu hodnocení jednotlivých prvků a zařízení, které pak tvoří podklad pro energetické posouzení kvality zařízení a spotřeb energií pro udržování potřebného životního prostředí v budově, včetně kvality jejich zabudování do stavby.

Výsledkem postupu podle VDMA 24 197 jsou kvalifikované podklady o skutečných a požadovaných stavech klimatizačních, větracích, vytápěcích a chladicích zařízení, na základě kterých je možné kvalifikovaně rozhodnout o odstranění závad a dosažení minimalizace energetických nároků jak vyžaduje zákon od energetických inspekcí.

Čas pro připomínky k částem 1 až 3 končí 30. června 2011. Celý navrhovaný text je možno zdarma stáhnout z webových stránek AIG ([www.vdma.org/AIG](http://www.vdma.org/AIG)).

CCI04/2011

(Le)