

Niektoré aspekty riadenia spaľovania biomasy v kotloch malých a stredných výkonov

Ján Piteľ, Alexander Hošovský, Ivo Bukovský

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove,
Bayerova 1, 080 01 Prešov, Slovenská republika
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojná,
Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika
jan.pitel@tuke.sk, alexander.hosovsky@tuke.sk, ivo.bukovsky@fs.cvut.cz

Abstrakt

Cieľom riadenia spaľovacieho procesu biomasy je zabezpečiť jej dokonalé spaľovanie s minimálnym prebytkom spaľovacieho vzduchu. Za týmto účelom sa do systémov riadenia implementujú algoritmy využívajúce rôzne regulačné štruktúry v závislosti na výkone kotla, v ktorom prebieha spaľovanie biomasy. V príspevku sú popísané prístupy k riadeniu spaľovacieho procesu biomasy v kotloch malých a stredných výkonov. Pozornosť je venovaná aj riešeniu problému dopravného oneskorenia pri riadení výkonu kotla, pričom na jeho elimináciu bol použitý Varelov imunitný regulátor pre reguláciu teploty vody na výstupe kotla.

Kľúčové slová: riadenie spaľovacieho procesu, biomasa, dopravné oneskorenie, Varelov imunitný regulátor.

1 Úvod

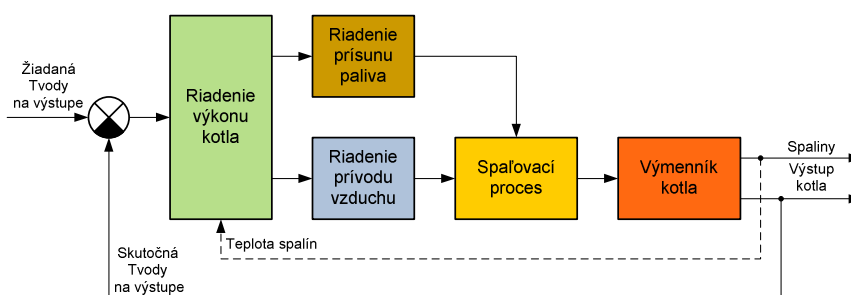
Najbežnejším spôsobom energetického využitia biomasy je technológia jej priameho spaľovania. Hoci priame spaľovanie je najjednoduchšou a najbežnejšou metódou využitia energie biomasy, nie vždy je to proces účinný aj v dôsledku pomerne vysokej nehomogenity biomasy. Aj z tohto dôvodu sa spaľovanie biomasy považuje za relatívne zložitý proces vyžadujúci si kvalitné riadenie pre dosiahnutie maximálnej účinnosti a nízkych produkovaných emisií. Typickým prípadom nekvalitného riadenia spaľovania biomasy je napríklad zle regulovaný pomer vzduchu a paliva pri zmene kvality dodávaného paliva, počas prechodových dejov pri náhlej zmene požadovaného výkonu, ale aj pri rozhorievaní alebo vyhasínaní kotla [2].

Výrazný vplyv na kvalitu spaľovania biomasy má množstvo spaľovacieho vzduchu privádzaného do spaľovacieho procesu. Ak je množstvo vzduchu menšie, ako je optimálne, dochádza k nedokonalému spaľovaniu, pričom spalinami odchádza časť horľavých látok, ktoré spôsobujú znečistenie ovzdušia a straty z hľadiska energetického využitia paliva. Naopak v prípade privedenia väčšieho množstva spaľovacieho vzduchu, ako je optimálne, dochádza k energetickým stratám nazývaným aj komínová strata. Preto je potrebné priebežne korigovať množstvo spaľovacieho vzduchu pri každom prísune paliva do ohniska a aj v priebehu jeho spaľovania. Okrem toho je potrebné spaľovací vzduch rozdeliť vhodným pomerom medzi vzduch primárny a sekundárny [10].

2 Spôsoby riadenia spaľovacieho procesu biomasy

Spôsob riadenia spaľovacieho procesu biomasy úzko súvisí s výkonom kotla, v ktorom prebieha spaľovanie biomasy. V supervelkých kotloch s tepelným výkonom nad 10 MW sú na kontrolu a riadenie spaľovacieho procesu inštalované drahé analyzátory spalín, na základe ktorých systém riadenia kotla optimalizuje spaľovanie tak, aby bolo dokonalé s minimálnym prebytkom vzduchu. Podobne je to už aj vo veľkých kotloch s tepelným výkonom od 1 MW do 10 MW. Problém vzniká u kotlov malých a stredným výkonom, kedy trvalé použitie analyzátora spalín na riadenie spaľovacieho procesu je z ekonomického hľadiska nerentabilné.

U kotlov malých výkonov (5 až 100 kW) už cena riadiacej jednotky vrátane príslušných snímačov má podstatný význam z hľadiska celkovej ceny kotla a preto sa používajú jednoduché spôsoby riadenia, ako napr. na Obr. 1.

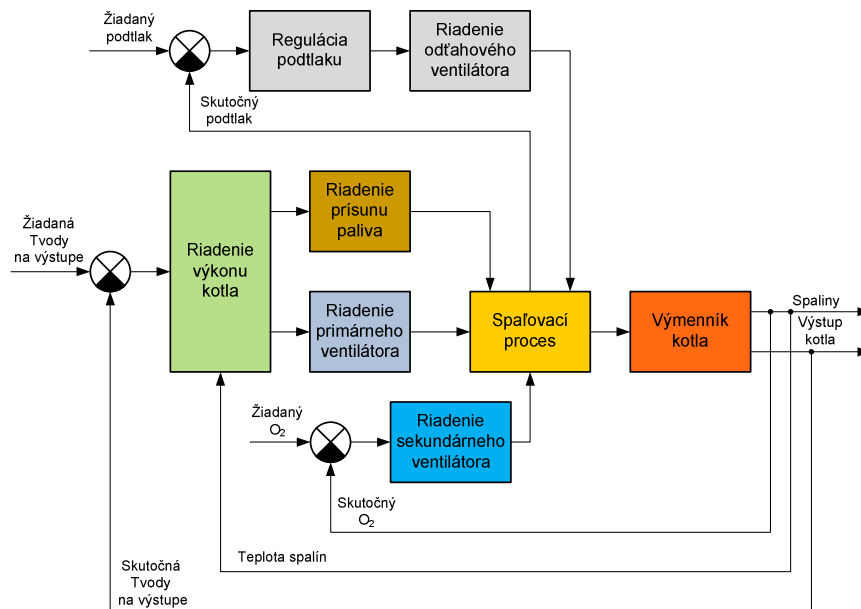


Obrázok 1: Principiálna bloková schéma riadenia kotla malého výkonu

Riadiaca jednotka na základe nastavenej žiadanej teploty vody na výstupe kotla a informácie o skutočnej teplote prostredníctvom spätnej väzby dáva požiadavku na výkon kotla, ktorý je zabezpečený riadením prísunu paliva do kotla a otáčkami ventilátora prívodu vzduchu do kotla. Hodnoty plnenia paliva a otáčky ventilátora sú určované na základe výrobcom prednastavených kriviek v závislosti na regulačnej odchýlke teploty vody na výstupe kotla. Použité algoritmy využívajú najmä dvojhodnotové ON/OFF riadenie, v poslednom čase boli testované aj klasické PID algoritmy vrátane rozšírenia ich regulačných možností pomocou fuzzy logiky popísané v [9]. Problémom je nutnosť ručného prestavovania parametrov riadenia pri zmene

kvality paliva (napr. zmena vlhkosti, druhu biomasy a pod.), čo výrazne komplikuje automatickú prevádzku kotla. Luxusnejšie verzie kotlov majú aj spätnú väzbu od teploty spalín využiteľnú napr. v prechodových stavoch kotla.

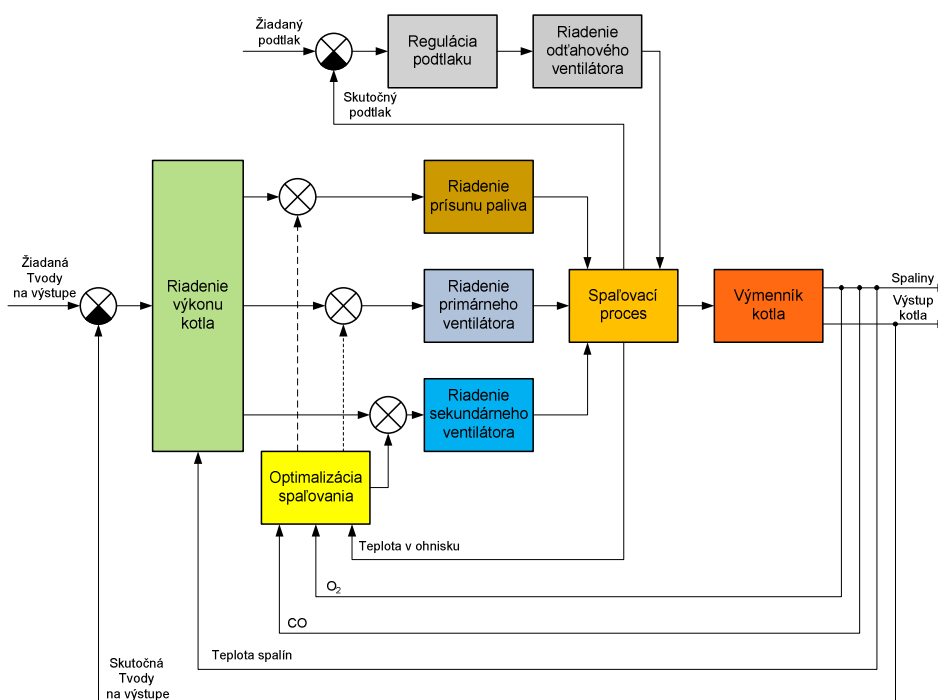
Kotle stredných výkonov (100 až 1000 kW) renomovanejších výrobcov sú v poslednom čase dodávané už aj s lambda sondou, ktorá slúži na meranie koncentrácie kyslíka v spaliniach [7]. Systémy riadenia týchto kotlov (najmä od výkonu 300 kW) sú už sofistikovanejšie a okrem riadenia výkonu kotla umožňujú regulovať aj prebytok vzduchu v spaliniach (Obr. 2). Množstvo dodávaného spaľovacieho vzduchu sa mení napr. riadením otáčok ventilátora prívodu sekundárneho vzduchu na základe informácie o skutočnom prebytku vzduchu vypočítanom z nameranej koncentrácie kyslíka v spaliniach pomocou lambda sondy, čím môže dôjsť k zníženiu energetických strát spôsobených zbytočne vysokým prebytkom vzduchu v procese spaľovania. Zároveň tieto systémy zabezpečujú reguláciu podtlaku v spaľovacej komore. Algoritmy riadenia využívajú najmä klasické PID regulátory.



Obrázok 2: Principiálna bloková schéma riadenia kotla stredného výkonu

Optimálny pracovný rozsah súčiniteľa prebytku spaľovacieho vzduchu pre spaľovanie biomasy je zvyčajne v intervale 1,4 až 2,0 a závisí na vlhkosti a druhu paliva, konštrukcii spaľovacieho zariadenia a pod. Problémom pri riadení podľa Obr. 2 je potom určenie žiadanej hodnoty koncentrácie kyslíka v spaliniach, pretože táto závisí na kvalite paliva. Jednou z možností (a často používanou výrobcami kotlov stredných výkonov) je ručné zadávanie vlastností paliva cez obslužnú jednotku riadiaceho systému kotla alebo cez monitorovací systém prevádzky kotla. To však prináša do riadenia kotla subjektívny faktor, ktorý môže znižovať efektívnosť spaľovacieho procesu. Preto sa do blokovej schémy na Obr. 2 doplnil optimalizačný blok, ktorého úlohou je korigovať parametre riadenia kotla nielen od koncentrácie kyslíka v spaliniach,

ale aj na základe produkovaných emisií kysličníka uhoľnatého a prípadne aj teploty ohniska. Princiálna bloková schéma takéhoto riadenia je na Obr. 3.



Obrázok 3: Princiálna bloková schéma riadenia kotla stredného výkonu s optimalizáciou spaľovania

Úlohou algoritmov v bloku optimalizácie spaľovania je nájsť aj pri zmene vlastností paliva, resp. v prechodových dejoch spaľovania, takú hodnotu súčiniteľa prebytku spaľovacieho vzduchu, pri ktorej budú emisie kysličníka uhoľnatého minimálne, čím budú naplnené predpoklady pre dosiahnutie najväčšej účinnosti spaľovania. Pre splnenie tejto úlohy je potrebné, aby riadiaci algoritmus sledoval vývoj medzi emisiami kysličníka uhoľnatého a súčiniteľom prebytku spaľovacieho vzduchu a na základe toho následne upravoval žiadanú hodnotu koncentrácie kyslíka v spalinách. Uvedené bolo úspešne riešené v rámci výskumu „inteligentných“ systémov riadenia spaľovacích procesov biomasy využitím princípov fuzzy systémov [1].

3 Problém dopravného oneskorenia v riadení kotla

V dôsledku dopravného oneskorenia rádovo až stovky sekúnd použitie štandardných PID regulátorov pre riadenie výkonu kotla sťažuje stabilizáciu regulačného pochodu, prípadne dosiahnutie požadovanej kvality regulácie teploty vody na výstupe kotla. Jedným z používaných riešení pre reguláciu sústav s výrazným dopravným oneskorením je Smithov prediktor, v ktorom sa využíva model regulovanej sústavy pre

predikciu hodnoty regulovanej veličiny bez oneskorenia (a v dôsledku toho vyradenia bloku dopravného oneskorenia z regulačnej slučky). Nevýhodou však je, že tento algoritmus vyžaduje relatívne presný model regulovanej sústavy, pričom každá odchýlka spôsobuje zhoršenie vlastností prediktora. Ďalším riešením je využitie MPC (Model Predictive Control) riadenia, ktoré však taktiež vyžaduje model regulovanej sústavy [9]. Zaujímavým riešením je využitie princípu imunitného systému človeka na reguláciu teploty vody na výstupe kotla. Imunitný systém človeka je systém s extrémne zložitými interakciami medzi rôznymi orgánmi a rôznymi typmi buniek, ktoré sprostredkujú imunitnú reakciu. Z inžinierskeho hľadiska sú zaujímavými vlastnosťami robustnosť, adaptabilita, schopnosť učenia sa, decentralizovaný charakter.

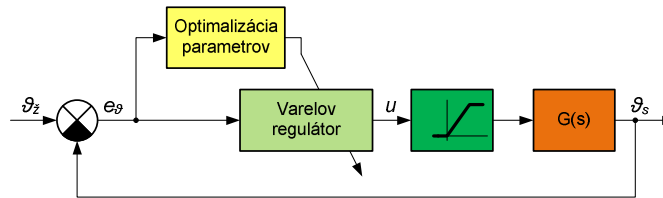
Umelý imunitný systém (ktorého podmnožinou sú aj imunitné regulátory) predstavuje výpočtovú paradigmu využívajúcu niektoré paralely s reálnym imunitným systémom pri mnohých zjednodušujúcich predpokladoch. Paralelou predstavujúcou základ pre využitie imunitného regulátora je vnímanie antigénu (teda cudzorodého elementu, ktorý je potrebné eliminovať) ako regulačnej odchýlky a koncentrácie B buniek zabezpečujúcich elimináciu antigénov ako akčnej veličiny zabezpečujúcej minimalizáciu (alebo elimináciu) regulačnej odchýlky. Varelov imunitný regulátor vychádza z teórie imunitných sietí druhej generácie navrhutej Varelom a Countinhom v [11] a napr. podľa [12] vykazuje veľmi dobré vlastnosti pre reguláciu sústav s veľkým dopravným oneskorením. Keďže na rozdiel od PID regulátorov pre tento typ regulátora neexistujú žiadne všeobecné pravidlá ladenia a vplyv jednotlivých parametrov na kvalitu regulácie je menej intuitívny a zrejmy, pre optimalizáciu jeho parametrov je vhodné využiť metaheuristické metódy, napr. simulované žihanie [4].

Možnosti použitia Varelovho imunitného regulátora boli otestované na modeli regulovanej sústavy, ktorého parametre vychádzali z modelu získaného identifikáciou kotla na biomasu stredného výkonu s dopravným oneskorením rádovo 7 až 8 minút [6]. Za určitých zjednodušení je možné kotol z hľadiska regulácie teploty vody na jeho výstupe chápať ako systém s jedným vstupom a jedným výstupom, kde vstupom je dodávka paliva v $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a výstupom je teplota vody v $^{\circ}\text{C}$. Bolo tiež zistené, že odozvy systému sa líšia pri náraste dodávky paliva v čase a jej poklese. Potom prenos sústavy $G(s)$ bol rôzny pre kladnú a zápornú hodnotu derivácie akčnej veličiny:

$$G_+(s) = \frac{0,0615}{(200s+1)^4} e^{-480s}, \text{ ak } \frac{du}{dt} > 0 \quad (1)$$

$$G_-(s) = \frac{0,06}{(165s+1)^4} e^{-150s}, \text{ ak } \frac{du}{dt} < 0 \quad (2)$$

Na Obr. 4 je znázornená základná schéma regulačného obvodu teploty vody na výstupe kotla s optimalizáciou parametrov Varelovho imunitného regulátora. Symboly použité v blokovej schéme majú nasledujúci význam: ϑ_z – žiadaná teplota vody na výstupe kotla, e_g – regulačná odchýlka teploty vody, u – akčná veličina vo forme množstva dodávaného paliva, ϑ_s – skutočná teplota vody na výstupe kotla. Akčná veličina bola zhora obmedzená hodnotou maximálneho množstva dodávaného paliva v kg za hodinu.



Obrázok 4: Bloková schéma regulačného obvodu teploty vody kotla pomocou Varelovho imunitného regulátora

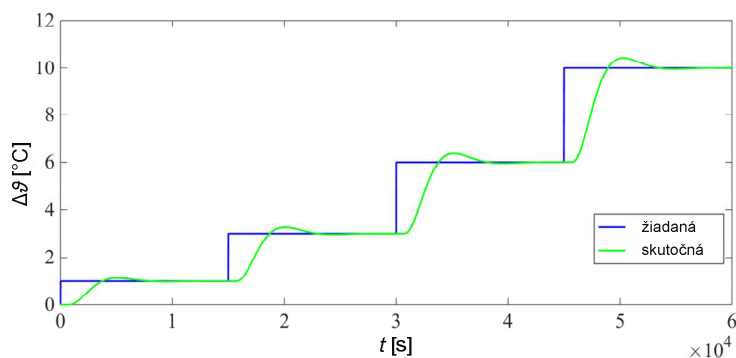
Varelov imunitný regulátor má niekoľko modifikovateľných parametrov, ktoré ovplyvňujú jeho vlastnosti [5]:

1. kombinovaný parameter úbytku protilátok (z dôvodu prirodzeného úbytku a ich vzájomných interakcií),
2. rýchlosť tvorby nových protilátok dozretými B-lymfocyty,
3. rýchlosť proliferácie B-lymfocytov,
4. kombinovaný parameter rýchlosti eliminácie antigénov a rýchlosti proliferácie B-lymfocytov z dôvodu prítomnosti antigénov,
5. prirodzený úbytok B-lymfocytov,
6. normalizačné konštanty funkcií dozrievania a proliferácie,
7. počiatočná hodnota koncentrácie protilátok (v implementácii predstavuje počiatočnú hodnotu integrátora koncentrácie protilátok).

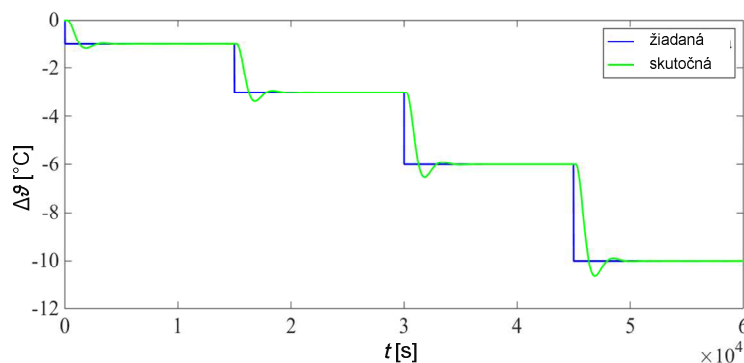
Pre dosiahnutie dobrej kvality regulácie bol pre ladenie parametrov regulátora použitý algoritmus simulovaného žihania (podobne ako u iných metaheuristických metód ani v tomto prípade však nie je možné zaručiť optimálnosť získaných parametrov). Optimalizované boli iba prvé 4 parametre regulátora z vyššie uvedeného zoznamu, pretože experimentálne bolo zistené, že najlepšie výsledky je možné dosiahnuť pri nulovej hodnote 5. parametra (prirodzený úbytok B-lymfocytov) a parametre pod poradovým číslom 6. a 7. boli prednastavené na hodnoty na základe predošlých experimentov. Samotný proces optimalizácie parametrov regulátora algoritmom simulovaného žihania a dosiahnuté výsledky sú popísané v [4].

Optimalizovaný Varelov imunitný regulátor bol následne testovaný v regulačnom obvode podľa Obr. 4 s rôznymi prenosmi regulovanej sústavy podľa (1) a (2) pre rôzne hodnoty zmien žiadanej teploty (zmeny o 1, 2, 3 a 4 °C). Na Obr. 5 sú priebehy testu regulácie pre kladné zmeny žiadanej hodnoty teploty na výstupe kotla s prenosom regulovanej sústavy podľa (1), pričom je zrejmé, že regulátor je schopný stabilizovať daný proces pri pomernej dlhej dobe regulácie a preregulovaniach v rozsahu do 15%. Doby regulácie vo všetkých prípadoch dosahujú hodnotu rádovo 6900 sekúnd, čo je možné pripísať relatívne miernym zásahom regulátora aj pri skokových zmenách žiadanej teploty (dôsledok špecifických interakcií medzi antigénom, B-lymfocyty a protilátkami). Táto skutočnosť je jedným z hlavných dôvodov schopnosti stabilizovať aj proces s extrémne dlhým dopravným oneskorením. Na Obr. 6 sú priebehy testu regulácie pre záporné zmeny žiadanej hodnoty teploty na výstupe kotla s prenosom regulovanej sústavy podľa (2), pričom doby regulácie sú pochopiteľne podstatne kratšie (rádovo 2600 sekúnd), keďže ide o systém druhého rádu s kratším dopravným oneskorením. Preregulovania majú hodnoty do 18%, teda vyššie ako v predchádzajúcom prípade, čo znamená, že je zásah regulátora charakterizovaný

vyššou koncentráciou B-lymfocytov pre daný regulačný pochod. Vzhľadom k integračnému charakteru Varelloho regulátora v odozve na antigén je ustálená hodnota regulačnej odchýlky vo všetkých prípadoch rovná nule.



Obrázok 5: Test regulácie pre kladné zmeny žiadanej teploty



Obrázok 6: Test regulácie pre záporné zmeny žiadanej teploty

4 Záver

Využitím pokročilých algoritmov riadenia aj z oblasti výpočtovej inteligencie je možné optimalizovať spaľovací proces biomasy aj v kotloch malého a stredného výkonu tak, že aj pri zmene vlastností paliva, resp. v prechodových dejoch spaľovania, sa dosiahne taká hodnota súčiniteľa prebytku spaľovacieho vzduchu, pri ktorej budú emisie kyslíčnika uhoľnatého minimálne, čím budú naplnené predpoklady pre dosiahnutie najväčšej účinnosti spaľovania. Z praktického hľadiska to vyžaduje použiť na meranie koncentrácie kyslíka a emisií kyslíčnika uhoľnatého v spalínach snímače spĺňujúce požadované minimálne technické parametre pri maximálnej ekonomickej výhodnosti (nízke počiatkové náklady na ich obstaranie a taktiež nízke prevádzkové náklady) [8]. Veľkú pozornosť je potrebné na základe doterajších skúseností venovať aj vhodnej filtrácii signálov z týchto snímačov [3].

Z výsledkov testov možnosti použitia Varelovho regulátora na reguláciu teploty vody na výstupe kotla vyplýva, že tento je schopný stabilizovať proces a poskytuje tiež dobrú robustnosť voči výrazným zmenám v dopravnom oneskorení. Napriek tomu, že regulátor bol testovaný len v obmedzenom rozsahu zmien žiadanej teploty, z dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že metódou simulovaného žhania optimalizované hodnoty koeficientov regulátora zabezpečovali stabilný regulačný pochod aj napriek nelinearite regulátora.

PodĎakovanie. Výskum je podporovaný grantom VEGA 1/0881/13 „Výskum algoritmov a metód prediktívneho riadenia spaľovacích procesov biomasy“ a projektom SK-CZ-2013-0095 „Výskum algoritmov optimalizácie ekologického spaľovania biomasy s použitím inteligentných a štatistických metód riadenia procesov“.

Literatúra

- [1] J. Boržíková, Výskum a vývoj inteligentných systémov riadenia výroby a dodávky tepla na báze biomasy, in *Zborník príspevkov ARTEP 2010*, Košice: TU, str. 35-1 – 4, 2010.
- [2] J. Boržíková, J. Hrdlička, V. Plaček, B. Šulc, S. Vrána, Experimentálne overovanie nových možností riadenia malých kotlov na biomasu, *Strojárstvo EXTRA*, roč. XV., č. 5/2011, str. 12/1 – 12/5, 2011.
- [3] J. Boržíková, J. Mižák, M. Tóthová, K. Židek, Filtrovanie meraných údajov na báze funkcie príslušnosti, *Strojárstvo EXTRA*, roč. XVI., č. 5/2012, str. 09/1 – 09/3, 2012.
- [4] A. Hošovský, Biomass-fired Boiler Control Using Simulated Annealing Optimized Improved Varela Immune Controller, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 12, No. 1, pp. 23-39, 2015.
- [5] A. Hošovský, K. Židek, I. Bukovský, Riadenie nelineárneho procesu s dopravným oneskorením pomocou optimalizovaného Varelovho imunitného regulátora, in *Zborník príspevkov ARTEP 2015*, Košice: TU, str. 10-1 – 16, 2015.
- [6] V. Máša, *Matematický model kotle na biomasu pro účely řízení*, Dizertační práce, Brno: VUT, 2010.
- [7] J. Mižák, J. Pitel, Lambda sonda a jej použitie pri riadení spaľovacieho procesu biomasy. *Strojárstvo EXTRA*, roč. XV., č. 5/2011, str. 19/1 – 19/3, 2011.
- [8] J. Pitel, J. Mižák, Cost Effective Biomass Combustion Process Control, in *Proceedings of the 8th PP&PSC (Power Plant and Power System Control) IFAC Symposium*, Toulouse: IFAC, pp. 616-620, 2012.
- [9] V. Plaček, *Poznátky z modelování a řízení kotlů nízkých výkonů spalujících biomasu*, Dizertační práce, Praha: ČVUT, 2015.
- [10] P. Skok, M. Rimár, Kontrola kvality spaľovacieho procesu drevnej štiepky, in *Zborník príspevkov ARTEP 2010*, Košice: TU, str. 65-1 – 6, 2010.
- [11] F.J. Varela, A. Coutinho, Second Generation Immune Networks, *Immunology Today*, Vol. 12, No. 5, pp. 159-166, 1991.
- [12] Y. Zhao, D.-M. Fu, Y. Yin, J. Wang, A Design Method of Immune Controller Based on Varela Artificial Immune Network Model, in *Proceedings of the Control and Decision Conference*, Yantai, pp. 3726-3731, 2008.