

Štruktúra optimálneho riadenia spaľovania v koksárenskej batérii

Ján Kačur¹ a Karol Kostúr²

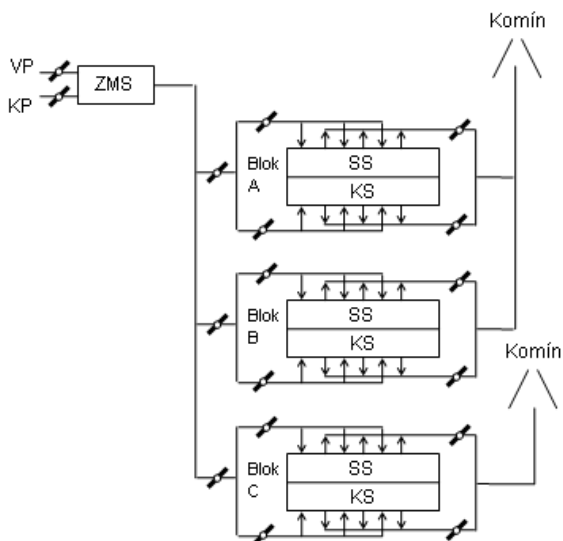
Optimal control structure of combustion in coke oven battery

Big energetic aggregates require a complicated control system, which provide an effective running or production. Among these aggregates belongs the coke – oven battery. This article contains a proposal of the two – level control system. The basic control is realized by a direct digital control. The advanced control continuously optimizes regulator parameters of the basic control. The present control system has been verified in real conditions of a coking plant.

Key words: control system, stabilization, optimal control, coke-oven battery.

Úvod

Veľkopriestorová koksárenská batéria patrí k veľkým tepelným agregátom vyznačujúcich sa veľkou spotrebou energie a problematickým ovládaním. Problematické ovládanie batérie je zapríčinené tepelnou zotrvačnosťou systému, a preto, či už pri návrhu novej batérie alebo pri riadení prevádzky už postavenej batérie je dôležité poznať jednotlivé procesy, ktoré prebiehajú pri výrobe koksu. Jedným z hlavných fyzikálno-chemických procesov je proces spaľovania vykurovacieho plynu. Podstatou spaľovania plynu je chemická reakcia jeho horľaviny s kyslíkom a premena východných látok na nové zlúčeniny. Pre zabezpečenie dokonalého využitia chemickej energie paliva je potrebné riešiť jeho dokonalé spálenie. Nedokonalým spálením sa stráca časť tepla, pretože neprebegne v dostatočnej miere oxidácia paliva. Pri spaľovaní plynov s nižšou výhrevnosťou je strata nedokonalým spaľovaním daná obsahom CO v spalinách. V článku je navrhnutá štruktúra systému riadenia koksárenskej batérie na strane odťahu spalin. Úlohou navrhnutého riadiaceho systému je stabilizovať obsah CO v odťahovaných spalinách na požadovanú hodnotu. Návrh bol zameraný na koksárenskú batériu, ktorá je vykurovaná zmesným plynom na báze vysokopecného (VP) a koksárenského plynu (KP). Zmesný plyn vzniká zmiešaním týchto dvoch plynov v zmiešavacej stanici (ZMS). Batéria má tri bloky (A, B, C), pričom každý je delený na strojnú (SS) a koksovú stranu (KS) (obr. 1).



Obr. 1. Schéma rozmiestnenia automatických regulačných kláp na potrubiach vykurovacieho plynu a spalinových kanáloch koksárenskej batérie.

Fig. 1. Schema of the arrangement of automatic regulation flaps integrated on pipelines of the heating gas and combustion products on the coke oven battery.

Koksárenská batéria je typickým tepelným agregátom, v ktorom dochádza k nedokonalému spaľovaniu minimálne z dvoch dôvodov:

- ručná regulácia prívodu spaľovacieho vzduchu neumožňuje v reálnom čase reagovať na zmenu množstva paliva,
- cez praskliny v ohrevovej stene vniká do spaľovacej komory uvoľňujúci sa koksárenský plyn z koksovacej komory.

¹ Ing. Ján Kačur, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Ústav riadenia výrobných procesov, Boženy Němcovej 3, 043 54 Košice

² prof. Ing. Karol Kostúr, CSc., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Ústav riadenia výrobných procesov, Boženy Němcovej 3, 043 54 Košice

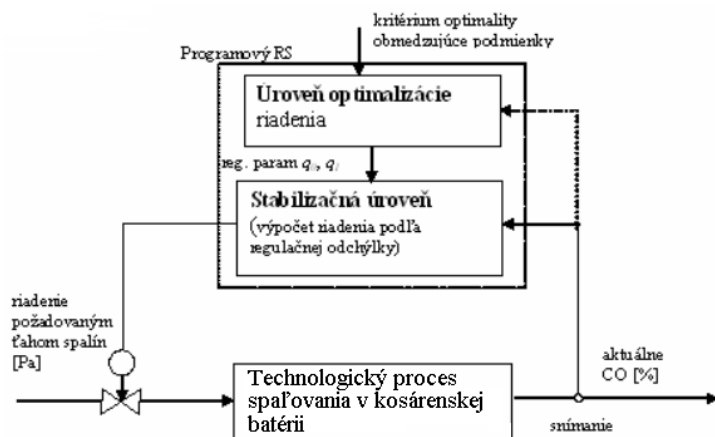
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 22. 9. 2006)

Na strane príkonu je vyriešený systém dopredného riadenia. Na výstupnej strane však chýba systém pre riadenie spaľovania. Systém dopredného riadenia predstavuje komplexný riadiaci systém vykurovania pre jednotlivé bloky batérie. Jeho hlavnou úlohou je podľa získaných (nameraných alebo vypočítaných) dát určiť množstvo potrebného tepla (tepelné toky) pre nasledujúce štyri hodiny vykurovania. Tieto tepelné toky je potrebné určiť pre všetky bloky batérie a pre obe strany blokov. Zvýšením príkonu vykurovacieho plynu za účelom dosiahnutia požadovaných teplôt však často dochádza k jeho nedokonalému spáleniu, čo sa prejaví na zvýšenom množstve CO v odťahovaných spalinách. Operátor musí potom nepriamo meniť spaľovací pomer (vzduch - plyn), a to zmenou množstva nasávaného vzduchu. Množstvo nasávaného vzduchu je možné meniť prostredníctvom ťahu spalín. Ťah spalín sa reguluje prostredníctvom sústavy automatických regulačných kláp v dymových kanáloch vo všetkých blokoch a ich stranách (obr. 1). Rozhodnutie o koľko zvýšiť alebo znížiť ťah spalín závisí od operátora, čo je nedostatkom súčasného systému riadenia spaľovania. Preto bola navrhnutá dvojúrovňová štruktúra riadenia spaľovania na koksárenskej batérii, ktorého úlohou je stabilizácia obsahu CO v odťahovaných spalinách (Kačur, 2004).

Dvojúrovňová štruktúra riadenia

Navrhnutý riadiaci systém pre stabilizáciu CO v odťahovaných spalinách rieši problém stabilizácie meraného obsahu CO v spalinách na požadovanú hodnotu. Vstupom pre spustenie spätnoväzobnej riadiacej slučky je optimálna požadovaná hodnota CO, resp. O₂ v spalinách. Riadiaci systém na úrovni stabilizácie mení na základe regulačnej odchýlky ťah spalín podľa vypočítaného prírastku. Zmena ťahu spalín spôsobí,

že sa zmení množstvo nasávaného vzduchu do priestoru pecí, a tým sa nepriamo zmení spaľovací pomer. Zmena spaľovacieho pomeru sa potom prejaví na zložení a teplote odchádzajúcich spalín. Stabilizačná úroveň je založená na báze diskrétného matematického regulátora v prírastkovom tvare.



Obr. 2. Schéma dvojúrovňovej štruktúry riadenia.
Fig. 2. Scheme of the two level structure of the control.

Na obr. 2 je zobrazená schéma spätnoväzobného systému riadenia, ktorý sa môže aplikovať na obidve strany všetkých troch blokov koksárenskej batérie. Jeho základom je stabilizačná úroveň postavená na báze diskrétného matematického regulátora. Nadstavbu tvorí úroveň optimalizácie riadenia, ktorá zabezpečuje priebežnú adaptáciu parametrov regulátora. Navrhnutý systém riadenia sa zakladá na možnosti riadiť ťah spalín pomocou sústavy regulačných kláp na dymových kanáloch koksárenskej batérie a meniť pomer spaľovací vzduch – plyn. Programová realizácia navrhnutého riadiaceho systému je prostredníctvom rozhrania DDE (Dynamic Data Exchange) integrovaná do už existujúceho riadiaceho systému koksárenskej batérie. Prostredníctvom tohto rozhrania sa existujúcemu riadiacemu systému posielajú požiadavky na zmenu ťahu (Kačur, 2004). V praxi bola overená programová realizácia riadiaceho systému, ktorý bol aplikovaný na strojnú stranu bloku C.

Úroveň stabilizácie – priame číslicové riadenie

Základom stabilizačnej úrovne je programová realizácia diskrétného matematického regulátora. Najprv bol navrhnutý spojité regulátor, ktorý bol potom prepočítaný na jeho diskrétny tvar. Regulovanou sústavou je v tomto prípade oxid uhľohľatý, ktorého obsah v spalinách závisí od podtlaku spalín, teda ťahu, ktorým sú spaliny odťahované. Zmenou ťahu spalín sa zmení aj množstvo nasávaného vzduchu do vykurovacích kanálikov, čo ovplyvňuje priebeh chemickej reakcie pri spaľovaní. Zmenou ťahu, resp. požiadavkou na zmenu ťahu docielime privretie alebo zavretie regulačnej klapy, pričom percento jej otvorenia je možné monitorovať v spätnej väzbe, rovnako tak aj skutočný ťah spalín. Úloha stabilizácie CO v spalinách sa tak dá presnejšie definovať ako úloha nájdenia požadovaného ťahu pred regulačnými klapami. Prostredníctvom jednej klapy sa riadi odťah spalín z 33 koksárenských pecí na jednej strane daného bloku batérie. Pre automatickú reguláciu ťahu spalín na koksárenskej batérii je celkovo k dispozícii 6 kláp, t.j. dve pre každý blok. Cieľom návrhu diskrétného regulačného obvodu bol návrh takých parametrov regulátora, ktoré

zabezpečia, že regulovaná veličina bude sledovať čo najpresnejšie a najrýchlejšie zmeny žiadanej veličiny a vplyv poruchových veličín bude potlačený v čo najväčšej miere (Kačur, 2004).

Návrh diskrétného regulátora

Pri návrhu štruktúry a výpočtu parametrov regulátora potrebujeme poznať vlastnosti regulovaného procesu charakterizované napr. vstupno-výstupnými meraniami realizovanými off-line spôsobom (priebežné merania vstupov a výstupov, merania odoziev na normovaný vstup). Pre identifikáciu regulovaného systému bolo vykonaných niekoľko experimentov na prevádzke koksárenskej batérie. Pomocou informačného systému koksárenskej batérie bolo možné priamo v prevádzke vykonať experimenty s regulovaným podtlakom a celý priebeh experimentu zaznamenávať. Experimenty boli vykonané tak, že v čase ustálenia regulovanej veličiny, t.j. v čase, keď bola hodnota CO na strojnej strane bloku C približne ustálená, bola zadaná požiadavka na skokovú zmenu ťahu. Po určitom čase sa oxid uhoľnatý ustálil na novej hodnote. Zo záznamu meraných veličín (ťah a odozva CO) bolo potom možné vykonať deterministickú identifikáciu regulovaného systému. Identifikáciu sústavy bolo nutné vykonať pre dva stavy bloku C, a to počas tlačenia koksu a v čase, keď tlačenie neprebiehало. Identifikácia bola realizovaná metódou V. Strejca (Strejc, 1958), a to za predpokladu, že sústava, ktorú aproximujeme je statická, zložená z jednodukapacitných článkov zapojených za sebou, časové konštanty jednotlivých článkov sú približne rovnako veľké a korene charakteristickej rovnice sú reálne a záporné. Z identifikácie boli získané tieto modely regulovanej sústavy v tvare diferenciálnej rovnice:

- pre stav počas tlačenia

$$212,28 y''(t) + 29,14 y'(t) + y(t) = 0,0014 u(t - 30), \quad (1)$$

- - pre stav bez tlačenia

$$114,7 y''(t) + 21,4 y'(t) + y(t) = 0,00087 u(t - 30). \quad (2)$$

Diferenciálne rovnice (1) a (2) predstavujú matematické modely regulovanej sústavy v implicitnom tvare, kde $y(t)$ je regulovaná veličina v čase t a $u(t-30)$ je akčná veličina s dopravným oneskorením $t_d = 30$ s. Pre návrh diskrétného regulátora bolo potrebné vypočítať počiatočný odhad parametrov spojitého regulátora. Spojitý PID regulátor (3) vyjadruje dynamickú realizáciu medzi výstupnou veličinou z regulátora $u(t)$ a regulačnou odchýlkou $e(t)$:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (3)$$

kde

- $u(t)$ - akčná veličina v čase t ,
- $e(t)$ - regulačná odchýlka v čase t ,
- K_p - proporcionálne zosilnenie,
- T_I - integračná konštanta,
- T_D - derivačná konštanta,
- τ - čas.

V prípade regulátora PID bolo potrebné vypočítať neznáme parametre K_p , T_I , T_D a tieto potom prepočítať na parametre diskrétného regulátora q_0 , q_1 a q_2 (4). V prípade regulátora PI sú hľadané parametre K_p , T_D a po prepočte na diskrétny tvar parametre q_0 a q_1 (5). Pre určenie počiatočných parametrov bola použitá Ziegler-Nicholsova metóda (Dorčák a kol., 2002). Počiatočný odhad regulátora bolo potrebné stanoviť pre dva uvažované stavy koksárenskej batérie, a to stav, keď sa z bloku C tlačil koks, a stav keď sa z neho koks netlačil. Pre výpočet parametrov regulátora boli použité parametre regulovanej sústavy (doba prietahu, doba nábehu, doba prechodu), ktoré boli získané z identifikácie a simulačného zapojenia regulátora s daným modelom regulovanej sústavy. Na programovú realizáciu priameho číslicového riadenia bolo nutné použiť diskrétny tvar regulátora (1). Z hľadiska realizácie akčného zásahu bolo potrebné použiť taký tvar diskrétného regulátora ktorý by umožňoval priebežný výpočet prírastkov akčnej veličiny (ťahu spalín) a nie iba jednorázovú polohovú zmenu akčnej veličiny. Preto bol použitý rýchlostný tvar diskrétného PID regulátora v tvare (Bobál a kol., 1999):

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_p \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_0}{T_I} e(k-1) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1) - e(k-1) - e(k-2)] \right] = \\ & K_p \left[\left(1 + \frac{T_D}{T_0} \right) e(k) + \left(-1 + \frac{T_0}{T_I} - 2 \frac{T_D}{T_0} \right) e(k-1) + \frac{T_D}{T_0} e(k-2) \right] = \\ & = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

kde

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $u(k)$ - akčná veličina v časovom kroku k ,
- $u(k-1)$ - akčná veličina v časovom kroku $(k-1)$,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- $e(k-2)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-2)$,
- K_p - proporcionálne zosilnenie, T_I je integračná konštanta,
- T_D - derivačná konštanta, k je časový krok,
- T_0 - perióda vzorkovania,
- q_0, q_1, q_2 - substitúciou zavedené parametre diskretného proporcionálneho sumačno-derivačného PSD regulátora.

Vzhľadom na to, že pri diskretizácii jednotlivých častí rovnice spojitého regulátora bola použitá obdĺžniková metóda (integrál bol nahradený sumou, derivácia diferenciou a spojitý priebeh $e(t)$ bol aproximovaný obdĺžnikmi), regulátor (4) potom predstavuje rýchlostnú formu PSD regulátora. Vzhľadom na to, že pre reguláciu tlaku plynov sú vhodnejšie regulátory PI a pri menších nárokoch na presnosť je vhodný i samotný regulátor I, v praxi bola overená realizácia diskretného proporcionálneho sumačného PS regulátora v nasledujúcom tvare (Kačur, 2004):

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p e(k) - K_p \left(1 - \frac{T_0}{T_I} \right) e(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) \quad , \quad (5)$$

kde

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $u(k)$ - akčná veličina v časovom kroku k ,
- $u(k-1)$ - akčná veličina v časovom kroku $(k-1)$,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- K_p - proporcionálne zosilnenie,
- T_I - integračná konštanta, k je časový krok,
- T_0 - perióda vzorkovania,
- q_0, q_1 - substitúciou zavedené parametre diskretného PS regulátora.

V oboch typoch regulátorov je vstupnou veličinou regulačná odchýlka $e(k)$. V prípade konkrétnej úlohy stabilizácie obsahu CO sa táto odchýlka vypočítava ako rozdiel medzi žiadanou $w(k)$ a nameranou $y(k)$ hodnotou CO. Keďže perióda vzorkovania T_0 býva jedným z parametrov regulátora, často sa používa čo najkratšia. Potom môžeme tieto číslicové PI a PID regulátory považovať v podstate za spojité regulátory. Skracovaním periódy vzorkovania T_0 sa všeobecne zlepšuje kvalita regulácie, schopnosť reagovať na poruchy a diskretný číslicový regulátor sa blíži spojitému regulátoru. Skracovaním periódy vzorkovania však vzrastá namáhanie pohonu (s periódou T_0 sa generujú skokové zmeny akčnej veličiny) a obvykle vzrastá energia dodávaná do sústavy. Podľa odporúčania (Bobál a kol. 1999) je pre regulované sústavy s dopravným oneskorením t_d pre výpočet periódy vzorkovania T_0 vhodné použiť vzťah (6). Dosadením za $t_d = 30$ s potom dostávame nasledujúci interval:

$$T_0 = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{16} \right) t_d = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{16} \right) 30 = 2 \div 7,5 \text{ s} \quad , \quad (6)$$

Z vypočítaného intervalu bola vybraná horná hranica, zaokrúhlená na $T_0 = 8$ s. Dôležitým kritériom pri voľbe periódy vzorkovania je, aby akčný zásah bol fyzikálne realizovateľný, tzn. v rozmedzí 100 – 450 Pa. Pre zostavenie algoritmu priameho číslicového riadenia je potrebné urobiť prepočet na diskretné parametre. Prepočet bol vykonaný podľa vzťahov (4) a (5), v ktorých sú substitúciou zavedené parametre q_0, q_1 , a q_2 .

Model diskretného PS regulátora s počiatočným odhadom parametrov pre riadenie, keď sa z bloku C netlačí koks je nasledovný:

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) = 0,1944e(k) - 0,0906e(k-1), \quad (7)$$

pričom

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- q_0, q_1 - substitúciou zavedené parametre diskretného PS regulátora.

Model diskretného PSD regulátora s počiatočným odhadom parametrov pre riadenie, keď sa z bloku C netlačí koks:

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) = 0,3042e(k) - 0,1441e(k-1) + 0,06421e(k-2), \quad (8)$$

kde

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- $e(k-2)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-2)$,
- q_0, q_1, q_2 - substitúciou zavedené parametre diskretného PSD regulátora.

Model diskretného PS regulátora s počiatočným odhadom parametrov pre riadenie, keď sa z bloku C tlačí koks:

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) = 0,1728e(k) - 0,0738e(k-1), \quad (9)$$

kde

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- q_0, q_1 - substitúciou zavedené parametre diskretného PS regulátora.

Model diskretného PSD regulátora s počiatočným odhadom parametrov pre riadenie, keď sa z bloku C tlačí koks:

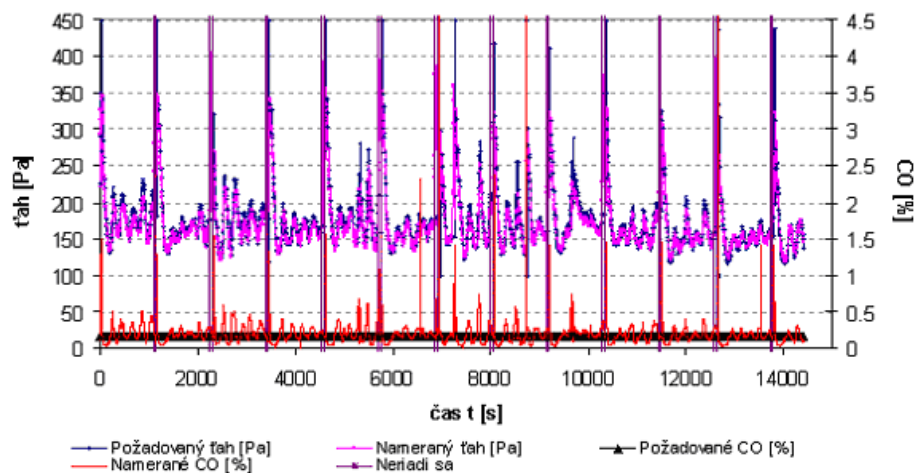
$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) = 0,3372e(k) - 0,1337e(k-1) + 0,0673e(k-2), \quad (10)$$

kde

- $\Delta u(k)$ - prírastok akčnej veličiny v časovom kroku k ,
- $e(k)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku k ,
- $e(k-1)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-1)$,
- $e(k-2)$ - regulačná odchýlka v časovom kroku $(k-2)$,
- q_0, q_1, q_2 - substitúciou zavedené parametre diskretného PSD regulátora.

Obr. 3. Záznam riadenia s navrhnutým PS regulátorom, keď sa z bloku C netlačil koks počas 4 hodín.

Fig. 3. Record of the control with a designed PS regulator when the block C was not pushed during 4 hours.

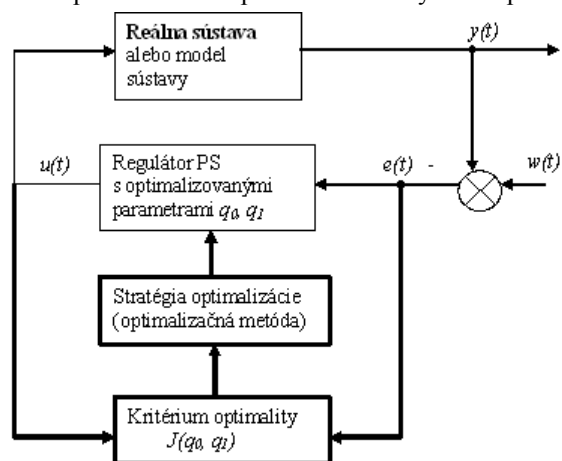


Navrhnutý programový riadiaci systém obsahuje algoritmus PS aj PSD regulátora. V praxi bolo vyskúšané riadenie s PS regulátorom v rôznych podmienkach. Vyskúšané bolo riadenie s rôznymi požadovanými hodnotami CO. Tiež bolo vyskúšané riadenie s inou periódou vzorkovania. Na obr. 3 je záznam priebehu riadenia v dĺžke 4 hodín v čase, keď sa z bloku C netlačil koks. V oboch prípadoch bola požadovaná hodnota $CO = 0,16\%$ a riadenie prebiehalo so vzorkovacou periódou $T_0 = 8$ s.

Z praktických experimentov vyplynulo, že lepšia kvalita regulácie bola dosiahnutá v čase, keď tlačenie koksu na bloku C neprebíhalo. Zhoršená kvalita regulácie počas tlačenia koksu je spôsobená častými poruchami na regulovanej veličine (CO), čo je zapríčinené tým, že cez praskliny v ohrevovej stene vniká do spaľovacej komory uvoľňujúci sa koksárenský plyn z koksovacieho komôr.

Optimalizácia riadenia

Aby riadenie technologického procesu bolo optimálne, potom riadiaci systém musí obsahovať optimalizačnú úroveň. Vo väčšine riadiacich systémoch technologických procesov je realizovaná len stabilizačná úroveň, ktorá zabezpečuje reguláciu procesu podľa žiadanej hodnoty. Práve úlohou optimalizačnej úrovne je určiť optimálne riadiace veličiny. Na obr. 4 je znázornená štruktúra riadenia s optimalizáciou. Dôvodom pre adaptáciu sú predovšetkým zmeny technologického objektu počas jeho životnosti. Pri návrhu úrovne optimálneho riadenia môžeme vychádzať z dynamického programovania. Podstata adaptácie spočíva v postupnom optimalizovaní parametrov v algoritmoch priameho číslicového riadenia. Na obrázku je $u(t)$ výstup z regulátora [Pa], $e(t)$ je regulačná odchýlka [%], $y(t)$ je merané CO [%], ktoré stabilizujeme na požadovanej hodnote $w(t)$. V tomto optimalizačnom procese bola s výhodou použitá diskretná optimalizačná metóda. Diskrétné optimalizačné metódy pre spustenie optimalizačnej procedúry vyžadujú buď počiatočný odhad optimalizovaných premenných alebo definovanie intervalu oblasti, v ktorom sa optimalizované premenné nachádzajú. Pri riešení tohto kroku sa postupovalo tak, že bol najprv určený počiatočný odhad parametrov diskretného regulátora a tieto boli algoritmom optimalizačnej metódy priebežne optimalizované.



Obr. 4. Optimalizácia parametrov PS regulátora.
Fig. 4. Optimization of the PS regulator parameters.

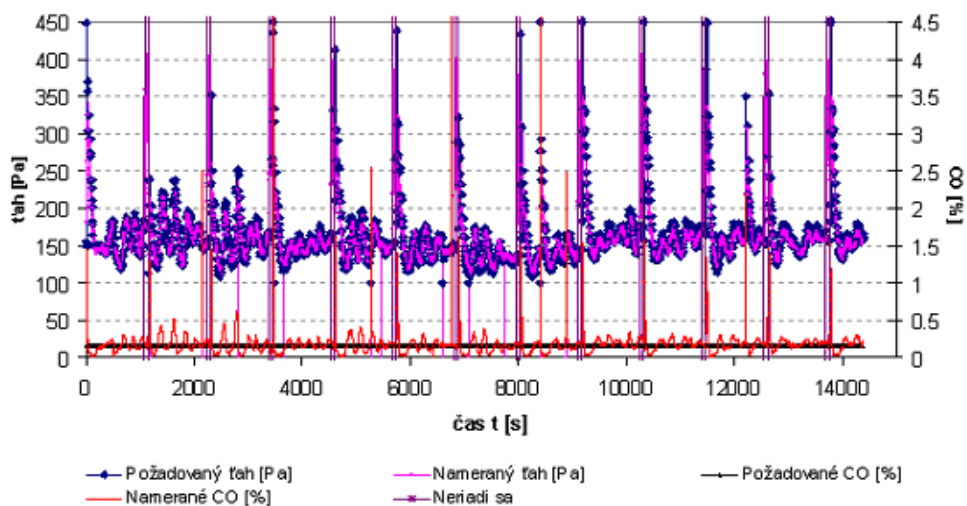
Na kvalitu regulačných pochodov sú v praxi kladené určité požiadavky a obmedzenia, ktoré môžu byť často aj protichodné. Odvodzujú sa od požiadaviek, ktoré sú kladené na regulovaný systém. V danom prípade spomenieme iba technické obmedzenia súvisiace s implementáciou navrhnutého riadiaceho systému do existujúceho riadiaceho systému koksárenskej batérie, ktoré sa museli prekonať v počiatočných fázach programového riešenia. Až po vyriešení tohto problému sa môžeme zaoberať kvalitou regulačných pochodov. V technickej praxi sa kvalita regulácie posudzuje podľa priebehu regulačných pochodov, využívajúc nepriame kritériá. Kvalitu regulačných pochodov je možné tiež vyjadriť kvantitatívne, vhodným matematickým kritériom. V spojitých systémoch sa používajú integrálne kritériá. Keďže cieľom bolo minimalizovať odchýlky CO od žiadanej hodnoty (minimalizovať regulačnú plochu), bolo v algoritmoch priameho číslicového riadenia použité kvadratické kritérium (Kostúr, 1998):

$$\text{Minimalizovať} \quad J = \int_{\tau} e^2(\tau) d\tau . \quad (11)$$

Pre zabezpečenie priebežnej optimalizácie parametrov diskretného regulátora je potrebné vybrať vhodný algoritmus viacrozmernej optimalizácie. Keďže táto úloha nemá príliš veľa obmedzujúcich podmienok, zvolená bola relaxačná metóda, tzv. Proboho algoritmus (Kostúr, 1991). Táto metóda je vhodná maximálne pre štvorrozmerné problémy. Algoritmus optimalizácie s priebežnou modifikáciou parametrov regulátora postupne hľadá najmenšiu hodnotu funkcionálu J . Funkcionál sa vypočíta vždy po rovnakom časovom úseku riadenia podľa vzťahu (11). Algoritmus bol prispôbosený na priebežnú optimalizáciu parametrov PS a PSD regulátora. V programovej realizácii algoritmu optimalizácie sa riadenie regulátorom „spúšťa“ len na presne určenú dobu. Po tejto dobe sa riadenie zastaví, aby sa mohlo vypočítať integrálne kritérium a za účelom optimalizácie vykonať ďalšia modifikácia parametrov. V programovej realizácii navrhnutého riadiaceho systému sa riadenie automaticky priebežne vypínalo vždy vtedy, keď na bloku C dochádzalo ku zmene,

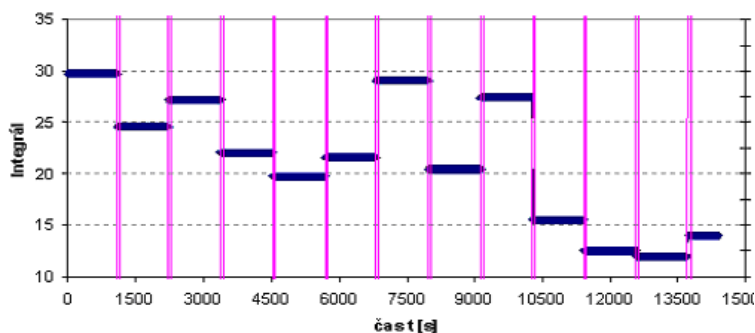
čo je v podstate striedanie vykurovacích periód a reverzácia plynových a vzduchových regenerátorov, ktorú zabezpečuje samostatný technologický celok. Riadenie je vhodné vypínať počas menenia aj z iného dôvodu. Počas zmeny na danom bloku dochádza k extrémnemu zvýšeniu meraných veličín (ťah, CO, O₂). Tento jav je zapríčinený vzduchotesným uzatváraním spalínového ventilu pre odvod spalín. V tom čase by požiadavka na zmenu ťahu bola neúčinná. Riadenie s optimalizáciou bolo realizované s diskretným PS regulátorom na požadovanú hodnotu CO = 0,16 % (obr. 5), a 0,25 % s periódou vzorkovania $T_0 = 8$ s a $T_0 = 15$ s. Tu je prezentovaný len priebeh riadenia na požadovanú hodnotu CO = 0,16 % s periódou vzorkovania $T_0 = 8$ s. Riadenie bolo vykonané v čase, keď sa z bloku C netlačil koks (obr. 5) a v čase, keď sa z bloku C tlačil koks. V obidvoch prípadoch bolo riadenie nepretržite spustené 4 hodiny (Kačur, 2004).

Obr. 5. Záznam riadenia s priebežnou optimalizáciou v čase, keď sa z bloku C netlačil koks, počas 4 hodín.
Fig. 5. Record of the control with a continuous optimization when coke from the block C was not pushed during four hours.

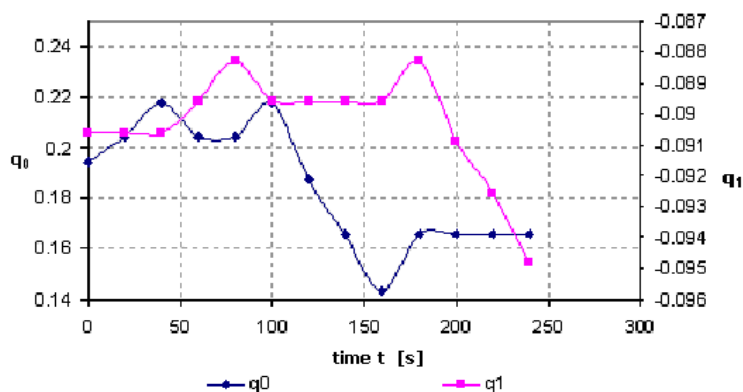


Riadenie vykonával navrhnutý programový systém, ktorý riadiace požiadavky vysielal programu pre riadenie vykurovania. Na obr. 6 sú zobrazené časové priebehy hodnôt integrálneho kritéria tak, ako sa priebežne vypočítavali pri riadení s optimalizáciou. Z grafov je badateľný klesajúci trend integrálneho kritéria, čo svedčí o postupnom zlepšovaní riadenia. Priebežné zlepšovanie riadenia je dôkazom samoučenia sa navrhnutého riadiaceho systému. Programový riadiaci systém zabezpečuje výpočet hodnôt integrálneho kritéria aj pri riadení bez optimalizácie.

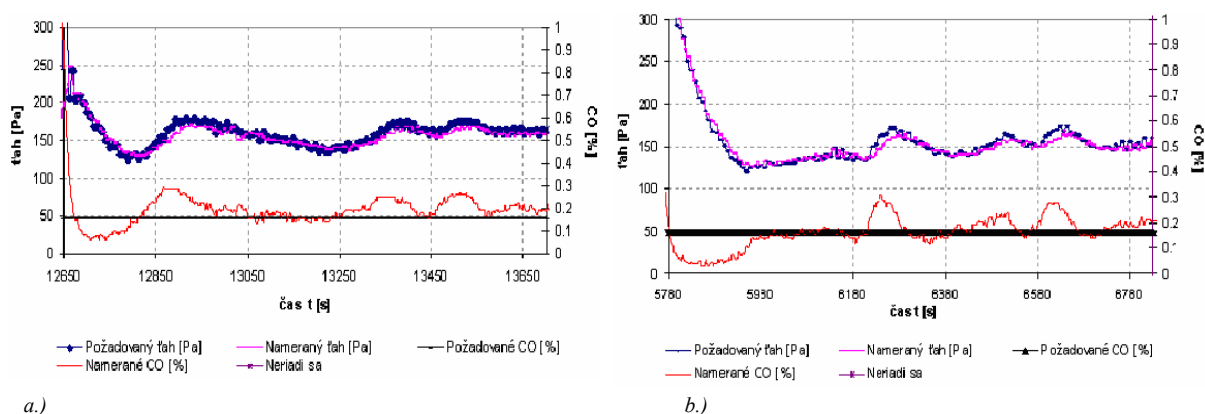
Obr. 6. Časový priebeh hodnôt integrálneho kritéria pri riadení s optimalizáciou v čase, keď sa z bloku C netlačil koks.
Fig. 6. Time course of the integral criterion values during the control with a optimization in a time when coke from the block C was not pushed.



Obr. 7. Časový priebeh optimalizovaných parametrov pri riadení v čase, keď sa z bloku C netlačil koks.
Fig. 7. Time course of the optimized parameters during the control when coke from the block C was not pushed.



Z obr. 7 je badaateľná konvergencia optimalizovaných parametrov q_0 a q_1 k ich optimu. Prípádne kolísanie hodnôt integrálneho kritéria na obr. 7 mohlo byť zapríčinené príliš veľkým krokom zmeny h optimalizovaného parametra, alebo tiež spôsobené náhodnými extrémnymi hodnotami CO, ktoré boli počas procesu riadenia zaznamenané, a ktoré vniesli svoju hodnotu do vyhodnotenia integrálneho kritéria. Aj v prípade riadenia s priebežnou optimalizáciou boli dosiahnuté uspokojivé a aj menej uspokojivé výsledky. Hodnotenie kvality regulácie aj v tomto prípade bolo posúdené podľa hodnôt celkového integrálu regulačných odchýlok. Integrál bol vyhodnotený zo štvorhodinového záznamu regulačných odchýlok, zaznamenaných počas riadenia. Pri riadení počas tlačenia koksu na bloku C je pozorovateľné väčšie kolísanie CO, a teda častejšie poruchy na regulovanej veličine. Celkový integrál regulačných odchýlok tu dosiahol hodnotu 419. Počas priebežnej optimalizácie parametrov regulátora sa však kvalita regulácie postupne zlepšovala. Celkový integrál regulačných odchýlok pri riadení v čase, keď tlačenie koksu neprebiehala, dosiahol hodnotu 327, čo je pri porovnaní s integrálom pri riadení počas tlačenia koksu nižšia hodnota. Na obr. 8 je zväčšený pohľad na priebeh riadenia počas 20 minút ($T_0 = 8$ s, požadované CO = 0,16 %). Tento časový úsek je daný intervalom zmeny regenerátorov na danom bloku.



Obr. 8. a.) Časový priebeh riadenia počas 20 minút po štyroch hodinách optimalizácie (z bloku C sa netlačil koks),
b.) Časový priebeh riadenia počas 20 minút po štyroch hodinách optimalizácie (z bloku C sa tlačil koks).

Fig. 8. a.) Time course of the control during 20 minutes after four hours of optimization (coke from block C was not pushed),
b.) Time course of the control during 20 minutes after four hours of optimization (coke from block C was pushed).

Na záver tejto kapitoly môžeme povedať že pri riadení s priebežnou optimalizáciou boli dosiahnuté celkovo lepšie výsledky o čom svedčí menšia hodnota celkového integrálu regulačných odchýlok (s optimalizáciou a počas tlačenia koksu 419, bez optimalizácie a počas tlačenia koksu 636). Tak isto lepšie výsledky boli dosiahnuté pri riadení na nižšiu požadovanú hodnotu 0,16 CO % (v porovnaní s riadením na 0,25 % CO). Tab. 1 prehľadne zobrazuje dosiahnuté výsledky pri viacerých riadeniach na bloku C. Kvalita regulácie tu bola vždy posudzovaná podľa kvadratického kritéria, ktoré bolo vypočítané ako celkový integrál regulačných odchýlok. Pri praktickom použití algoritmu priebežnej optimalizácie však naďalej zostáva otázkou správna voľba počiatkových krokov optimalizácie h .

Tab. 1. Prehľad kvality regulácie podľa kvadratickej plochy.

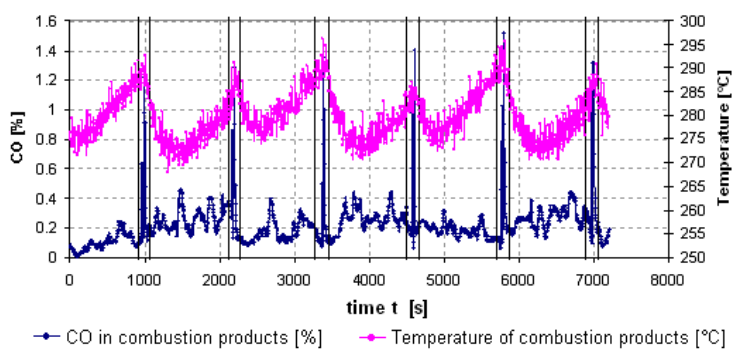
Tab. 1. Overview of the quality regulation by the quadratic area.

T_0 [s]	Spôsob riadenia	Požad. CO [%]	Stav na bloku C	Kvadr. plocha
8	bez opt.	0,16	Tlačí sa	636
8	s optim.	0,16	Tlačí sa	419
8	bez opt.	0,16	Netlačí sa	571
8	s optim.	0,16	Netlačí sa	327
8	bez opt.	0,25	Tlačí sa	1919
8	s optim.	0,25	Tlačí sa	1732
8	bez opt.	0,25	Netlačí sa	1573
8	s optim.	0,25	Netlačí sa	1459
15	bez opt.	0,25	Netlačí sa	1228
15	s optim.	0,25	Netlačí sa	834

Optimalizácia požadovanej hodnoty

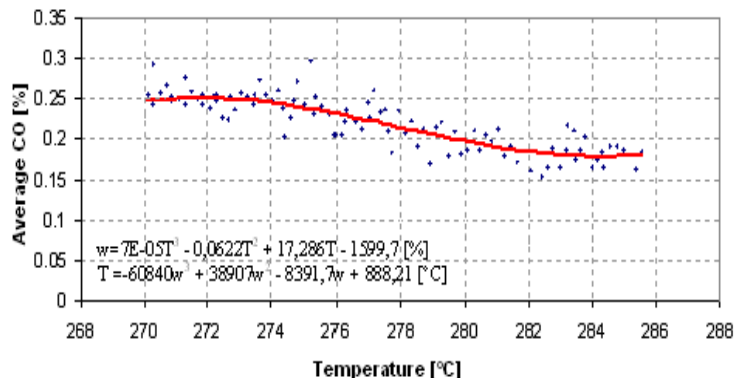
Stabilizácia CO v odťahovaných spalinách je založená na princípe, že zvýšením ťahu spalín obsah CO v spalinách klesá a znížením ťahu spalín CO stúpa. Tento jav je spôsobený zmenou množstva nasávaného vzduchu do vykurovacích kanálikov. V prípade zvýšenia množstva nasávaného vzduchu sa do vykurovacích kanálikov dostáva viac vzduchu, a tým aj viac kyslíka, ktorý je v atmosférickom vzduchu obsiahnutý. Pri riadení na menšiu požadovanú hodnotu CO v spalinách, riadiaci systém musí zabezpečiť väčší ťah spalín, čo v konečnom dôsledku predstavuje aj viac nasávaného vzduchu cez vzduchovú kolenovú skriňu. Viac vzduchu v zmesi vzduch - plyn vo vykurovacích kanálikoch spôsobí, že pri spaľovaní tejto zmesi sa dosahujú vyššie teploty spalín. Riadením na nižšiu úroveň CO tak v konečnom dôsledku zabezpečíme vyššiu teplotu spalín. Opačne je to pri riadení na vyššiu úroveň CO, kedy pre dosiahnutie tejto úrovne potrebujeme ťahom spalín nasávať menej vzduchu a spaliny potom majú nižšiu teplotu. Uvedenú teoreticky popísanú závislosť bolo treba analýzou zložiek spalín CO, O₂ a teploty spalín dokázať. Úlohou bolo teda nájsť také množstvo CO a O₂, pri ktorom bola teplota spalín najvyššia. Nájdené hodnoty by boli potom považované za optimálne a aplikované v procese riadenia. Na obr. 9 je zobrazený časový priebeh meraného CO a meranej teploty spalín počas 4 hodín počas tlačenia koksu z bloku C. Z tohto časového úseku boli odfiltrované stavy, počas ktorých prebiehalo menenie. Tieto stavy sú reprezentované extrémnymi hodnotami CO, O₂ a teploty spalín. Extrémne stavy sú dané technológiou koksárenskej batérie a aj z obrázka je vidieť ich pravidelné opakovanie. Rovnako bol interpretovaný aj priebeh nameraného percentuálneho množstva O₂ a teploty spalín.

Obr. 9. Časový priebeh percentuálneho množstva CO a teploty s vymedzenými časovými úsekmi, počas ktorých prebiehalo menenie.
Fig. 9. Time course of percentage value of CO and temperature with defined time intervals, during their alternating.



Z časového priebehu teploty, CO a O₂ boli vylúčené hodnoty týkajúce sa menenia plus pol minúty po a pred menením. Graf na obr. 9 ukazuje aj úseky, ktoré boli z časového priebehu vylúčené. Pre nájdenie optimálnych hodnôt CO a O₂ boli vytvorené závislosti týchto veličín na teplote spalín, s výstižným trendom (obr. 10).

Obr. 10. Závislosť CO na teplote spalín počas tlačenia.
Fig. 10. Dependency of CO on the temperature of combustion products during the pushing.



Závislosť veličín bola popísaná vhodným regresným modelom. Regresný model bol určený klasickou metódou regresnej analýzy pre filtrovanú závislosť veličín a pre filtrovanú závislosť vyjadrenú v priemerných hodnotách. Podobne boli spracované aj závislosti medzi O₂ a teplotou a medzi pomerom CO/O₂ a teplotou. Algoritmom pre hľadanie lokálneho extrému regresného modelu boli určené maximálne teploty spalín a odpovedajúce hodnoty CO, O₂, CO/O₂, ktoré boli považované za optimálne. Tieto optimálne hodnoty bolo treba znova určiť pre dva stavy bloku C, a to počas tlačenia koksu a pre stav, keď sa netlačil. Vyhodnotenie pre dva možné stavy bloku C vyplýva z toho, že počas tlačenia koksu sú teploty na bloku nižšie, čo je spôsobené sypaním studeného uhlia do koksárenských komôr. Z výsledkov regresnej analýzy vyplynulo, že pri maximálnej teplote 287 °C bude percentuálny obsah CO v spalinách 0,15 %. Pre riadenie to potom znamená, že pri dosiahnutí tejto úrovne CO by mal byť obsah kyslíka v spalinách 4,06 % a dosahované teploty budú 287 °C a vyššie (Kačur 2004).

Záver

V článku je popísaný a zhrnutý celý postup návrhu systému riadenia koksárenskej batérie na úrovni stabilizácie oxidu uhoľnatého. Jadrom riadiaceho systému je algoritmus priamej číslicovej regulácie s priebežnou optimalizáciou parametrov diskretného regulátora. Technické prepojenie medzi algoritmom riadenia a riadeným objektom je tvorené vlastným programovým riešením riadiaceho systému a informačným systémom koksárenskej batérie. Súčasťou celkového návrhu riadiaceho systému je aj stanovenie optimálnej požadovanej hodnoty oxidu uhoľnatého (CO), ako regulovanej veličiny. V návrhu bola hľadaná taká úroveň CO, pri ktorej bola teplota spalín najvyššia. Stabilizácia obsahu CO v spalinách na požadovanú hodnotu prináša zlepšenie aj z ekologického hľadiska, pretože CO je jedným z najprudších jedov pôsobiacich na ľudský organizmus. Navrhnutý riadiaci systém pre strojnú stranu bloku C bol aj overený. Popísaným postupom je možné analogicky navrhnuť riadenie stabilizačnej úrovne aj pre bloky A a B. Navrhnutý programový riadiaci systém tak zostal otvorený, pre prípad požiadavky na riešenie stabilizácie aj na týchto blokoch.

Článok vznikol v súvislosti s riešením projektu aplikovaného výskumu č. 4/0016/05 Ministerstva školstva Slovenskej republiky a v súvislosti s riešením grantových projektov VEGA č. 1/2179/05 a VEGA č. 1/3346/06 riešených na Fakulte BERG TU v Košiciach.

Literatúra - References

- Kačur, J.: Systém riadenia VKB3 na úrovni stabilizácie, *Diplomová práca, Fakulta BERG, TU Košice, 2004.*
Kostúr, K.: Optimalizácia priemyselných pecí s využitím modelov, *Monografia, TU Košice, 1998, ISBN 80-7099-326-X.*
Dorčák, L., Terpák, J., Dorčáková, F.: Teória automatického riadenia: Spojité lineárne systémy, *ES/AMS, Fakulta BERG TU Košice, 2002, ISBN 80-8073-025-3.*
Bobál, V., Bohm, J., Prokop, R.: Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace, *VUTIUM Brno, 1999, ISBN 80-214-1299-2.*
Kostúr, K.: Optimalizácia procesov, *Edičné stredisko, TU Košice, 1999, ISBN 80-7099-070-8.*
Strejc, V.: O možnostech vyššího využití teorie regulace v praxi. *Práce, Praha, 1958.*