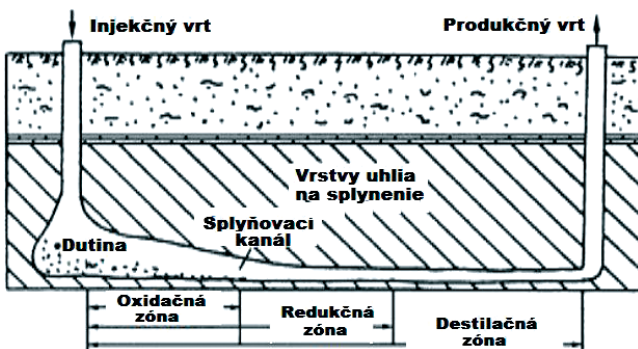


# Automatizovaný systém riadenia podzemného splyňovania uhlia v laboratórnych podmienkach

## Úvod

Technológia podzemného splynovania uhlia (UCG – Uderground Coal Gasification) sa stále vyvíja a poskytuje alternatívu konvenčného podzemného dobývania uhlia. Táto technológia je oproti nemu menej nákladná. Pri priemyselnom splynovaní treba vybudovať sústavu vrtov – minimálne jeden injekčný a jeden produkčný vrt (obr. 1) – a systém na čistenie a uskladňovanie vyrobeného plynu. Potrebne sú aj zariadenia na transformáciu plynu (tzv. syngasu) na požadovanú formu energie (palivo, elektrina) a systémy na automatické riadenie procesu splynovania. Tento článok prezentuje realizovaný systém automatizovaného riadenia splynovania postavený na báze PLC a PC s monitorovacím systémom. Riadiaci a monitorovací systém sa overil na experimentálnom laboratórnom splynovacom zariadení, ktoré sa na našom pracovisku skonštruovalo v rámci projektu APVV-0582-06.

Cieľom procesu splynovania je vygenerovať z uhlia čo najviac plynu s maximálnou výhrevnosťou. K dosiahnutiu tohto cieľa vedie cesta založená na algoritmoch riadenia vstupných oksylichovadiel a odtahu vyrobeného plynu. Na zloženie vyrobeného plynu má vplyv geológia ložiska (hĺbka uhoľného sloja, jeho typ, šírka a výška), a parametre splynovania (množstvo a typ oksylichovadla, prevádzkový tlak). Syngas sa môže vyrábať použitím viacerých oksylichovadiel (napr. vzduchu, zmesi vzduchu s kyslíkom, zmesi kyslíka a pary).



Obr.1 Princíp procesu podzemného splynovania uhlia a rozdelenie na reakčné zóny

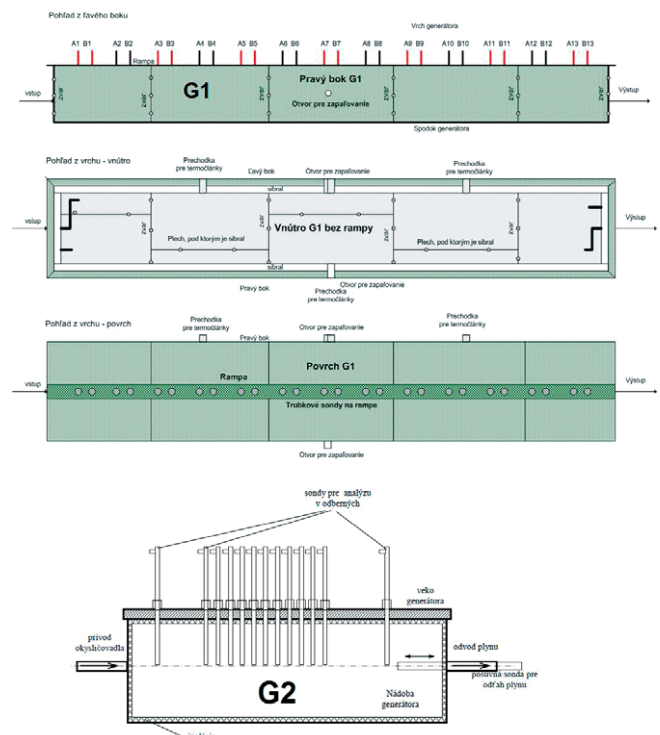
## 1. Experimentálne splynovacie zariadenie

Na overenie technológie splynovania uhlia v podzemí je nevyhnutné vyskúšať celý systém splynovania v laboratórnych podmienkach. Na to sa zhotovujú experimentálne zariadenia, ktoré simulujú reálne podzemné ložisko. Na našom pracovisku sa skonštruovali dva splynovacie generátory (obr. 2), jeden v tvare viacdielnej ocelevej nádoby (označený ako G1) a druhý s odnímateľným vrchom (označený ako G2). Generátor G1 má tvar veľkej ocelevej nádoby s dĺžkou 5 m, pričom na jeho vrchnej strane je otváracie veko zložené z niekoľkých dielov. Generátor G2 má tvar zrezaného valca s dĺžkou 3 m a umožňuje zasúvanie ocelových rúrkových sond s termočlánkami. Generátor G2 má kompaktné, jednodielne veko, pričom na jeho zdvihnutie treba použiť elektrické zdvíhacie zariadenie. Generátory boli navrhnuté ako fyzikálne modely podzemného splynovania, pričom uloženie hornín (uhlie, nadložie a podložie) v generátore má simulovať reálne podzemné ložisko. Simulovanie podzemného splynovania v zostrojenom generátore

je založené na princípe riadeného prívodu vzduchu do horiaceho uhoľného ložiska a odtahu vzniknutého plynu. Predpokladá sa však adekvátne uloženie hornín nadložie, podložie a uhlia tak, aby vzduch prechádzal celým ložiskom. Cieľom experimentov so splynovaním bolo vyrobiť, čo najväčšie množstvo plynu syngas s čo najvyššou výhrevnosťou. Pri jednotlivých experimentoch sa do generátora ukládalo uhlie rôznym spôsobom. Niekedy sa použilo rozdrvené uhlie, inokedy bloky uhlia. Pre lepší priebeh procesu sa stredom modelu urobil kanál. Vyskúšali sa tiež experimenty s dvoma kanálmi a experimenty s kanálom vyvráteným v blokoch uhlia [1].

## Zariadenia na meranie a reguláciu

Súčasťou splynovacích generátorov sú aj zariadenia na meranie a reguláciu. Do generátora (G1 alebo G2) sa vháňa vzduch z tlakovej nádoby. Vzduch do nádoby tlačia dva kompresory, ktoré sa spúšťajú súčasne. Prietok vzduchu sa ovláda servoventilom a meria pomocou clony a snímača diferenčného tlaku. Na potrubiach na vháňanie vzduchu sú umiestnené snímače tlaku. Vzduch sa v prípade potreby zmiešava s technickým kyslíkom v zmiešavacej komore. Prietok kyslíka sa meria samostatným prietokomerom. Vháňaný vzduch alebo zmes vzduchu s kyslíkom prechádza modelom uloženého ložiska, kde sa zúčastňuje na procese splynovania. Z generátora potom vychádza syntézny plyn, ktorý ventilátor odtahuje do spalovacej komory a komína. Na výstupe z generátora sú odberné miesta na vypúšťanie dechtu a miesta na kontinuálne odsávanie plynu do analyzátora. Analyzátor naraz vyhodnocuje päť zložiek vo vyrobenom plyne: koncentráciu CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, a O<sub>2</sub>. Druhý pomocný analyzátor vyhodnocuje koncentráciu H<sub>2</sub>. Jedno odberné miesto je určené pre kalorimeter, ktorý na základe spalného



Obr.2 Experimentálne splynovacie zariadenia – generátory G1 a G2

tepla vypočíta výhrevnosť vyrobeného plynu. Pri našich experimentoch sa výhrevnosť počítala z nameraného zloženia vyrobeného plynu. Na meranie prietoku plynu sa rovnako ako na vstupe používala clona a snímač diferenčného tlaku. Na sledovanie teplôt počas splynovania sa do modelu uholného sloja vložili termočlánky do rôznej hĺbky. Termočlánky sa na ich lepšiu ochranu umiestňovali do keramických rúrok. Všetky zariadenia merania a regulácie boli napojené na PLC, ktorý bol spolu s frekvenčným meničom pre ventilátor umiestnený v rozvádzačej skriní.

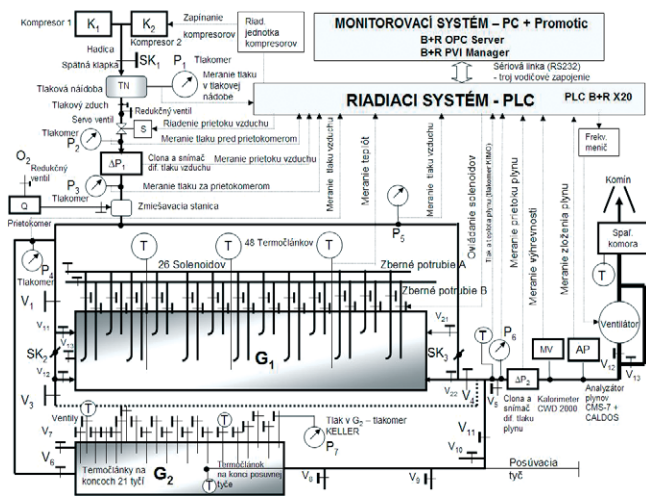
## 2. Monitorovací a riadiaci systém

Ako riadiaci systém sa použila zostava PLC automatu. Zostava obsahovala moduly na napojenie snímačov relatívneho tlaku a diferenčného tlaku s prúdovými signálmi, moduly na napojenie frekvenčného meniča, moduly pre digitálne výstupy (ovládanie solenoidov, serva a riadiacej jednotky kompresorov) a moduly na napojenie termočlánkov. Počas experimentov sa používali iba termočlánky typu K, ktoré vydržia aj pri teplote 1 200 °C. PLC sa naprogramovalo v prostredí Automation Studio pomocou jazyka Automation Basic.

Automat je prostredníctvom sériovej linky spojený s počítačom, na ktorom beží monitorovací systém. Komunikácia PLC s monitorovacím systémom sa zabezpečuje prostredníctvom rozhrania PVI a nakonfigurovaného OPC servera. Monitorovací systém komunikuje s PLC automatom ako OPC klient.

Riadiaci systém paralelne vykonáva niekoľko nepretržitých cyklov. Sú to samostatné cyklické moduly (algoritmy), ktoré zabezpečujú tieto operácie:

- vypínanie a zapínanie kompresorov tak, aby bol tlak v nádobe udržaný medzi MIN a MAX hodnotou,
- stabilizáciu prietoku vzduchu na žiadajú hodnotu servoventilom,



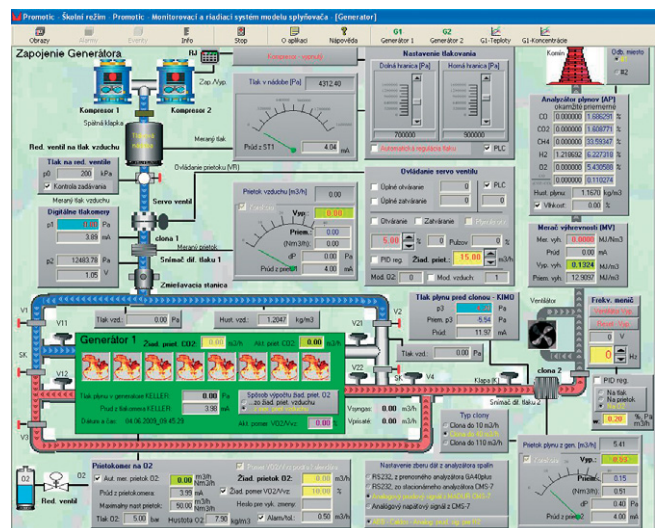
- G<sub>1</sub> – prvý generátor
- G<sub>2</sub> – druhý generátor
- K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> – kompresory
- SK<sub>i</sub> – spätná klapka (i = 1, 2, 3)
- TN – tlaková nádoba
- P<sub>1</sub> – tlakomer na tlakovej nádobe
- S – servoventil
- P<sub>2</sub> – tlakomer za servoventilom – pred vzduchovou clonou
- ΔP<sub>1</sub> – clona a snímač diferenčného tlaku vzduchu na meranie prietoku vzduchu
- P<sub>3</sub> – tlakomer za vzduchovou clonou
- Q – prietokomer na O<sub>2</sub>
- P<sub>4</sub> – tlakomer na vzduch z rozvetvením
- P<sub>5</sub> – tlakomer na vzduch na výstupe G<sub>1</sub>
- V<sub>ij</sub> – ventily a klapky (i, j = 1, ..., 13)
- T – termočlánky
- P<sub>6</sub> – tlakomer na meranie tlaku plynu na výstupe z G<sub>1</sub> a G<sub>2</sub>
- P<sub>7</sub> – tlakomer na meranie tlaku plynu v generátore G<sub>2</sub>
- ΔP<sub>2</sub> – clona a snímač diferenčného tlaku plynu – na meranie prietoku plynu
- MV – merač výhrevnosti – kalorimeter
- AP – analyzátor plynov

**Obr.3** Schéma zapojenia experimentálneho splynovacieho zariadenia

- stabilizáciu teploty a koncentrácie CO, O<sub>2</sub> na žiadaných hodnotách pomocou prietoku vzduchu, stabilizáciu koncentrácie kyslíka vo vyrobenom plyne na žiadanej hodnote pomocou ventilátora,
- stabilizáciu tlaku (podtlaku) plynu na výstupe na požadovanej hodnote pomocou ventilátora,
- extrémnu reguláciu na maximalizáciu teploty, koncentrácie CO, výhrevnosti a pomeru CO/(CO+CO<sub>2</sub>) vo vyrobenom plyne,
- riadenie založené na báze priebežnej identifikácie.

Monitorovací systém zabezpečuje pomocné algoritmy na ovládanie jednotlivých regulátorov a archiváciu meraných údajov z procesu splynovania. Monitorovací systém je vytvorený v prostredí SCADA systému Promotic a je rozdelený na obrazy, medzi ktorými sa môže operátor prepínať. Obráz „Generátor“ (obr. 4) umožňuje základné monitorovanie procesu splynovania. Umožňuje sledovať koncentrácie plynov, výhrevnosť, prietoky, tlaky, ovládanie servoventilu a ventilátora. Zároveň umožňuje spustenie algoritmu stabilizácie prietoku vzduchu a kyslíka do generátora a koncentrácie kyslíka na výstupe z generátora.

Obráz „Teploty“ umožňuje sledovať aktuálne teploty merané termočlánkami. Obráz „Trendy teplôt“ umožňuje sledovať grafický priebeh teplôt na grafe. Podobne možno na obraze „Koncentrácie“ sledovať trendy koncentrácií a na obraze „Tlaky a prietoky“ trendy meraných tlakov a prietokov. Na obraze „Riadenie splynovania“ môže operátor spúšťať a nastavovať jednotlivé regulátory riadiaceho systému (stabilizačné PI regulátory, extrémne regulátory a regulátor na optimálne riadenie). Osobitne sú obrazy pre generátor G<sub>2</sub> (slúžia na monitorovanie teplôt a koncentrácií, trendov a rýchlosti teplôt na G<sub>2</sub>) [2], [3], [4].



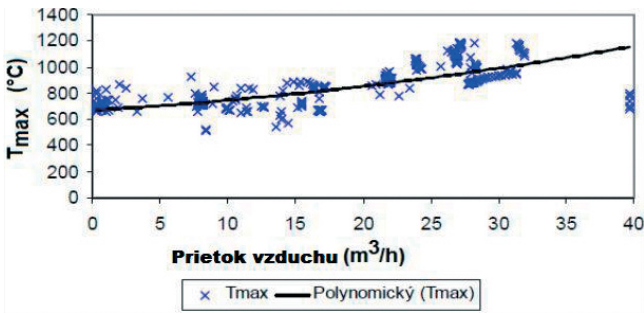
**Obr.4** Hlavný obraz monitorovacieho systému splynovacieho zariadenia

### 2.1 Východiská na zostavenie riadiaceho systému

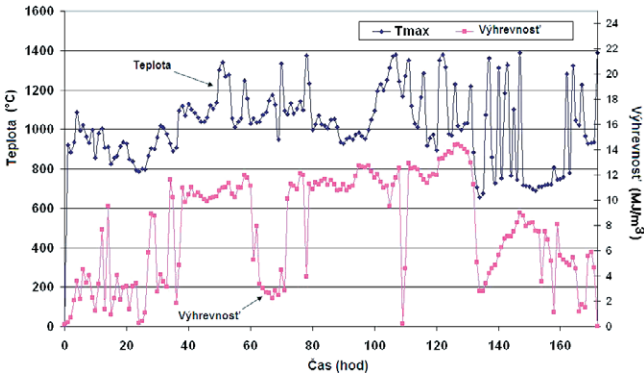
Pri experimentoch sa zistili rôzne závislosti medzi procesnými veličinami. Tieto poznatky umožnili vytvoriť algoritmy regulátorov automatizovaného riadiaceho systému. Najvýznamnejším poznatkom je, že zvýšením objemového množstva okysličovadla sa zvyšujú aj teploty vo fyzikálnom modeli (obr. 5). Zvýšená teplota urýchľuje chemické reakcie a nameraná výhrevnosť môže byť vyššia. Naopak menej okysličovadla môže teploty znížiť, čím sa zníži aj výhrevnosť. Tiež sa zistilo, že príliš veľa vhaňaného vzduchu môže mať opačný efekt a spôsobí ochladzovanie uhlia. Preto treba v priebehu procesu hľadať optimálne množstvo okysličovadla. Zároveň sa zistilo, že vyšší prevádzkový tlak má pozitívny vplyv na výhrevnosť vyrobeného plynu a že koncentrácia CO vo vyrobenom plyne závisí od spaľovacej teploty.

Splynovanie zahŕňa sériu endotermických reakcií (napr. Boudouardovu reakciu, metanáciu) podporovaných teplotou zo spaľovacích reakcií. Produktom splynovania uhlia je zmes plynov, ako sú CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Ich koncentrácie závisia nielen od operačných parametrov splynovača, ale aj od vlastností uhlia. Vzhľadom na to, že v reálnom pod-

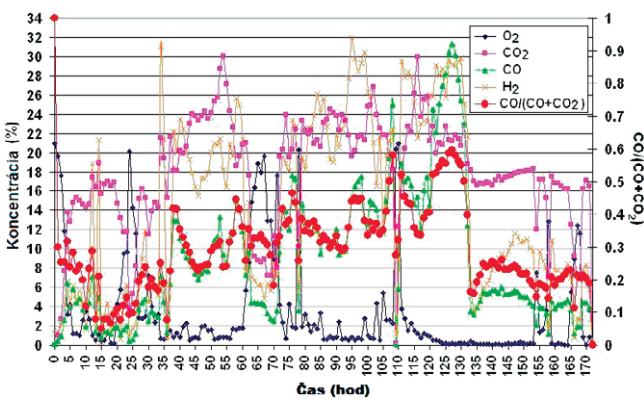




Obr.5 Závislosť teploty od prietoku vzduchu



Obr.6 Priebeh maximálnej teploty a výhrevnosti zo splynovania



Obr.7 Priebeh koncentrácií a pomeru CO/(CO+CO<sub>2</sub>) zo splynovania

zemnom ložisku by bolo náročné merať teplotu (bolo by treba urobiť vrty pre termočlánky, čím by sa mohla narušiť plynotesnosť sloja), môže sa teplota určovať aj nepriamo z nameraných koncentrácií vyrobeného plynu. Jedným takým ukazovateľom by mohol byť aj pomer  $CO/(CO+CO_2)$ , ktorý kvalitatívne koreluje s nameranou maximálnou teplotou. Tento pomer sa môže použiť ako riadená veličina v riadiacom algoritme. Maximalizácia tohto pomeru by maximalizovala aj teplotu.

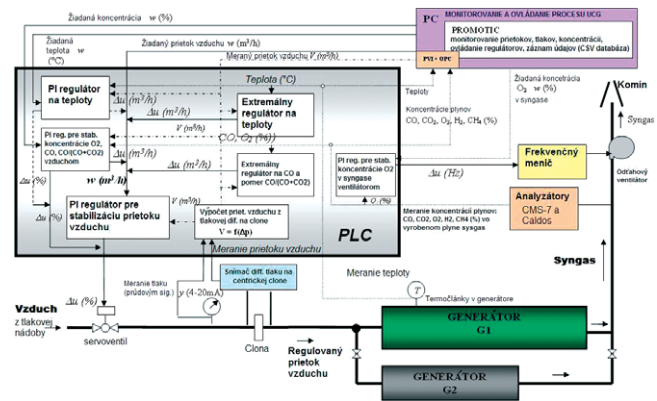
Na obr. 6 je zobrazený časový priebeh meranej maximálnej teploty a výhrevnosti vyrobeného plynu. Na obr. 7 sú merané koncentrácie plynov a vypočítaný pomer  $CO/(CO+CO_2)$  z rovnakého experimentu ako na obr. 6. Počas experimentu sa testoval regulátor na stabilizáciu teploty a extrémny regulátor na maximalizáciu koncentrácie CO a pomeru  $CO/(CO+CO_2)$ . Stabilizačný regulátor automaticky nastavoval prietok vzduchu do generátora tak, aby minimalizoval regulačnú odchýlku. Počas experimentu sa použil aj technický kyslík ako pomocné okysličovadlo, pričom do generátora sa vháňala zmes vzduchu s kyslíkom (v čase 40 – 130 hod od zapálenia). Kyslík zlepšil výhrevnosť vyrobeného plynu až na 14 MJ/m<sup>3</sup>. Bez kyslíka bola jeho priemerná výhrevnosť do 6 MJ/m<sup>3</sup>. V reálnych podzemných splynovačoch sa najčastejšie používa zmes kyslíka a vodnej pary, keďže vháňanie čistého kyslíka je neekonomické a navyše nebezpečné. Preto treba hľadať optimálny pomer množstva kyslíka a vzduchu. Na zvýšenie výhrevnosti bolo potrebné eliminovať vysokú koncentráciu O<sub>2</sub> v syngase. V prípade laboratórneho generátora sa množstvo O<sub>2</sub> eliminovalo riadením

výkonu ventilátora. V princípe nižší odťah znížil koncentráciu O<sub>2</sub> vo vyrobenom plyne. Na to sa vytvoril pomocný stabilizačný algoritmus koncentrácie O<sub>2</sub>. Pri malých koncentráciách O<sub>2</sub> (menej ako 0,2 %), keď sa do generátora vháňal len vzduch, sa dosiahla maximálna výhrevnosť 9 MJ/m<sup>3</sup> [5].

## 2.2 Algoritmy riadiaceho systému

Automatizovaný riadiaci systém ako integrovaný algoritmus umožňuje alternatívne spúšťanie regulátorov na stabilizáciu procesných veličín (prietok vzduchu, teplota, koncentrácie) a regulátorov na extrémne riadenie (napr. maximalizácia teploty alebo výhrevnosti). Osobitným algoritmom je algoritmus riadenia na princípe priebežnej identifikácie. Úlohou týchto algoritmov je minimalizovať ľudský faktor v riadení procesu splynovania, prípadne pomôcť operátorovi s riadením procesu počas prevádzky splynovača.

Na obr. 8 je zobrazená schéma zapojenia regulátorov v riadiacom systéme. Tieto regulátory menia v diskretných časových krokoch  $k$  objemový prietok vzduchu  $\Delta u$  tak, aby sa dosiahla žiadaná hodnota  $w$  riadenej veličiny  $y$  (teplota, koncentrácia, pomer  $CO/(CO+CO_2)$ ) alebo jej maximálna hodnota ako extrém (maximálna výhrevnosť, teplota, pomer, alebo koncentrácia CO). Tento extrém možno dosiahnuť pri optimálnom prietoku okysličovadla (vzduchu). Počas splynovania je zloženie vyrábaného plynu funkciou teploty a objemového množstva okysličovadla.



Obr.8 Schéma zapojenia jednotlivých regulátorov riadiaceho systému

### Spätnoväzbové riadenie

Stabilizačná úroveň je postavená na princípe použitia spätnoväzbového proporcionálno-integračného (PI) regulátora. Použil sa diskretný regulátor v prírastkovom tvare (1). Tento regulátor má takmer univerzálne použitie, ale hodí sa najmä pre vlečnú reguláciu a servomechanizmy. Dokáže uspokojivo odstraňovať náhle poruchy a vo väčšine prípadov zlepšuje stabilitu regulačného obvodu. Na výpočet parametrov sa osvedčila modifikovaná Zieglerova-Nicholsova metóda. Na výpočet parametrov regulátora sa priebežne počas procesu splynovania robila vždy nová identifikácia regulovanej sústavy pomocou aplikácie MATLAB a jej funkcií (parametrická identifikácia pre model ARX a ARMAX). Z novej identifikácie sa vždy vypočítali aj nové parametre diskretného regulátora ( $q_0, q_1$ ). Nevyhnutnosť adaptácie stabilizačného regulátora vyplýva z povahy procesu, ktorý s časom mení svoje parametre.

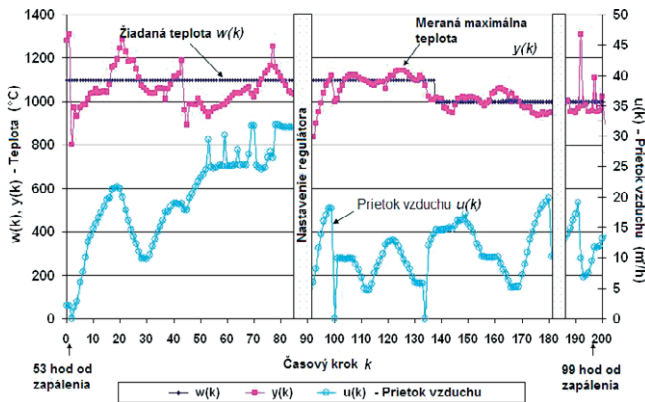
$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_p \left[ e(k) + \left( \frac{T_0}{T_1} - 1 \right) e(k-1) \right] = \\ &= K_p e(k) - K_p \left( 1 - \frac{T_0}{T_1} \right) e(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) = \\ &= 0,00027e(k) + (-0,0004115)e(k-1) \end{aligned} \quad (1)$$

kde  $\Delta u$  je zmena akčnej veličiny  $u$  (%) (percento otvorenia servoventilu alebo frekvencia ventilátora),

- $K_p$  – proporcionálne zosilnenie,
- $T_1$  – integračná konštanta,
- $k$  – časový krok,

- $e$  – regulačná odchýlka ( $e = w - y$ ),  
 $y$  – riadená veličina (meraný prietok vzduchu ( $m^3/h$ ),  
 teplota ( $^{\circ}C$ ), koncentrácia CO (%) alebo  $O_2$  (%)  
 v plyne),  $w$  – žiadaná veličina (požadovaný prietok  
 vzduchu, žiadaná teplota, žiadaná koncentrácia),  
 $T_0$  – perióda vzorkovania.

Diskrétny PI regulátor na stabilizáciu teploty v princípe zvyšuje prietok vzduchu prírastkom  $\Delta u$  v snahe zvýšiť teplotu a naopak znižuje prietok vzduchu v prípade, keď treba teplotu znížiť. Pri stabilizácii na vyššie teploty (nad  $1\ 000\ ^{\circ}C$ ) je aj výhrevnosť plynu vyššia. Tento typ regulátora sa aplikoval na stabilizáciu prietoku vzduchu do generátora, teploty v generátore alebo meranej koncentrácie  $O_2$  vo vyrobenom plyne. V poslednom prípade sa namiesto prietoku vzduchu (otváranie a zatváranie servoventilu) ako akčnej veličiny použil odtahový ventilátor. Zmenou výkonu ventilátora (frekvenciou meniča) možno meniť koncentráciu  $O_2$  vo vyrobenom plyne.



Obr.9 Priebieh stabilizácie teploty počas splynovania

Na obr. 9 je zobrazený časový priebeh stabilizácie teploty počas procesu splynovania. Toto automatické riadenie sa vyskúšalo medzi 53 – 99 hod od zapálenia, pričom maximálna získaná výhrevnosť z tohto času bola  $12\ MJ/m^3$  (obr. 6). Hodnota žiadanej veličiny  $w$  bola  $1\ 100$  a neskôr  $1\ 000\ ^{\circ}C$ . Keď uholný sloj dosiahne vysokú teplotu, začína sa výroba plynu [3], [6].

**Extremálne riadenie**

Ako podporný algoritmus na hľadanie optimálneho množstva vzduchu môže byť spustený extrémny regulátor maximálneho množstva CO (obr. 11) alebo maximálneho pomeru  $CO/(CO+CO_2)$  (obr. 10). Táto optimalizácia sa neskôr rozšírila aj na priame hľadanie maximálnej výhrevnosti. Extrémny regulátor v diskrétnych časových krokoch  $k$  zvyšuje a znižuje prietok vzduchu a hľadá tak najlepšiu cestu na zvýšenie pomeru alebo koncentrácie CO v syngase.

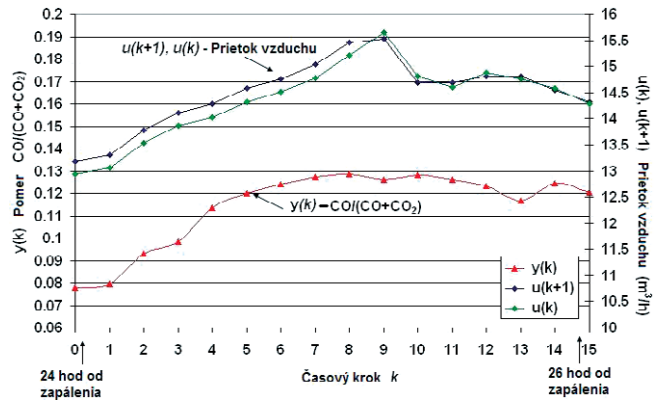
Extrémny regulátor CO vo vyrábanom plyne je založený na princípe priebežnej optimalizácie prietoku vzduchu. Regulátor vypočíta v každom kroku regulácie podľa riadiacej rovnice (2) nový žiadaný prietok. Tento prietok vstupuje do PI regulátora na stabilizáciu prietoku vzduchu ako nová žiadaná hodnota. Extrémny regulátor CO je tak zapojený do kaskády spolu s PI regulátorom prietoku vzduchu. V každom časovom kroku regulácie sa vypočíta nový požadovaný prietok tak, aby nameraná koncentrácia CO dosahovala maximum. Algoritmus extrémneho regulátora CO je takýto [5]:

1. Výpočet riadiacej rovnice:

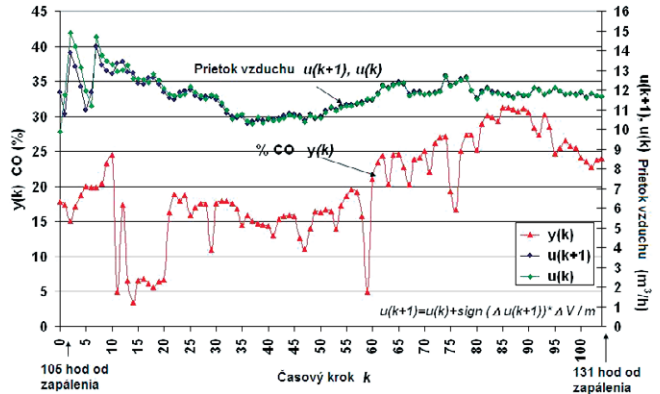
$$u(k+1) = u(k) + \text{sign}(\Delta u(k+1)) \cdot \Delta V / m \tag{2}$$

$\text{sign}(\Delta u(k))$	$\text{sign}(\Delta y(k))$	$\text{sign}(\Delta u(k+1))$
+	-	-
+	+	+
-	-	+
-	+	-

Tab.1 Logická tabuľka extrémneho regulátora



Obr.10 Priebieh riadenia s extrémnym regulátorom pomeru  $CO/(CO+CO_2)$



Obr.11 Priebieh riadenia s extrémnym regulátorom na CO

kde  $u$  je akčná veličina ( $m^3/h$ ),

$k$  – časový krok,

$\Delta V/m$  – prírastok  $\Delta u$  akčnej veličiny  $u$

( $\Delta V = 0,25$  alebo  $0,5$  a  $m = 1$  pri inicializácii)

2. V každom stabilizovanom kroku  $k$  sa vypočíta prírastok  $\Delta u$  akčnej veličiny  $u$  ( $m^3/h$ ) a prírastok  $\Delta y$  regulovanej veličiny  $y$  (CO) (%), kde  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$  a  $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ . Ďalej nasleduje vyhodnotenie logickej tabuľky (tab. 1).

2. Ak sa  $\text{sign}(\Delta u(k+1))$  zmení z + na - alebo z - na +, potom musíme modifikovať parameter  $m$  ( $m = m + 1$ ). Pokračujeme krokom 1.

Podobne je riešený aj extrémny regulátor pomeru  $CO/(CO+CO_2)$ .

**Riadenie na princípe priebežnej identifikácie**

Súčasťou riadiaceho systému je aj algoritmus riadenia, ktorý je postavený na princípe priebežnej identifikácie. Algoritmus pozostáva z dvoch častí:

- ukladanie meraných údajov do databázy podľa zvoleného kritéria alebo podľa fázy procesu splynovania,
- výpočet (adaptácia) parametrov modelov pre riadiace veličiny.

Samotné ukladanie dát priebehu v prostredí monitorovacieho a riadiaceho systému PROMOTIC. So zvolenou periódou vzorkovania dochádza k ukladaniu dát potrebných na výpočet parametrov modelov riadenia (riadiacich veličín) do štyroch dátových súborov podľa zvoleného kritéria riadenia. Kritériá pre typ riadenia sú zostavené na základe dvoch funkcií systému a sú nimi:

- výhrevnosť plynu syngas ( $H_{\text{syngas}}$ ):  $1 < H_{\text{syngas}} < 3\ MJ/m^3$ ,
- výhrevnosť plynu syngas ( $H_{\text{syngas}}$ ):  $3 < H_{\text{syngas}} < 6\ MJ/m^3$ ,
- výhrevnosť plynu syngas ( $H_{\text{syngas}}$ ):  $H_{\text{syngas}} > 6\ MJ/m^3$ ,
- maximálna teplota v uholnom kanáli ( $T_{\text{max}}$ ):  $T_{\text{max}} > 900\ ^{\circ}C$ .

Zásobník údajov je vytvorený pre pevný (konštantný) počet záznamov ( $n$  záznamov v zásobníku) a po jeho naplnení dôjde po prijatí nového záznamu k posunu databázy a vylúčeniu najstaršieho záznamu. Zásobníky údajov tvoria štyri dátové súbory, jeden pre každé uvedené kritérium riadenia. Výpočet parametrov modelov riadenia sa uskutočňuje



v samostatnej aplikácii, ktorú v pravidelných intervaloch spúšťa časová aplikácia PROMOTIC. Tento výpočet parametrov sa realizuje metódou najmenších štvorcov (MNS). Metóda najmenších štvorcov vychádza z Gaussovho mnohonásobne overeného princípu: „Súčet štvorcov rozdielov medzi skutočnými a teoretickými hodnotami je najmenší možný“. Z nameraných hodnôt v zásobníka možno metódou najmenších štvorcov určiť najlepšie odhady parametrov aj tak, že každú rovnicu sústavy vyjadríme sumou kvadrátov odchýlok  $F$  medzi modelovou a skutočnou hodnotou riadiacej veličiny v každom časovom kroku (3).

$$F = \sum_{k=1}^n (u^{mod}(k+1) - u(k+1))^2 \quad (3)$$

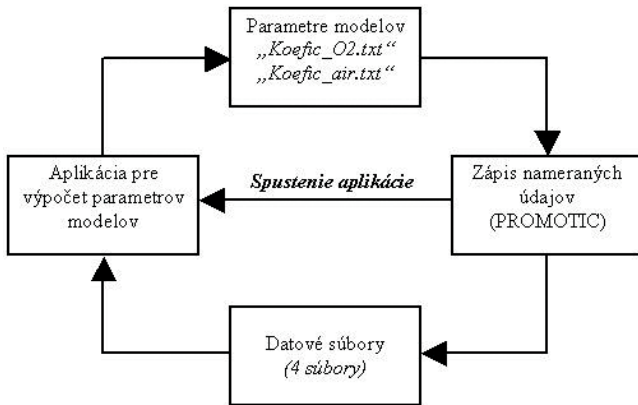
kde  $u^{mod}$  je modelová hodnota riadiacej veličiny,  
 $u$  – skutočná (nameraná) hodnota riadiacej veličiny.

$$MIN \rightarrow F = \sum_{k=1}^n (a_0 + a_1 \cdot x_1(k) + \dots + a_m \cdot x_m(k) - u(k+1))^2 \quad (4)$$

kde  $a_i$  je sú parametre modelu riadiacej veličiny,  
 $x_i$  – vstupná veličina do modelu [7], [8], [9].

Minimalizáciou odchýlky  $F$  dostaneme sústavu  $m$  rovníc, z ktorej vieme vypočítať vektor parametrov  $a_i$  pre modely riadiacich veličín, t. j. objemový tok vzduchu a kyslíka.

$$\frac{\partial F}{\partial a_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$



Obr.12 Bloková schéma riadiaceho systému

Výstupom z tejto časti programového reťazca sú súbory s parametrami  $a_i$  modelov riadiacich veličín procesu splynovania uhlia. Zjednodušená bloková schéma riadenia s priebežnou identifikáciou je znázornená na obr. 12 a jeho algoritmus je takýto:

- V pravidelnom časovom intervale (zvolenom používateľom) dochádza k zápisu nameraných údajov do jedného zo štyroch súborov podľa dosiahnutej výhrevnosti syngasu a nameranej maximálnej teploty v kanáli. Ide o tieto namerané údaje:
  - koncentrácie plynov (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) vo vyrobenom plyne syngas (%),
  - teploty v uholnom kanáli a v uhlí ( $T_1, T_2, \dots, T_k$ ),
  - objemový prietok oxidantov ( $V_{air}$  a  $V_{O_2}$ ).
- Kontrola času výpočtu ( $\tau_{výpočtu}$ ) na spustenie aplikácie výpočtu parametrov modelov riadenia:
  - ak nastal čas výpočtu  $\tau = \tau_{výpočtu}$ , spustí sa aplikácia na výpočet parametrov (bod 3),
  - ak nenastal čas výpočtu  $\tau < \tau_{výpočtu}$ , pokračuje záznam údajov (bod 1).
- Spustenie externej aplikácie na výpočet parametrov modelu, ktorá vykoná tieto body:
  - načítanie údajov zo štyroch dátových súborov,
  - výpočet parametrov modelov pre riadiace veličiny  $a_i$ ,
  - zápis vypočítaných parametrov do súborov *Koeffic\_air.txt* a *Koeffic\_O2.txt*
  - zatvorenie aplikácie pre výpočet parametrov (bod 1).

Algoritmus riadenia procesu UCG na báze priebežnej identifikácie spočíva v priebežnom stanovovaní parametrov (adaptácii) regresných modelov pre objemový prietok oxidantov ( $V_{air}$  a  $V_{O_2}$ ). Podstatou priebežnej identifikácie je stanoviť parametre modelov riadiacich veličín tak, aby sme v generátore dosiahli dostatočné teploty na tvorbu syngasu s vysokou výhrevnosťou. Preto dochádza k výpočtu parametrov modelov z dát, ktoré spĺňajú dané kritérium riadenia. Štruktúra regresných modelov je zostavená v troch variantoch. Prvý typ modelov pre riadiace veličiny  $V_{air}$  (6) a  $V_{O_2}$  (7) je zostavený z piatich vstupných veličín, na základe ktorých sa vypočítavajú objemové prietoky pre obidva oxidanty. Tvar modelov je takýto:

$$V_{air}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{air}[i-1] + a_2 \cdot \%CO[i-1] + a_3 \cdot \%CO_2[i-1] + a_4 \cdot \%CH_4[i-1] + a_5 \cdot T[i-1] \quad (6)$$

$$V_{O_2}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{O_2}[i-1] + a_2 \cdot \%CO[i-1] + a_3 \cdot \%CO_2[i-1] + a_4 \cdot \%CH_4[i-1] + a_5 \cdot T[i-1] \quad (7)$$

kde  $V_{air}$  je objemový prietok vŕhaného vzduchu,  
 $V_{O_2}$  – objemový prietok vŕhaného kyslíka,  
 $\%CO$  – koncentrácia CO vo vyrobenom plyne,  
 $\%CO_2$  – koncentrácia CO<sub>2</sub> vo vyrobenom plyne,  
 $\%CH_4$  – koncentrácia CH<sub>4</sub> vo vyrobenom plyne,  
 $T$  – teplota v uholnom kanáli.

Druhý typ modelov má na vstupe okrem percentuálneho obsahu prvkov v plyne pomer prietokov oboch oxidantov –  $V_{air}/V_{O_2}$  a maximálnu teplotu v kanáli –  $T_{max}$  a jeho tvar a štruktúra je takáto:

$$V_{air}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{air}[i-1] / V_{O_2}[i-1] + a_2 \cdot \%CO[i-1] + a_3 \cdot \%CO_2[i-1] + a_4 \cdot \%CH_4[i-1] + a_5 \cdot T_{max}[i-1] \quad (8)$$

$$V_{O_2}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{air}[i-1] / V_{O_2}[i-1] + a_2 \cdot \%CO[i-1] + a_3 \cdot \%CO_2[i-1] + a_4 \cdot \%CH_4[i-1] + a_5 \cdot T_{max}[i-1] \quad (9)$$

kde  $T$  je maximálna teplota v uholnom kanáli.

Do tretieho typu modelov nevstupujú namerané hodnoty z analýzy plynu. Je to model zameraný na dosiahnutie teploty potrebnej na proces tvorby syngasu. Okrem pomeru prietokov oboch oxidantov –  $V_{air}/V_{O_2}$  vystupuje v modeli maximálna teplota v kanáli –  $T_{max}$  v lineárnom a kvadratickom tvare. Štruktúra modelov je takáto:

$$V_{air}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{air}[i-1] / V_{O_2}[i-1] + a_2 \cdot T_{max}[i-1] + a_3 \cdot T_{max}^2[i-1] \quad (10)$$

$$V_{O_2}[i] = a_0 + a_1 \cdot V_{air}[i-1] / V_{O_2}[i-1] + a_2 \cdot T_{max}[i-1] + a_3 \cdot T_{max}^2[i-1] \quad (11)$$

Uvedené typy modelov boli off-line overené nameranými vstupnými a výstupnými dátami získanými z experimentov vykonaných na generátore G2. Modely ešte treba overiť on-line nasledujúcimi experimentmi.

### Záver

V tomto článku sú uvedené princípy, algoritmy a výsledky z riadenia procesu splynovania. Riadiaci systém umožňuje manuálne spúšťanie podporných algoritmov alebo ich automatické cyklické vykonávanie. Riadiaci systém sa overil na experimentálnom splynovacom generátore, ale uvedené princípy sa môžu použiť aj pri splynovaní na reálnom uholnom sloji. Pri zohľadnení uvedených výsledkov môže byť filozofia integrovaného riadiaceho systému založená na postupnosti týchto krokov:

- zvýšenie a stabilizácia teploty tak, aby sa dosiahla vysoká výhrevnosť vyrobeného plynu syngas,
- v prípade potreby eliminácia kyslíka vo vyrobenom plyne pomocou odťahového ventilátora,
- maximalizácia výhrevnosti vo vyrobenom plyne (alebo koncentrácie CO, prípadne jeho pomeru),
- návrat k bodu 1 pri poklese teploty.

Automatizovaný riadiaci systém sa môže byť doplniť riadiacimi algoritmami na regulovanie množstva privádzanej pary a CO<sub>2</sub> na zlepšenie

splynovania. Riadiaci systém procesu splynovania uhlia na báze prieběžnej identifikácie je tiež jednou z možností. Spočíva v nastavení objemového prietoku okysličovadla na vstupe tak, aby sa splnila základná filozofia splynovania, ktorou je získať plyn (syngas) s čo najväčšou výhrevnosťou. Objemové toky vzduchu a kyslíka sú vypočítané podľa jedného z uvedených modelov a podľa vybraného kritéria riadenia.

#### Podakovanie

Táto práca vznikla s podporou projektu aplikovaného výskumu APVV 0582-06 a grantov VEGA 1/0365/08 a VEGA 1/0404/08 Slovenskej grantovej agentúry pre vedu.

#### Literatúra

- [1] KOSTÚR, K., KAČUR, J. Design of experimental equipment for underground coal gasification. In Int. Carpathian Control Conference: High Tatras, Slovak Republic, TU Košice, pp. 334-337, 2007, ISBN 978-80-8073-805-1.
- [2] KAČUR, J., LACIAK, M., KOSTÚR, K. Monitoring and control system of the experimental gasification equipment. In Int. scientific – technical conference, Kouty nad Desnou, Czech Republic, Pardubice, University Pardubice, pp. c097a, 2008, ISBN 978-80-7395-077-4.
- [3] KAČUR, J., KOSTÚR, K., DURDÁN, M. The proposal of the control circuits for underground coal gasification. In Int. Carpathian Control Conference, Sinaia, Romania, Craiova, University of Craiova, pp 287-290, 2008, ISBN 978-973-746-897-0.
- [4] KOSTÚR, K., DURDÁN, M. Riadenie ohrevu na báze inteligentného systému nepriameho merania. In: AT&P Journal. roč. 15, č. 2 (2008), s. 69-73. ISSN 1335-2237.
- [5] KOSTÚR, K. The Structure Of Control For Underground Coal Gasification. In: ICC '2009: Proceedings of 10<sup>th</sup> International Carpathian

Control Conference: Zakopane, Poland May 24-27, 2009. AGH Krakow, pp. 219-222. ISBN 83-89772-51-5.

[6] KAČUR, J., LACIAK, M., DURDÁN, M. Proposal and Realization of the Automated Control system of the UCG. In: ICC '2009: Proceedings of 10<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference: Zakopane, Poland May 24-27, 2009. AGH Krakow, pp. 187-190. ISBN 83-89772-51-5.

[7] LACIAK, M., DURDÁN, M., KAČUR, J. Proposal of the UCG Control based on Continuous Identification. Int. Carpathian Control Conference, Zakopane, Poland, AGH Krakow 2009, pp 395-398, ISBN 83-89772-51-5

[8] TERPÁK, J., DORČÁK, L., PALEŇČÁR, V. Modelling the gas fuel combustion using Matlab. In: ICC '2008: Proceedings of 9<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference: Sinaia, Romania, May 25-28, 2008. pp. 679-682. ISBN 978-973-746-897-0.

[9] PÁSTOR, M., BUDAYOVÁ, M., VARGA A. Vplyv fyzikálno-chemických parametrov na proces fluidného splynovania biomasy. In: Medzinárodná konferencia, Plzeň, Czech Republic, June 24-27, 2008. ISBN 978-80-7043-666-0.

**Ing. Marek Laciak, PhD.**

**Ing. Ján Kačur**

**Technická univerzita v Košiciach,  
Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií  
Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov  
B. Nemcovej 3, 042 00 Košice  
Tel.: 055/602 51 75  
Fax: 055/602 51 90  
e-mail: Marek.Laciak@tuke.sk  
jan.kacur@tuke.sk**

28