

Ryszard PARYS

Centralne Biuro Konstrukcji Kotłów  
Tarnowskie Góry

WŁASNOŚCI DYNAMICZNE KOTŁA FLUIDALNEGO WF - 3,5 ZASILANEGO WĘGLEM  
POPRAWIEZ KESON UMIESZCZONY PERYFERYJNIE W KOMORZE PALENISKOWEJ

Streszczenie. Dla kotła fluidalnego WF-3,5 zasilanego poprzez keson przeprowadzono serię badań polegających na rejestracji zmian charakterystycznych wielkości w odpowiedzi na skokowe zmiany strumienia węgla, strumienia powietrza i wysokości złoza. W referacie krótko scharakteryzowano obiekt badań oraz sposób pomiarów. Poczyniono szereg założeń pozwalających sprawdzić obiekt do obiektu dynamicznego o 3 wejściach i 2 wyjściach. Dla poszczególnych torów założono dynamikę w postaci inercji pierwszego rzędu z czasem martwym. Na podstawie uzyskanych przebiegów czasowych zweryfikowano poprawność założenia. Średnie wartości czasu opóźnienia, stałej czasowej i wzmożenia zebrano w tabeli. Przebiegi czasowe najbardziej zbliżone do średnich przedstawiono graficznie. Wyniki porównano z wynikami podobnych badań tegoż kotła lecz zasilanego ślimakiem bezpośrednio do złoza.

## 1. Wprowadzenie

Zastosowanie metod automatycznej regulacji i kompensacji wymaga znajomości modeli matematycznych obiektów sterowania. Modele, zarówno systemów statycznych jak i dynamicznych wyznaczane są na drodze identyfikacji. Identyfikacja modeli posiada charakter rekurencyjny, czyli polega na wyborze struktury modelu, wyznaczeniu parametrów modelu na podstawie pomiarów wielkości wejściowych i wyjściowych oraz na sprawdzeniu dokładności przewidywań za pomocą otrzymanego modelu. W przypadku małej zgodności przewidywań dokonuje się wyboru odmiennej struktury modelu i ponownie wyznacza się jego parametry.

Najstarszą i najwygodniejszą metodą identyfikacji obiektów dynamicznych jest metoda odpowiedzi obiektu na skokowy sygnał sterujący. Metoda ta jest szeroko stosowana w przypadku braku nie dających się pominąć zakłóceń oddziałujących na obiekt oraz wtedy, gdy nie jest wymagana bieżąca identyfikacja.

Spalanie fluidalne jest w porównaniu z innymi klasycznymi metodami wykorzystania chemicznej energii paliw, metodą nową. Jednym z nielicznych kotłów fluidalnych w Polsce był kocioł WF-3,5 zlokalizowany na Stacji Prób i Badań CBKK Tarnowskie Góry przy KWK "Jowisz" w Wojkowicach. Ostatnim etapem badań przed likwidacją Stacji były pomiary kotła zasilanego węglem poprzez peryferyjnie umieszczony w komorze paleniskowej keson [1]. Zasilanie kesonowe kotła tej wielkości nie było do tej pory stosowane. Spośród badań między innymi rejestrowano reakcję kotła na

skokową zmianę strumienia podawanego węgla, strumienia powietrza oraz wysokości złoża. Prowadzono identyfikację nie dla potrzeb automatyki lecz dla stwierdzenia zmian dynamiki jakie wystąpiły po zastosowaniu kesonu. Dlatego otrzymane wyniki porównano z wynikami podobnych badań tegoż kotła lecz zasilanego ślimakowo bezpośrednio do złoża fluidalnego [2].

## 2. Opis instalacji

Kocioł doświadczalny WF 3,5 wraz z urządzeniami pomocniczymi został schematycznie pokazany na rys. 1. Węgiel do kesonu jest podawany przez podajnik ślimakowy lub pneumatycznie, a z kesonu jest "wmywany" do komory paleniskowej.

Keson umieszczony jest przy bocznej ścianie komory. Do komory paleniskowej może być również doprowadzony w sposób pneumatyczny lotny koksik wytrącony w wolno stojącym podgrzewaczu wody lub w odpylaczu pośrednim. Strumień wody doprowadzonej do kotła jest rozdzielony na strumień obiegu głównego /ekrany paleniska, podgrzewacz wody/, strumień chłodzący keson oraz na strumień do schładzacza popiołu.

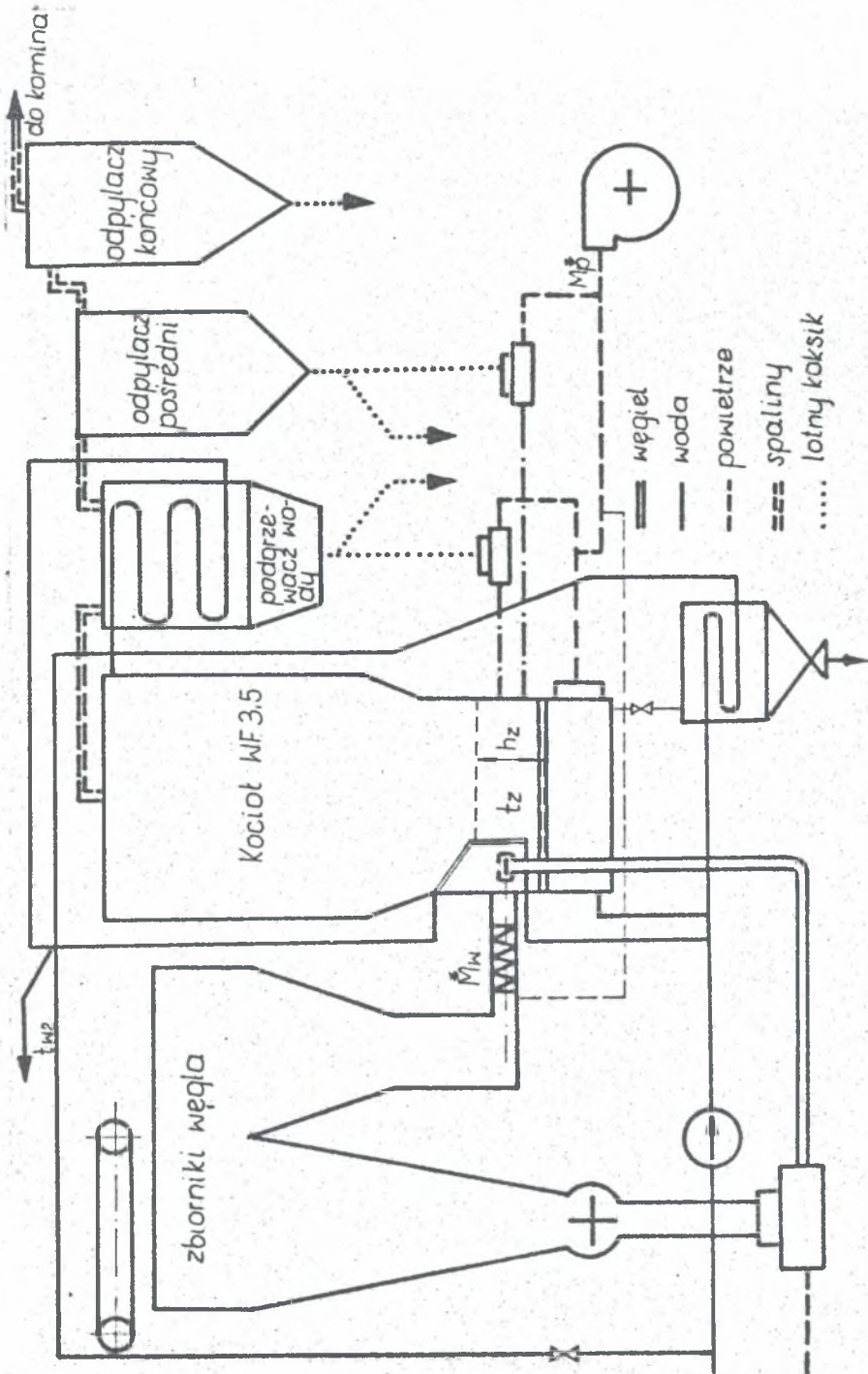
Źródłem powietrza do spalania, do chłodzenia ślimaka oraz do transportu lotnego koksiku jest dmuchawa.

Do transportu węgla wykorzystywane jest sprężone powietrze z sieci zakładowej. Powietrze główne do spalania podawane jest do paleniska poprzez skrzynię powietrza i rozdzielacz. Spaliny z bloku paleniska przepływają kolejno poprzez podgrzewacz wody, odpylacz pośredni i odpylacz końcowy do komin. Źródłem ciągu jest wentylator wyciągowy oraz komin. Nadmiar materiału złoża może być odprowadzany spustem dolnym do zbiornika popiołu, gdzie może być schładzany i dalej odprowadzany kolebami górniczymi. Również lotny pył spod podgrzewacza wody oraz spod odpylaczy może być odtransportowany kolebami górniczymi. Do paleniska nie jest dodawany żaden materiał wiążący siarkę ani inertny.

W badanym układzie nie zachodzi spalanie w kesonie. Podstawowe dane techniczne kotła WF - 3,5 przedstawia tablica 1.

Tablica 1: Podstawowe dane techniczne kotła WF-3,5.

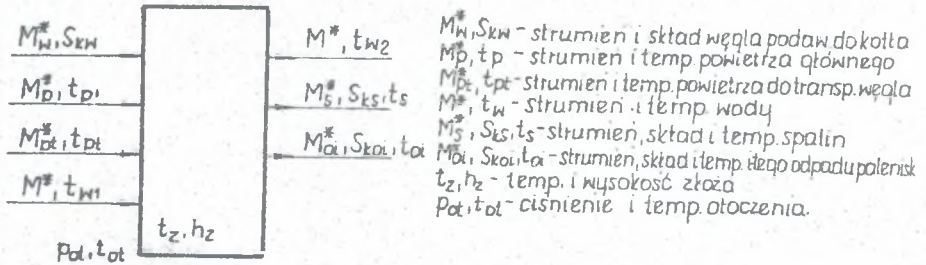
Maksymalna wydajność cieplna	4 MW
Ciśnienie wody	0,8 MPa
Temperatura wody wlot/wylot	80/130°C
Maksymalna wysokość złoża	1,3 m
Poprzeczny przekrój złoża	1,535 m <sup>2</sup>
Część przekroju złoża przykryta kesonem	0,371 m <sup>2</sup>



rys. 1. Schemat instalacji kotła WF-3,5  
 Fig. 1. WF-3,5 boiler's combustion installation scheme.

### 3. Opis instalacji jako systemu dynamicznego. Przyjęte uproszczenia

Opisaną instalację można traktować jako system dynamiczny. Przyjmując, że nawrót lotnego koksiku jest nieczynny oraz, że instalacja schładzania popiołu jest wyłączona można schematycznie przedstawić instalację jak na rys. 2. Na rysunku tym uwzględniono wszystkie wielkości mające zasadniczy wpływ na bilans cieplny kotła brutto.

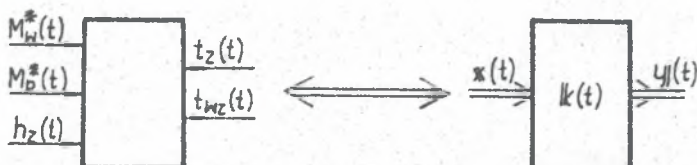


Rys. 2 . Wielkości mające zasadniczy wpływ na bilans cieplny kotła.

Fig. 2 . Quantities fundamentally effecting on the boilers heat balance.

Z punktu widzenia odbioru energii, podstawowym parametrem regulowanym jest temperatura wody wylotowej. Natomiast z punktu widzenia obsługi kotła podstawowym parametrem regulowanym jest temperatura złoża. Zasadniczymi zakłóceniami są zmiany temperatury i strumienia przepływu wody wylotowej, zmiana wartości opałowej i zakłócenia w podawaniu węgla. Pomocniczymi parametrami są wysokość złoża oraz ilość powietrza. W badaniach między innymi sprawdzano wpływ zmian strumienia węgla, strumienia powietrza i wysokości złoża na temperaturę złoża i temperaturę wody na wlocie z kotła.

Założono, że w trakcie poszczególnych badań skład węgla /wartość opałowa, uziarnienie/ nie zmienia się oraz, że skład i strumienie odpadów paleniskowych są stałe. Stwierdzono stałe wartości strumienia powietrza do transportu węgla, jego temperatury, strumienia i temperatury wody na wlocie do kotła. W ten sposób zredukowano problem do systemu dynamicznego przedstawionego na rys. 3



Rys. 3. Podstawowe parametry regulowane oraz wielkości mające zasadniczy wpływ na ich zmianę.

Fig. 3. Fundamental regulating variables and quantities fundamentally effecting on their changes.

Z rysunku wynikają oznaczenia:

$$\mathbf{X} / t / = \begin{bmatrix} M_w^* / t / \\ M_p^* / t / \\ h_2 / t / \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{y} / t / = \begin{bmatrix} t_w / t / \\ t_{w2} / t / \end{bmatrix} ;$$

$\mathbf{k} / t /$  - postać czasowa funkcji przejścia /macierz o 2 wierszach i 3 kolumnach/.

Zależność między wejściem a wyjściem można zapisać:

$$\mathbf{y} / t / = \mathbf{k} / t / \cdot \mathbf{X} / t / \quad /1/$$

lub w postaci operatorowej:

$$\mathbf{Y} / s / = \mathbf{K} / s / \cdot \mathbf{X} / s / . \quad /2/$$

Tak więc celem identyfikacji stała się macierz  $\mathbf{K} / s /$  /lub  $\mathbf{k} / t /$ /. Na podstawie wstępnych obserwacji oraz na podstawie [2] zauważono, że składowe wektora  $\mathbf{y} / t /$  po skokowej zmianie poszczególnych składowych wektora  $\mathbf{X} / t /$  przybierają postać podobną do odpowiedzi skokowej elementu inercyjnego I rzędu z czasem martwym. Taki też model funkcji przejścia przyjęto dla poszczególnych torów, co operatorowo dla się zapisać:

$$K_{ij} / s / = \frac{k_{ij}}{1 + T_{ij} s} \cdot e^{-s T_{0ij}} / i=1,2; j=1,2,3/ \quad /3/$$

gdzie:  $T_{ij}$  - odpowiednia stała czasowa,

$T_{oij}$  - czas martwy,

$k_{ij}$  - wzmożenie.

W trakcie badań starano się wyznaczyć stałe  $T_{ij}$ ,  $T_{oij}$ ,  $k_{ij}$  /  $i=1,2$ ;  
 $j = 1,2,3$  /.

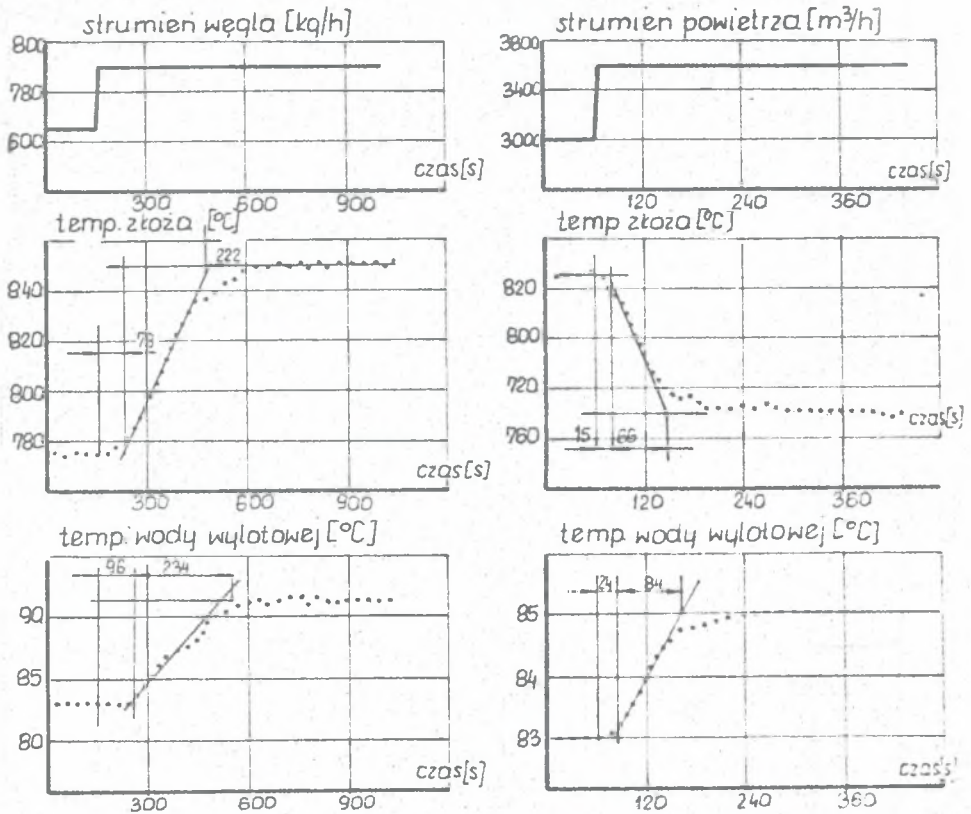
#### 4. Sposób przeprowadzenia badań

Kocioł był bogato oprzyrządowany w aparaturę pomiarową. Między innymi wszystkie wielkości  $x/t$  oraz  $y/t$  były przetwarzane na sygnały elektryczne prądowe lub napięciowe ciągłe i rejestrowane za pomocą układu cyfrowej rejestracji danych, którego budowę i zasadę działania opisano w [3]. Układ ten pozwala na rejestrację z częstotliwością  $< 5$  Hz. Przy rejestrowaniu 48 wielkości zapewniało to rejestrację danego parametru z czasem próbkowania nie mniejszym niż 10 sekund. Umożliwia to jednak odtworzenie ciągłego przebiegu zmiennej na podstawie jej dyskretnego obrazu.

Wielkości wejściowe mierzono następująco. Strumień węgla był wyznaczany poprzez pomiar obrotów wywzorcowanego podajnika tachogeneratorem. Strumień powietrza był mierzony poprzez pomiar spiętrzenia na zwężce za pomocą przetwornika typu wagi prądowej. Wysokość złoza była mierzona w specjalnym układzie opisanym w [4], w połączeniu z przetwornikiem typu wagi prądowej. Zmian strumienia węgla dokonywano poprzez zmianę wysterowania silnika prądu stałego /prędkość zmian: średnio o ok. 30 kg/h węgla w ciągu 1s/, strumienia powietrza poprzez zmianę ustawienia kierownicy wentylatora /średnio ok. 60 m<sup>3</sup>/s w ciągu 1s/ oraz wysokości złoza poprzez otwarcie spustu dolnego /ok. 10 mm w ciągu 1 s/. Powyższe zmiany z konieczności uznano za zmiany skokowe. Wielkości wyjściowe czyli temperatury mierzono nieosłoniętymi termoparami NiCr-Ni lub Fe-konstanten umieszczonymi w rurkach żaroodpornych  $\phi$  8. Układ ten /termopara + rurka żaroodporna/ posiada czas opóźnienia ok. 1 s w wodzie oraz ok. 6s w powietrzu. Stałe czasowe wynoszą odpowiednio ok. 13s oraz ok. 96s. Dane te wyznaczono zgodnie z [5]. Przyjęto, że pozostała część układu pomiarowego działa bezinercyjnie i bezopóźnieniowo. W powyższy sposób dokonano kolejno skokowych zmian wielkości wejściowych i rejestrowano zmiany wielkości wyjściowych.

#### 5. Wyniki badań

Na rys. 4 15 przedstawiono przykładowe przebiegi temperatury złoza i temperatury wody wylotowej po skokowej zmianie strumienia węgla, strumienia powietrza i wysokości złoza. Przebiegi te są różne dla różnych punktów pracy układu. W tablicy 2 zebrano średnie wartości czasu martwego, stałej czasowej, oraz wzmożenia z prób przeprowadzonych

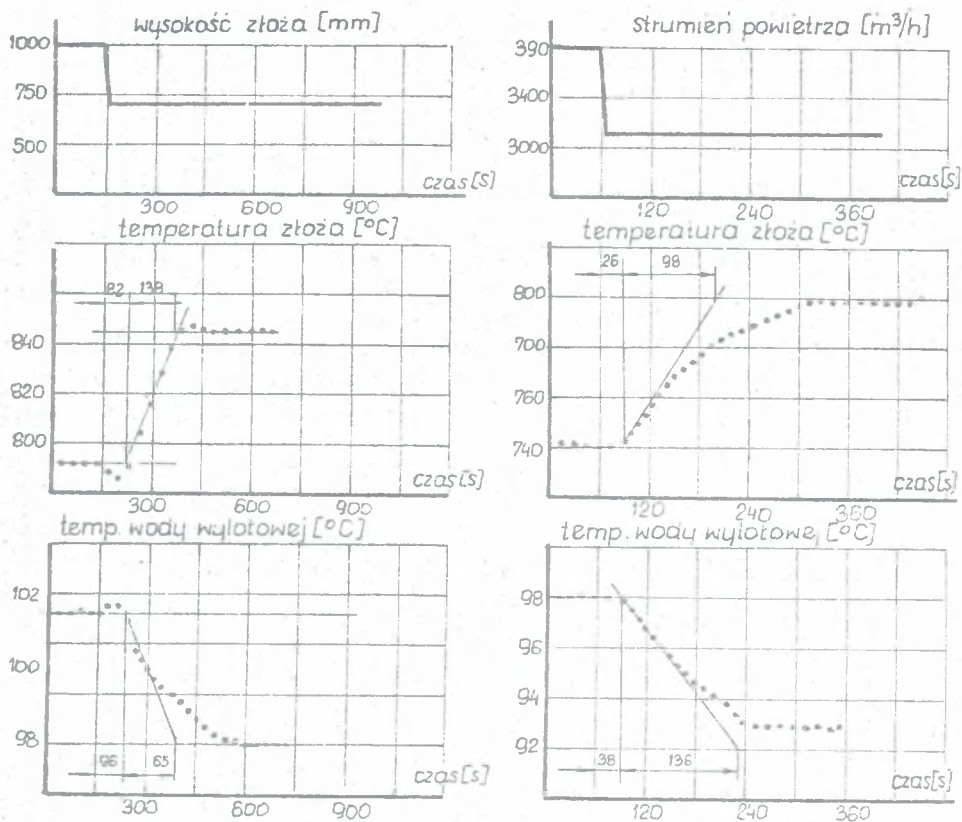


Warunki przed pomiarem:  
 wysokość złoża 600mm  
 strumień powietrza 3100m³/h  
 wartość opałowa węgla 14500kJ/kg  
 CO<sub>2</sub> w spalinach za kotłem 14,8%

Warunki przed pomiarem:  
 wysokość złoża 600mm  
 strumień węgla 670kg/h  
 wartość opałowa węgla 14500kJ/kg  
 CO<sub>2</sub> w spalinach za kotłem 14,8%

Rys. 4. Przykładowe przebiegi sygnałów wyjściowych po skokowej zmianie strumienia węgla oraz strumienia powietrza.

Fig. 4. Examples of Output signals functions of an abrupt change of coal and air mass flow rates.



Warunki przed pomiarem:

strumień węgla	740 kg/h
strumień powietrza	3100 m <sup>3</sup> /h
CO <sub>2</sub> w spalinach	15,8%
wartość opałowa węgla	16000 kJ/kg

Warunki przed pomiarem:

wysokość złoża	850 mm
strumień węgla	740 kg/h
CO <sub>2</sub> w spalinach	11,8%
wartość opałowa węgla	16000 kJ/kg

Rys. 5. Przykładowe przebiegi sygnałów wyjściowych po akokowej zmianie wysokości złoża i strumienia powietrza.

Fig. 5. Examples of output signals functions of an abrupt change of bed height and air mass flow rate.



Tablica 2. Średnie wartości wzmożenia, czasu martwego i stałej czasowej dla kotła zasilanego popiołem kasion.

Lp	odpowiedź wymuszenie	$K_{ij}$ [m]		$T_{oij}$ [s]		$T_{ij}$ [s]	
		temp. ziłoza $i = 1$	temp. wody wylotowej $i = 2$	temp. ziłoza $i = 1$	temp. wody wylot. $i=2$	temp. ziłoza $i = 1$	temp. wody wylotowej $i = 2$
1	zwiększenie strumienia węgla o 20% ; $j = 1$	0,46	0,06	78	90	186	207
2	Zmniejszenie strumienia węgla o 20% ; $j = 1$	0,45	0,03	96	114	234	270
3	Zwiększenie strumienia powietrza o 20% ; $i=2$	-0,07	0,003	16	26	69	90
4	Zwiększenie strumienia powietrza o 20% ; $i=2$	-0,04	0,004	20	30	84	121
5	Zmniejszenie wysokości ziłoza o 25% ; $j=3$	0,24	0,008	90	102	162	191

Tablica 3. Średnie wartości wzmożenia, czasu martwego i stałej czasowej dla kotła zasilanego ślimakiem do ziłoza [2] .

Lp	odpowiedź wymuszenie	$K_{ij}$ [m]		$T_{oij}$ [s]		$T_{ij}$ [s]	
		temperatura ziłoza	temperatura wody wylotowej	temperatura ziłoza	temperatura wody wylotowej	temperatura ziłoza	temperatura wody wylotowej
1.	zwiększenie strumienia węgla o 60%	0,203	0,016	12	36	90	180
2.	zmniejszenie strumienia węgla o 40%	0,128	0,013	24	33	105	180
3.	zwiększenie strumienia powietrza o 20%	-0,042	0,005	18	30	75	165
4.	zmniejszenie strumienia powietrza o 20%	-0,058	0,003	14	30	75	165

[m] - jednostki wynikają z rysunków 4 i 5.

w warunkach podobnych do tych, które zostały scharakteryzowane pod rys. 4 i 5.

Każdą z wartości uzyskano na podstawie co najmniej 4 przebiegów, przebiegi uzyskane w innych warunkach odrzucono. W tabelicy 3 zestawiono podobne wielkości na podstawie [2] uzyskane z badań tegoż kotła zasilanego ślimakiem bezpośrednio do złoża.

Z porównania wynika, że czasy  $T_0$  i  $T$  przy zmianach strumienia powietrza są w obydwu przypadkach tego samego rzędu. Stosunek stałej czasowej do czasu martwego będący pewną miarą regulacyjności /patrz np. [6] / jest w przypadku zmian strumienia powietrza większy od 3,5, co świadczy o średniej regulacyjności. Przy zmianach strumienia węgla wydłużeniu uległy czasy martwe i stałe czasowe, a stosunek  $T/T_0$  zmniejszył się z większego od 4,5 na mniejszy od 2,5, co świadczy o znacznym pogorszeniu się regulacyjności w torach od strumienia węgla i sprawia, że obiekt jest już trudny do regulowania.

Przebiegi sygnałów wyjściowych po zmianie strumienia węgla i strumienia, powietrza można z dobrym przybliżeniem opisać funkcją założoną /inercja I rzędu z opóźnieniem/. Tak więc mimo zgrubnego charakteru otrzymanej aproksymacji jest ona w tych przypadkach, nie wymagających dużej dokładności modelu, zupełnie wystarczająca.

W przypadku zmiany wysokości złoża założona funkcja do opisu przebiegów wyjściowych jest dużym uproszczeniem.

W tym wypadku mimo, że w tabelicy 2 podano parametry jak dla obiektu inercyjnego I rzędu z opóźnieniem należy pamiętać, że obiekt posiada cechy obiektu nieminimalnofazowego czyli transmitację typu

$$K/s/ = \frac{k e^{-T_0 s} / 1 - T_3 s /}{/1 + T_1 s / / 1 + T_2 s /} \quad /4/$$

Podsumowując można powiedzieć, że wprowadzenie kesonu do komory paleniskowej mającej na celu ułatwienie zasilania kotła węglem oraz zapewnienie lepszego wypalenia drobnych cząstek przez wydłużenie czasu ich pobytu w złożu, zwiększa jednocześnie czas martwy po zmianie strumienia węgla. Fakt ten wpływa niekorzystnie na regulacyjność kotła. Wprowadzenie kesonu nie ma wyraźnego wpływu na przebiegi wyjściowe po zmianie strumienia powietrza. Dla badanego kotła przebiegi wyjściowe po zmianie wysokości złoża mają charakter odpowiedzi skokowej obiektu nieminimalnofazowego.

## LITERATURA

- [1] Patent PRL nr 232869.
- [2] Kuraś St.: "Badania właściwości dynamicznych paleniska fluidalnego kotła WF 3,5 w Stacji Prób i Badań OBRKIUE przy KWK "Jewisz", Opracowanie CBKK nr arch. 8.1333, Tarnowskie Góry 1980 r.
- [3] Bereziński M.: "Wdrożenie do pracy układu centralnej rejestracji danych dla kotła WF 3,5". Opracowanie CBKK nr arch. 8.1497, Tarnowskie Góry 1982 r.
- [4] Świeślak J.: "Instalacja do pomiaru wysokości łoża fluidalnego". Opracowanie CBKK nr arch. 8.1585, Tarnowskie Góry 1983 r.
- [5] PN-83/M-53850
- [6] Gręda St.: "Podstawy automatycznej regulacji." PWSz, Warszawa 1972 r. ]

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОТЛА ВФ 3,5 С ПСЕВДООЖИЖЕННОЙ ТОПКОЙ,  
С УГЛЕПОДАЧЕЙ ЧЕРЕЗ КЕССОН РАСПОЛОЖЕННЫМ ПЕРИФЕРИЙНО  
В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

## Резюме

Для котла ВФ 3,5 с псевдоожигенной топкой, с углеподачей через кессон, произведено серию исследований заключаемых в регистрации изменений параметров в функции скачкообразных изменений потока угля, потока воздуха и высоты слоя. В реферате коротко охарактеризовано объект исследований и способ измерений. Сделано ряд положений дающих возможность приведения объекта к динамическому объекту с 3 входами и 2 выходами.

Для отдельных трактов предположено динамику в виду инерции 1 ряда с мертвом времени. На основании полученных временных характеристик сверено правильность положения. Среднее значения времени запаздывания, постоянной времени и усиления составлено в таблице. Временные характеристики наиболее близкие к средним изображено графически. Результаты сопоставлено с результатами подобных исследований тот же самого котла но с углеподачей питательным шнеком непосредственно в слой. Установлено, что после изменения высоты слоя выходные характеристики подобные на скачкообразные изменения объекта неминимальнофазового. Введение кессона в топку удлиняет мёртвое время после изменения потока угля и таким образом значительно ухудшает регулировочные свойства котла. Введение кессона не имеет отчётливого влияния на выходные характеристики после изменения потока воздуха.

DYNAMIC PROPERTIES OF FLUIDISED BED BOILER WF 3,5  
FED WITH COAL THROUGH A CAISSON INSTALLED PERIPHERALLY  
IN THE FURNACE CHAMBER

S u m m a r y

For the fluidised bed boiler WF 3,5 fed with coal through a caisson, a series of tests has been done consisting in recording the variations of some characteristic values caused by abrupt changes in the coal flow rate, air flow rate and the bed height. The paper briefly describes the tested installation and the measurement methods.

A number of assumptions have been made enabling to reduce it to a dynamic object of three inputs and two outputs.

For particular channels the dynamics in the form of inertia of the first order with dead time has been assumed. On the basis of obtained time functions, the accuracy of the assumption has been verified. Mean values of the amplification, the delay time and the time - constant, have been given in a tabular form. Time functions that are the closest to the mean values are presented graphically. The results have been compared to those of similar tests of the above mentioned boiler but fed with coal by means of a screw directly to the bed.

It has been found out that after having changed the bed height the output signal functions reveal a characteristic running below zero in the initial phase. Installing a caisson in the furnace chamber extends the dead time after the coal flow rate change and at the same time impairs to a great extent the boiler controlling processes.

Introducing of the caisson has not a significant influence on the output signal functions after a change in the air flow rate.

Recenzent: Prof. mgr inż. Piotr Orłowski

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.