

Włodzimierz WIŚNIEWSKI

Institut Energetyki - Warszawa

## ELASTYCZNOŚĆ INTERWENCYJNA PAROWYCH KOTŁÓW ENERGETYCZNYCH. WYNIKI BADAŃ

**Streszczenie.** Opisano wyniki badań elastyczności interwencyjnej kotłów na węgiel kamienny typu OP650-011 i na węgiel brunatny typu BB1150 do bloków 200 i 360 MW, pracujących w systemie Y1 ARCM. Określono uwarunkowane własnościami dynamicznymi tych kotłów parametry ich mocy interwencyjnej. Wyniki badań wykorzystano do skonstruowania w Elektrowni "Rybnik" prototypu urządzenia sterującego mocą interwencyjną KB według wytycznych określonych przez IEN przy współpracy z PDM. Uogólniono wyniki badań obydwu typów kotłów i określono ich elastyczność interwencyjną do wykorzystania w systemie interwencyjnej zmiany mocy KSE.

### Ważniejsze oznaczenia

- ARCM - automatyczna regulacja częstotliwości i mocy czynnej w systemie elektroenergetycznym;
- ARM - automatyczna regulacja mocy czynnej;
- BE, BE200 - blok energetyczny, blok energetyczny o mocy 200 MW;
- D - wydajność parowa;
- E - elastyczność;
- IZO - interwencyjna zmiana obciążenia;
- KB - kocioł blokowy;
- N - moc KB, moc BE;
- n - prędkość obrotowa podajników węgla;
- p - ciśnienie;
- PDM - Państwowa Dyspozycja Mocy;
- Pg - przegrzewacz pary kotłowej;
- pi - pasmo IZO;
- Q - obciążenie kotła;
- RC - regulator centralny PDM;
- SJ - system interwencyjny KSE;
- ST UP - stan techniczny urządzeń pomocniczych;
- t - temperatura;
- UAR - układ automatycznej regulacji;
- UTRT - system teletransmisji sygnałów regulacyjnych Y1, Y0 i sygnału interwencyjnego Y11;
- UZT - układ zabezpieczeń technologicznych KB i BE;
- v - szybkość;
- Y1, Y11 - sygnały szybkiej zmiany mocy BE regulacyjny (1), interwencyjny (11);
- $\epsilon$  - odchyłka regulacyjna;
- $\gamma$  - względna zmiana obciążenia;
- $\tau$  - czas;
- $\Delta H^s$  - pasmo zmiany poziomu wody w separatorze kotła;
- $\Delta p^s$  - pasmo zmian ciśnienia pary pierwotnej;
- $\Delta Q^s$  - zapas zmiany obciążenia KB wynikający z naprężeń termicznych w jego elementach kryterialnych;
- $\Delta t^s$  - pasmo zmian temperatury pary pierwotnej;
- $\Delta \delta_z^s$  - zapas różnicy temperatur w ścianie kryterialnego elementu KB;

$\rho$  - przeregulowanie;

#### Indeksy

a	- automatycznie	pp	- pary pierwotnej
b	- z badań	r	- ręcznie sterowana produkowana
c	- całkowita	rz	- rzeczywista
d	- dopuszczalne	s	- pasma, wynikowa
D	- parowa	sk	- skokowa
gr	- graniczna	t	- temperatury
i	- interwencyjna	z	- zapasu
k	- kotła	zn	- znamionowa
Ni	- mocy interwencyjnej	Yj	- sterowana w systemie Yj ARCM
Nsk	- mocy skokowej	$\frac{Yj}{Ni}$	- od względnej interwencyjnej zmiany mocy BE
ns	- sumarycznej prędkości obrotowej podajników węgla		
p	- ciśnienia		

Pozostałe oznaczenia objaśniono w tabeli 1.

## 1. WSTĘP

W latach 1987-1989 IED przeprowadził badania elastyczności interwencyjnej KB na węgiel kamienny typu OP650k i na węgiel brunatny typu BB1150 do bloków energetycznych BE200 i BE360 [1, 2]. Celem badań było: 1) ustalenie generalnej możliwości udziału wyżej wymienionych KB w systemie interwencyjnym (SJ) KSE; 2) wyznaczenie bezpiecznych dla urządzeń i optymalnych dla KSE parametrów mocy interwencyjnej BE200 i BE360 pracujących normalnie w systemie Y1 ARM (ARCM) [3].

Badania zrealizowano w ścisłej współpracy z PDM, Elektrownią "Rybnik" i Elektrownią "Belchatów". Wykorzystując wyznaczone z badań dla potrzeb ruchu, parametry mocy interwencyjnej KB i warunki ich pracy w KSE (system Y1 → system SJ → powrót do Y1) Elektrownia "Rybnik" skonstruowała urządzenie blokowe MCH-01 umożliwiające pracę BE200 w SJ. Urządzenie to zostało sprawdzone w warunkach ruchowych. Umożliwia ono uzyskanie pełnej skokowo-powolnej charakterystyki zmiany mocy interwencyjnej BE200 [4].

Potrzebę badań elastyczności interwencyjnej KB i BE wysunęła PDM dla: zaocbieżenia bądź ograniczenia awaryjnych dzieleń połączonych systemów elektroenergetycznych, zmniejszenia liczby nieplanowanych wyłączeń odbiorców energii i strat w przemyśle, przekraczających wielokrotnie koszt niedostarczonej energii oraz strat z nieplanowanej wymiany mocy z zagranicą [5]. Jako kryterium wyłączenia KB z pracy w systemie Y1 i włączenia do pracy w SJ przyjęto w PDM odstępstwo od planowanego salda wymiany mocy z zagranicą lub stan zagrożenia KSE wymagający wyłączenia linii międzysystemowych.

Również w innych krajach dąży się do wykorzystania elastyczności interwencyjnej KB i BE dla potrzeb systemu elektroenergetycznego [6], wiążąc w sam proces wspomaganie komputerowe [7] oraz konstruując urządzenia automatycznego systemu interwencyjnego [8].

## 2. WPROWADZENIE

Pod pojęciem elastyczności  $E_1$  interwencyjnej KB rozumie się jego zdolność  $Z_1$  interwencyjnego dostosowania własnej wydajności do zmiany obciążenia, wymaganej przez system interwencyjny (SJ) KSE. Zdolność tę opisuje zależność:

$$Z_{1KB} = f(Z_{rp}, Z_w, \Delta\sigma_{\text{synth}}, \varepsilon_{\text{UAR}}, p_D, t_D, H_w, t_{\text{mp-p}}, W_{\text{KSE,SJ}}, W_{\text{tch}}), \quad (1)$$

w której:

$$Z_{rp} = f(T_u + T_G, S_{\text{mw}}, \rho_{\text{ns}}, \rho_{\text{Ls}}, Q_w^r, \pi_{\text{mw}}, \gamma_D), \quad (2)$$

$$Z_w = f(V_w, G_m, V_D, \varphi_w, \Delta p_k, D_{\text{ko}}, p_o), \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{\text{synth}} = f(\Delta\vartheta_z, \gamma_D, \gamma_{\text{Dsk}}, v_{\text{ipsk}}) > 0. \quad (4)$$

$$\Delta\vartheta_z = f(\Delta\vartheta_{\text{rz}}, \Delta\vartheta_d, \varepsilon_{\text{UAR}}, p_D, t_D), \quad (5)$$

$$W_{\text{KSE,SJ}} = f(N_o, \Delta N_{\text{dys i}}, pr_{Y1}, pi, \tau_{\text{ci}}, \gamma_{\text{Nsk}}, \gamma_{\text{Ni}}, v_{\text{ipsk}}), \quad (6)$$

$$W_{\text{tch}} = f(STUP), \quad (7)$$

przy czym

$Z_{rp}$  - zdolność regulacyjna paleniska w parze przegrzanej, zależna od stałych czasowych opóźnienia  $T_u$  i rozbiegu  $T_G$  wydajności KB. Na wymienione stałe mają wpływ: rozwiązanie konstrukcyjne systemu młynowego  $S_{\text{mw}}$ , przeregulowanie prędkości obrotowej podajników węgla  $\rho_{\text{ns}}$  i powietrza do spalania  $\rho_{\text{Ls}}$ , wartość opałowa paliwa  $Q_w^r$ , zmniejszenie wydajności młynów na skutek wilgotności paliwa  $\pi_{\text{mw}}$  większej od normalnej oraz zakres względnej interwencyjnej zmiany  $\gamma_D$  wydajności KB;

$Z_w$  - zdolność sanowyrównawcza KB, na wielkość której mają wpływ: wrząca pojemność wodna  $V_w$ , masa metalu parownika  $G_m$  czynnego przy zmianie ciśnienia, pojemność parowa  $V_D$  kotła, udział wody w mieszaninie parowo-wodnej  $\varphi_w$ , stan początkowy parownika określony przez jego wydajność  $D_{\text{ko}}$  i ciśnienie wewnętrzne  $p_o$  oraz zmiana ciśnienia  $\Delta p_k$  w kotle;

$\Delta\sigma_{\text{synth}}$  - rozporządzalny na początku interwencji zapas naprężeń w krytycznych elementach KB zależny od zapasu różnicy temperatur  $\Delta\vartheta_z$  w ściankach tych elementów. Na zmniejszenie lub wyczerpanie  $\Delta\sigma_{\text{synth}}$  mają wpływ parametry interwencyjnej zmiany wydajności KB: względna całkowita  $\gamma_D$  i skokowa  $\gamma_{\text{Dsk}}$  zmiana wydajności oraz szybkość poskokowa  $v_{\text{ipsk}}$  zmiany obciążenia;

$\varepsilon_{\text{UAR}, p_D, t_D, H_w, t_{\text{mp-p}}}$  - odchyłki regulacyjne (w kolejności) ciśnienia i temperatury pary, poziomu wody w walozaku lub separatorze, temperatury mieszanki pyłowo-powietrznej za młynem;

$W_{\text{KSE,SJ}}$  - poprzedzające interwencje warunki pracy KB w KSE: moc początko-

wa  $N_0$ , dyspozycyjny zakres  $\Delta N_{dys}$  interwencyjnej zmiany mocy BE oraz pasmo  $pr_{Y1}$  regulacyjne BE w systemie regulacji ARM (ARCM), a także warunki pracy BE w SJ: pasmo interwencyjnej zmiany mocy  $pi$ , częstotliwość powtarzania się interwencji  $T_{oi}$  oraz parametry interwencyjnej zmiany mocy BE:  $V_{Ni}$ ,  $V_{Nsk}$ ,  $V_{ipsk}$ .

$W_{tech}$  - warunki techniczne (ST) określone aktualnym stanem technicznym urządzeń pomocniczych (UP) systemu dostarczenia i przygotowania paliwa i powietrza do spalania, systemu zasilania w wodę kotła i systemu schładzania temperatury pary przegrzanej.

### 3. METODA BADAŃ

Przystąpienie do badań obiektowych poprzedziły badania teoretyczne  $Z_1$  na podstawie podanego powyżej modelu elastyczności interwencyjnej KB. Dane do tego modelu opracowano z wyników badań kotłów OP650k i bloków BE200 [9] oraz z badań kotłów BB1150 i bloków BE360 [10]. Ustalono potrzebny do pomiarów zakres zmienności wartości parametrów charakterystyki interwencyjnej zmiany wydajności kotłów blokowych OP650-11 i BB1150 [11]. W badaniach obiektowych mierzono wielkości występujące w zależnościach równ. (1) do (7). Wykorzystano w tym poza innymi sygnały pomiarowe z bloku ograniczeń termicznych kotła (BOTK) dla określenia  $\Delta v_x^0$ , sygnały w UAR kotłów i urządzeń pomocniczych (dla określenia  $\xi$ ) oraz w UAR bloków (dla określenia parametrów zależności (6)). Szybkozmiennne sygnały pomiarowe zapisywano na aparaturze IEN, klasy 0,25 i 0,5, a wolnozmiennne na aparaturze elektrowni, klasy 0,5 i 1.

Interwencyjne zmiany wydajności KB i mocy BE sterowano:

- ręcznie zdalnie nastawnikiem poziomu mocy bloku i nastawnikiem szybkości zmiany mocy z pulpitu operatora BE,
- automatycznie, wykorzystując prototypowe rozwiązanie urządzenia MCH-01 do sterowania mocą interwencyjną BE200,
- automatycznie wykorzystując RC PDM, nadajnik UTRT, łącza i odbiorniki sygnałów regulacyjnych i telepoleceń obciążenia elektrowni DRTO-2 i bloku DRTO-1 oraz system UNIMAT regulacji obciążenia turbiny 18K960 bądź system RTFP regulacji obciążenia turbiny 13K215.

Nastawy UAR KB odpowiadały pracy BE w systemie  $Y1$  ARCM. Przeprowadzono od 30 do 60 interwencyjnych zmian obciążenia KB w przedziale mocy BE 85 do 100 %  $N_{zn}$  na każdym z wyżej wymienionych typów KB zmieniając parametry ich mocy interwencyjnej w zakresie: skokowa początkowa zmiana mocy od 3 do 8 %  $N_{zn}$ , szybkość poskokowa  $V_{ipsk}$  od 0,5 do 1,2 %/min, pasmo  $pi$  interwencyjnej zmiany mocy KB równe 8,35 %  $N_{zn}$  BE360 i 10 %  $N_{zn}$  BE200. W przypadku KB typu BB1150 badane pasmo  $pi_b$  było (tabela 1) równe pasmu szybkoj regulacji mocy w systemie  $Y1$  tj.  $pi_b = pr_{Y1}$ , a w przypadku KB OP650k  $pi_b > pr_{Y1} = 8$  %  $N_{zn} = 16$  MW. Różnice w badanych pasmach obydwu typów KB

wynikają z aktualnych warunkowań ruchowych.

TABELA 1

Warunki ogólne badań  $Z_{1KB}$

Wyszczególnienie	Oznaczenie Jednostka	Typ kotła parowego	
		OP650-011	BB1150
- moc początkowa kotła w IZO	$N_{oi}$ , MW	178 i 200	300, 330, 360
- typ młynów węglowych	mw -	MKM-33	N230.45
- ilość młynów węglowych czynnych w IZO	szt. -	4 (5)	6
- badane pasmo IZO	$pi_D$ , MW	20	30
- ruchowe pasmo IZO	$pi_{Y1}$ , MW	16	30
- początkowe ciśnienie pary pierwotnej	$p_{ppo}$ , MPa	13,3+13,4	17,8+18
- początkowa temperatura pary pierwotnej	$t_{ppo}$ , °C	535+540	530+535
- temperatura mieszanki pyłowo-powietrznej	$t_{mpp}$ , °C	<200	<200
- temperatura wody zasilającej kocioł	$t_{wz}$ , °C	236+240	250+255
- wartość opałowa paliwa	$Q_1^R$ , MJ/kg	14,6+19,1	6,85+8,15

W badaniach czynny był UZT. Zastosowano regułę stopniowego zwiększania parametrów mocy interwencyjnej  $\checkmark_{Nsk}$ ,  $\checkmark_{Ni}$ ,  $V_{ipsk}$  przy tym samym  $pi$ . Badania  $E_1$  na danym HE uznano za zakończone po przyjęciu wstępnym wyników przez elektrownie i PDM i wskazaniu przez IEn na dopuszczalne w ruchu parametry interwencyjnej zmiany mocy KB.

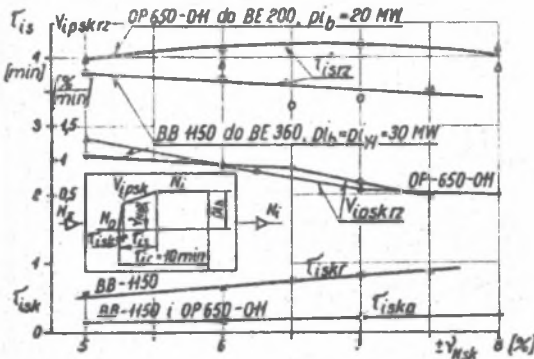
#### 4. WYNIKI BADAŃ

Parametry interwencyjnej zmiany obciążenia krajowych kotłów blokowych OP650k i BB1150.

Pasmo  $pi$  obydwu typów kotłów może wynosić 10 %  $N_{zn}$  według badań modelowych [11] oraz badań obiektowych KB OP650-011 z wykorzystaniem urządzenia MCH-O1 modelującego charakterystykę 10 % zmiany mocy [4]. Ruchowe wykorzystanie  $Z_1$  obydwu kotłów pracujących w systemie Y1 szybkiej zmiany mocy jest według uzgodnień z PDM ograniczone do pasma regulacji w tym systemie ( $pr_{Y1}$ ), tj. odpowiednio do 16 MW i 30 MW. W obecnym stanie KSE lioczy się szczególnie skokowe zwiększenie mocy BE w chwili zainicjowania interwencji przez RC PDM.

Z analizy pomierzonych w IZO zmian parametrów prezentowanych w równaniach: (2), (4), (5) i (7) wynika, że właściwym skokiem obciążenia inter-

wencyjnego dla KB OP650k jest  $\gamma_{Nsk} = 6\%$ , dla BB1150 -  $\gamma_{Nsk} = 7\%$ , a właściwą szybkością poskokową zmiany obciążenia  $V_{ipsk} = 0,9\%/min$  i  $0,7\%/min$ . W analizie uwzględniono wpływ  $V_{ipsk}$  na:  $\Delta\Delta Q_{\text{dthz}}$ ,  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_H$ ,  $\epsilon_{pp}$ , warunki statecznej pracy UAR KB i BE oraz niezbędny zapas BP na nastaw<sup>pp</sup> zaworów, stacji bezpieczeństwa i parametrów UZT. Czas  $\tau_{is}$ , rys.1, osiągnięcia pełnej zmiany obciążenia  $\gamma_{Ni}$  KB zależy głównie od  $Z_{rp}$  (równ. (2)),  $Z_w$  (równ. (3)) oraz od ST UP (równ. (7)).



Rys.1. Parametry elastyczności interwencyjnej KB w zależności od początkowego skoku obciążenia  $\gamma_{Nsk}$

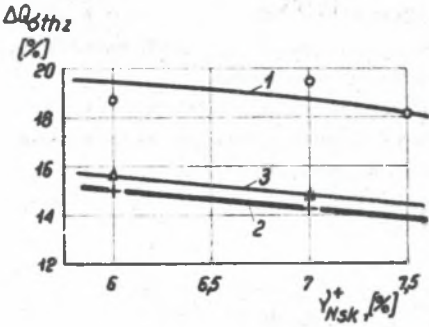
Fig.1. Parameters of emergency flexibility of unit boilers KB vs initial load step  $\gamma_{Nsk}$

Wymienione zdolności KB decydują o dopuszczalnym początkowym skoku obciążenia  $\gamma_{Nsk}$  i dopuszczalnej szybkości poskokowej  $V_{ipsk}$  i w wyniku o  $\tau_{is}$ . Czyste opóźnienia procesu technologicznego w układzie: kocioł, turbina i generator i niezbędny czas na przestawienie urządzeń nastawczych (zaworów regulacyjnych) na nowy poziom obciążenia ograniczają największą szybkość skokowej zmiany mocy  $\gamma_{Nsk}$  do  $1\% N_{zn}/2$  s i czasu  $\tau_{isk}$ , przy sterowaniu mocą interwencyjną przez RC PDM bądź urządzenie MCH-01, do wartości realnej  $\tau_{iska} = 12$  do  $20$  s. Sterowanie  $N_i$  nastawnikiem z pulpitu operatora BE zwiększa  $\tau_{isk}$  do wartości  $\tau_{iskr} = 40$  do  $70$  s w zależności od umiejętności operatora. Czas  $\tau_{is}$  osiągnięcia docelowego poziomu obciążenia interwencyjnego  $N_i$  przy sterowaniu przez RC PDM jest dla obydwu typów kotłów poniżej  $4$  min, a przy ograniczeniu pi do  $pi_{\gamma 1}$  - poniżej  $3,5$  min w zakresie ustalonych przez IEn  $\gamma_{Nsk} = 6\%$  dla OP650k i  $7\%$  dla BB1150. Określone z badań czasy  $\tau_{isk}$  i  $\tau_{is}$  wskazują na pełną przydatność KB obydwu typów do pracy w SJ KSE. Czas ponownej interwencji w zakresie  $pi_{\gamma 1}$  nie powinien być mniejszy niż  $\tau_{ic} = 10$  min.

Oddziaływanie interwencyjnej zmiany obciążenia KB na parametry stanu technicznego jego elementów i parametry regulowane przez UAR

IZO a parametry ST. Wykorzystanie elastyczności interwencyjnej w za-

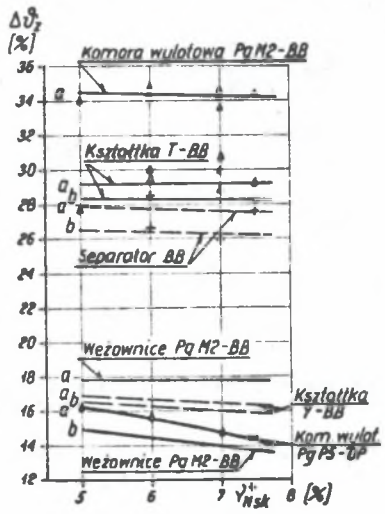
kresie ustalonym z badań dla potrzeb eksploataowania w SJ kotłów OP650k i BB1150 ( $p_{ib} = 20 \text{ MW}$  i  $30 \text{ MW}$ ,  $\gamma_{Nsk} = 6\%$  i  $7\%$ ,  $V_{ipsk} = 0,9\%$  i  $0,7\%$  /min) nie wyczerpuje ich pełnej zdolności interwencyjnej. Stan naprężeń termicznych w elementach kryterialnych tych KB jest dopuszczalny, rys. 2. Pozostawienie małego zapasu  $\Delta Q_{6thz}$  jest potrzebne z uwagi na nieprzewidziane losowe zakłócenia w pracy układów nawęglania i mlynowo-paleniskowych (zakłada się pracę interwencyjną bez użycia palników olejowych).



Rys. 2. Zapas na dołączenie KB powyżej obciążenia interwencyjnego dla BB1150: przy sterowaniu IZO przez RC PDM (1) i przez operatora BE (2); dla OP650-011 przy sterowaniu urządzeniem DCH-01 (3); warunki badań - rys. 1 i tabela 1

Fig. 2. Load margin of KB above emergency load: for BB1150: emergency load change IZO controlled by RC PDM (1) and by BE operator (2); for OP650-011: control executed by a DCH-01 device conditions of investigations (3) - see Table 1 and Fig. 1

Największy ujemny wpływ na  $\Delta Q_{6thz}$  w warunkach IZO ma (rys. 3) stan naprężeń w elementach przegrzewaczy pary ( $P_g$ ) i w kształtkach Y rurociągów WP.



Rys. 3. Najmniejszy zapas  $\Delta T$  kryterialnej dla naprężeń cieplnych różnicy temperatur w elementach KB podczas IZO BB - kocioł BB1150, OP - kocioł OP650-011, (a - sterowanie IZO przez RC PDM), b - sterowanie IZO przez operatora BE warunki badań - rys. 1 i tabela 1

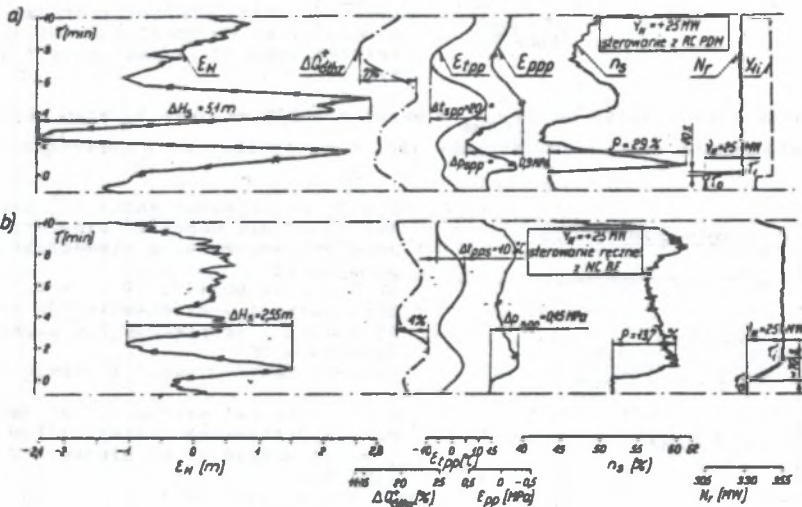
Fig. 3. Minimal margin  $\Delta T$  of temperature difference criterial for thermal stress in KB elements during IZO BB - a BB-1150 boiler, OP - an OP 650-011 boiler, (a - IZO controlled by RC PDM), b - IZO controlled by BE operator conditions of investigations - see Table 1 and Fig. 1

Zarówno temperatura rur ekranów komory paleniskowej, jak i węzwnio prze-grzewaczy były dopuszczalne. Stosowana w praktyce ruchowej kontrola szybkości zmiany temperatury pary pierwotnej i wtórnej za kotłem oraz szybkości zmiany temperatury metalu komór zbiorczych wylotowych stopni prze-grzewaczy pary ustaliła brak przekroczeń wartości dopuszczalnych.

#### IZO a parametry regulowane procesów kotłowych

Proces wytwarzania ciepła w KB. Temperatura mieszanki pyłowo-powietrznej za młynami, obciążenie silników młynów węglowych, temperatury uzwojeń silników młynów nie przekraczały wartości dopuszczalnych podanych w instrukcji eksploatacji każdego z badanych typów kotłów.

Proces uzyskiwania wydajności i parametrów pary KB. Podczas dociążania KB w IZO występuje na początku spadek ciśnienia i spadek temperatury pary pierwotnej, a następnie gasnąca oscylacja zarówno ciśnienia  $p$  jak i temperatury  $t$  pary, wokół wartości zadanych, rys. 4.



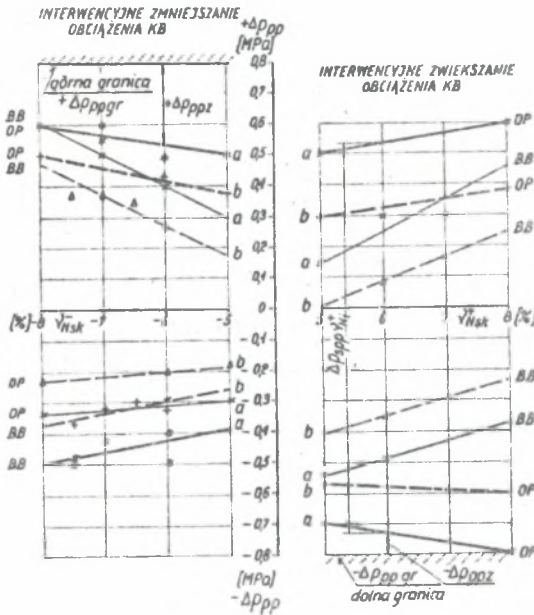
Rys. 4. Przebieg parametrów elastyczności interwencyjnej KB BB1150 podczas IZO o +25 MW sterowanej a) przez RC PDM i b) przez operatora BE

Fig. 4. Time history of emergency flexibility parameters of KB BB1150 during IZO of +25 MW, controlled by: a) RC PDM, b) BE operator

UAR starają się nie dopuścić do przekroczenia granicznych wartości zarówno  $p$ , jak i  $t$ , co pociągnęłoby uruchomienie UZT kotła i BE. Dolną graniczną wartość  $p_{pp}$  wyznacza wartość nastawy zadziałania parowego ogranicznika mocy, górną - zaworów bezpieczeństwa lub ciśnieniowych stacji zabezpieczających. Dla  $t_{pp}$  górna wartość graniczna jest jednakowa dla badanych kotłów blokowych, równa  $555^{\circ}\text{C}$ . Zabezpiecza ona wirnik turbiny pary-



wej przed uszkodzeniem. Dolna graniczna wartość  $t_{pp}$  jest poza zasięgiem zmian temperatury pary występujących w warunkach IZO. Zakres zmian  $p$  i  $t$  tworzy pasmo zmian (rys.5), od którego zależy ubytek żywotności (trwałości) eksploatacyjnej grubościennych elementów kotła [4]. Dopuszczalne pasmo zmian  $\Delta p_p$  i  $\Delta p_t$  muszą uwzględniać stateczną pracę UAR.

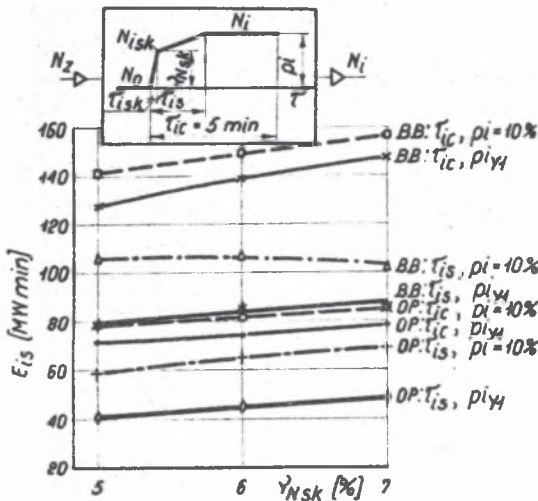


Rys.5. Zmiany ciśnienia  $\pm \Delta p_{pp}$  pary pierwotnej podczas badań elastyczności interwencyjnej KB. Objaśnienia oznaczeń i warunki badań jak na rys.3 oraz  $p_{zOP} = 12,5$  MPa,  $p_{zBB} = 17,8$  MPa,  $p_{maxzOP} = 13,53$  MPa,  $p_{maxzBB} = 19,1$  MPa  $\pm \Delta p_{ppz}$  - zapas zmiany ciśnienia na ruchome zakłócenia pracy paleniska, linie ciągłe - wartości maksymalne zmian ciśnienia (a), linie przerywane - wartości średnie zmian ciśnienia (b)

Fig.5. Live steam pressure changes  $\pm \Delta p_{pp}$  during KB emergency flexibility investigations. Conditions of investigations and denotations as for Fig.3, and:  $p_{zOP} = 12,5$  MPa,  $p_{zBB} = 17,8$  MPa,  $p_{maxzOP} = 13,53$  MPa,  $p_{maxzBB} = 19,1$  MPa,  $\pm \Delta p_{ppz}$  - pressure change margin for random operational disturbances in combustion chamber continuous lines - maximum values of pressure change (a) broken lines - average values of pressure change (b)

Z zależności maksymalnych odchyłek i pasm ciśnienia, rys.5, od skokowego interwencyjnego przyrostu obciążenia  $\gamma_{Nsk}^+$  wynika, że nie powinien on przekraczać +7%, żeby KB mógł mieć jeszcze zapas na obniżenie ciśnienia w przypadkach losowych niesprawności (zakłóceń) urządzeń pomocniczych. Dla elastycznych kotłów BB1150 na węgiel brunatny  $\gamma_{Nsk} = 7\%$  jest również wartością dopuszczalną. Dla mniej elastycznych kotłów typu OP650k na węgiel kamienny (większe stałe czasowe opóźnień i rozbiegu [12])  $\gamma_{Nsk}$  nie powinna przewyższać 6%. Również pozostałe analizowane parametry pracy w IZO kotłów OP650-011 i BB1150 wewnątrz regulacyjnego pasma interwencji  $p_{iY1}$  i wyznaczonych  $\gamma_{Nsk} = 6\%$  i  $7\%$  (w tym poziom wody w separatorze i walczaku) posiadają wartości dopuszczalne.

Wyniki końcowe badań. Elastyczność interwencyjną  $E_{is}$  określono wartościowo z pola pod krzywą przebiegu w czasie  $\tau$  mocy interwencyjnej  $N_i$  i wyrażono w jednostkach MW min. Zależność  $E_{is} = f(\gamma_{Nsk})$  zbadanych KB przedstawiono na rys.6 w trzech wariantach: a) dla pracy w SJ według warunków badań ( $pi_D, \tau_{is}$ ), b) dla pracy w SJ w paśmie interwencyjnym równym pasmu regulacji mocy w systemie Y1 ( $pi_{Y1}, \tau_{is}$ ), c) dla czasu trwania interwencji  $\tau_{ic} = 5$  min i pracy w  $pi_{Y1}$ . Z przebiegu przedstawionych zależności wynika, że powiększenie  $\gamma_{Nsk}$  o 1% zwiększa elastyczność interwencyjną KB tylko o 3,6% (OP650k) do 5,3% (BB1150).



Rys.6. Elastyczność interwencyjna zbadanych KB. Warunki badań patrz rys.1,2, 3,5 i tabela 1

Fig.6. Emergency flexibility of investigated KB. For conditions of investigations see Figs.1,2,3 and 5 and Table 1

Elastyczność interwencyjna  $E_{is}$  kotłów BB1150 jest wyższa o 86% od elastyczności kotłów OP650k, gdy czas trwania interwencji  $\tau_{ic} \geq 5$  min a przyrost mocy interwencyjnej  $N_i$  jest równorzędny wartości  $pi = pr_{Y1}$ . Elastyczność ta wynosi 147 MW min dla zaleconych z badań wartości parametrów mocy interwencyjnej ( $\gamma_{Nsk} = 7\%$ ,  $pi = pi_{Y1}$ ,  $V_{ipsk} = 0,7 \%$ /min). Jednostkowa elastyczność interwencyjną  $E_{isj}$  kotła BB1150 (tj. odniesiona do znamionowej mocy KB) jest wyższa tylko o 3,5% od tejże dla kotła OP650-011.

## 5. WNIOSKI

- Opracowana w IEn metoda badań i wykonane badania obiektowe elastyczności interwencyjnej krajowych kotłów blokowych (KB) przy czynnym udziale zespołów Elektrowni "Rybnik", Elektrowni "Bełchatów" i PDM umożliwiły osiągnięcie pozytywnych rezultatów uzasadniających celowość włączenia bloków energetycznych (BE) z kotłami OP650k i BB1150 do systemu interwencyjnego KSE.

2. Dobrane w badaniach modelowych i eksperymentalnych profil i parametry zmiany obciążenia interwencyjnego KB zapewniają bezpieczne dla urządzeń BE i stateczne dla pracy UAR wykorzystanie elastyczności interwencyjnej KB w pełnym zakresie pasm regulacyjnych mocy BE w systemie Y1 ARCM.
3. Elastyczność interwencyjna zbadanych KB do BE200 i BE360 umożliwia skokową zmianę ich mocy odpowiednio o 6% i 7%  $N_{zn}$  oraz pełną zmianę mocy w zakresie pasma regulacyjnego Y1 w ciągu 3,5 do 4 min i utrzymanie trwale nowego poziomu mocy. Parametry te spełniają wymagania systemu interwencyjnego PDM.

## LITERATURA

- [1] Wiśniewski W.: Badania elastyczności interwencyjnej bloku 200 MW na węgiel kamienny. Energetyka 1989, nr 9.
- [2] Wiśniewski W.: Badania elastyczności interwencyjnej bloku 360 MW na węgiel brunatny. Instytut Energetyki 1990.
- [3] Wiśniewski W.: Zdolność krajowych kotłów blokowych do udziału w ARCM, ARM i ERO SE. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria "Energetyka" nr 94, Gliwice 1986.
- [4] Wiśniewski W., Grzesik Cz.: Badania prototypowego urządzenia MCH-01 do sterowania mocą interwencyjną bloku 200 MW na węgiel kamienny w Elektrowni Rybnik. Energetyka 1989, nr 11.
- [5] Rudnicki B., Piotrowski J.: Funkcja centralnego układu sterowania mocą czynną bloków energetycznych w układzie ARCM, zainstalowanego w Państwowej Dyspozycji Mocy. PDM, Warszawa 1988.
- [6] Toğuşov J., Hertel U.: Bereitstellung schnell mobilisierbarer Wirkleistung durch Entnahmekondensationsturbinen. Energietechnik 1988, nr 9.
- [7] Fukert H.: Mikrorechnereinsatz zur schnellen Mobilisierung von Wirkleistung an Entnahmekondensationsturbinen. Energietechnik 1988, nr 9.
- [8] Marschner H.H.: Regelungstechnische Lösung zur Einbeziehung von Entnahmekondensationsturbinen in die Wirkleistungssteuerung des Elektroenergiesystems. Energietechnik 1988, nr 9.
- [9] Wiśniewski W., Maksymienko K., Sowiński A.: Technologiczne warunki pracy bloków 200 MW na węgiel kamienny w systemie ARCM. Energetyka 1976, nr 9.
- [10] Wiśniewski W.: Badania mocy regulacyjnej i technologicznych warunków pracy bloku 360 MW na węgiel brunatny. Energetyka 1985, nr 3.
- [11] Wiśniewski W.: Wybrane zagadnienia z eksploatacji parowych bloków energetycznych w krajowym systemie elektroenergetycznym. VI Krajowe sympozjum eksploatacji urządzeń technicznych. PAN SPEKEM. Jastrzębia Góra 1989.
- [12] Wiśniewski W., Świrski J., Charzyński W.: Regulacyjność źródeł wytwarzania, stan obecny i przedsięwzięcia stanu regulacyjności krajowych ciepłych bloków energetycznych. Instytut Energetyki 1983.

## ИНТЕРВЕНЦИОННАЯ ЭЛАСТИЧНОСТЬ ПАРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Р е з ю м е

Описаны результаты проведенных в рамках СРВР I3.2 через ИЭи в 1987-1989гг. исследований интервенционной эластичности ( $\epsilon_{1кв}$ ) отечественных паровых котлов (кв) типа ОР-650-011 работающих на каменном угле в энергетическом блоке (вб) мощностью 200 МВт в электростанции Рыбник и типа вв-1150 на буром угле (вб) мощностью 360 МВт в электростанции Белхатув, работающих в системе  $\gamma_1$  АРМ (АРЦМ) отечественной энергетической системы (КЭЕ).

Представлено понятие эластичности  $\epsilon_{1кв}$  и способности  $Z_{1кв}$  интервенционного приспособления кв к изменению нагрузки требуемой интервенционной системой (СИ) КЭЕ, как и понятие составных элементов этой способности. Определены важнейшие параметры работы и параметры технического состояния кв от которых зависит интервенционная способность кв. Исследования  $\epsilon_{1кв}$  проведены по требованию Государственного Диспетчерского Управления в пределе мощности вб 85 до 100%, изменяя нагрузку на ширину регулировочной полосы мощности  $\gamma_1$  и на 10% с начальной скоростью близкой к скачкообразной 0,5 до 1% /с в области 3 до 8% и далее со скоростью 0,5 до 1,2%/min. После достижения целевого уровня мощности был он поддерживан в течение 6 до 6,5 min. Целью исследований было определение полезности участия кв в СИ и оценка их вклада в предупреждение или ограничение аварийного деления объединённой энергетической системы и аварийных отключений потребителей энергии. В результате расчетов и экспериментальных исследований:

- 1/ определены оптимальные для КЭЕ параметры интервенционной мощности котла вв-1150 (скачок нагрузки  $\Delta_{Nsk} = 7\%$ , скорость после скачка  $V_{ipsk} = 0,7\%/min$ , полоса интервенции  $p_i = 30$  мв) и котла ОР-650-011 ( $\Delta_{Nsk} = 6\%$ ,  $V_{ipsk} = 0,9\%/min$ ,  $p_i = 16$  мв)
- 2/ запроектировано и изготовлено (электростанция Рыбник), а также проверено (Институт Энергетики) на вб 200 мв установку типа мсн-01 до управления интервенционной мощностью вб
- 3/ проводятся работы по внедрению СИ на восьми вб в электростанции Рыбник
- 4/ ведутся работы над системой установок управляющих интервенционной мощностью котлов вв-1150 и блоков 360 МВт в электростанции Белхатув.

Emergency flexibility of steam power-generating boilers. Results of investigations

#### Summary

The paper contains the description of investigations, performed by Institute of Power Engineering between 1987 and 1988 as a part of CPBR 13.2 P & D programme, in order to evaluate emergency flexibility ( $E_{ikb}$ ) of Polish-made steam boilers (K&B) OP-650-011, fired with hard coal, for power-generating units (BE) of 200 MW in Rybnik power station, and BB-1150, fired with brown coal, for BE of 360 MW in Bełchatów power station, operating in Y1 APM (ARCM) system of domestic power system (KSE). The terms of  $E_{ikb}$  and  $Z_{ikb}$ , the latter denoting an ability to follow load changes demanded by emergency system (SJ) of KSE, have been specified, as well as their individual components. The most important parameters of operation and technical condition of KBs, upon which their emergency flexibility depends, have been specified. Investigations of  $E_{ikb}$  have been ordered by State Power Command Board within the range from 95 % to 100 % of BE rated power, with load changes corresponding to the control bandwidth Y1 and of 10 %, with initial near-step rate of 0.5 - 1 %/s from 3 to 8 %, then with step rate of 0.5 - 1.2 %/min, and finally maintaining emergency power on constant level for 6 to 6.5 minutes. The aim of these investigations was to estimate suitability of KBs to participate in SJ and to evaluate their contribution to avoiding or minimizing emergency partition of joint electric power systems and emergency trip-outs. As a result of calculations and investigations: 1) optimal for KSE parameters of a BB-1150 boiler emergency power have been evaluated as: (load step  $\nu_{Nsk} = 7\%$ , step rate  $V_{1psk} = 0.7\%$ /min, emergency bandwidth  $\pi = 30$  MW) and for an OP-650-11 boiler respectively: ( $\nu_{Nsk} = 6\%$ ,  $V_{1psk} = 0.9\%$ /min and  $\pi = 16$  MW); 2) a MCH-01 device for emergency power control has been designed and built (by Rybnik power station) and tested (by IEn); 3) work is under way on emergency system implementation on eight BEs in Rybnik power station; 4) a set of emergency power control devices is being designed for BB-1150 boilers and 360 MW units in Bełchatów power station.