

Maciej Pawlik*, Andrzej Oziemski*

POPRAWA SPRAWNOŚCI BLOKÓW 370 MW OPALANYCH WĘGLEM BRUNATNYM

1. Wstęp

Zwiększenie sprawności bloku 370 MW jest możliwe do uzyskania na drodze wielokierunkowych działań, o różnym stopniu (głębokości) modyfikacji układów technologicznych oraz modernizacji urządzeń. W przeprowadzonych badaniach uwzględniono: zwiększenie parametrów początkowych obiegu cieplnego, obniżenie jego parametrów końcowych, optymalizację układu regeneracyjnego podgrzewu wody zasilającej, modernizację kotła i turbiny, optymalne wykorzystanie ciepła spalin wylotowych, optymalizację układu potrzeb własnych oraz optymalizację układu ciepłowniczego.

Do oceny efektywności ekonomicznej proponowanych przedsięwzięć posłużono się tzw. metodą „nie wprost”, polegającą na ocenie „dopuszczalnego” przyrostu nakładów inwestycyjnych na określoną modernizację, przy niezmiennym jednostkowym koszcie wytwarzania energii elektrycznej. Takie postępowanie jest uzasadnione spodziewanymi rozbieżnościami w szacowaniu niezbędnych nakładów inwestycyjnych, z uwagi choćby na nietypowe i niespotykane dotąd w kraju rozwiązania.

Zgodnie z powyższą metodą dodatkowe jednostkowe nakłady inwestycyjne Δk_i , mające na celu zwiększenie sprawności bloku od wartości początkowej η_{bn1} do wartości η_{bn2} , można określić z zależności:

$$\Delta k_i = \frac{0,123 \cdot c_b \cdot T_{pi}}{(r + r_e)} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{bn1}} - \frac{1}{\eta_{bn2}} \right), \text{ zł/kW}$$

gdzie:

c_b — cena paliwa umownego, zł/kg p.u.;

T_{pi} — czas użytkowania mocy zainstalowanej, h/a;

* Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka, Łódź

$(r + r_e)$ — współczynnik zwrotu kapitału i współczynnik stałych kosztów eksploatacyjnych, 1/a;

η_{bn1}, η_{bn2} — sprawności bloku netto przed i po modernizacji.

W przypadku bloków 370 MW elektrowni „Bełchatów” za punkt wyjścia do dalszych analiz porównawczych, przyjęto dane wynikające ze schematu bilansowego, sporządzonego dla 100% obciążenia bloku [3]. Na tej podstawie przeprowadzono w kolejności obliczenia sprawności energetycznej (termodynamicznej) obiegu η_{oe} , przy wykorzystaniu opracowanego w Instytucie Elektroenergetyki PŁ programu komputerowego (rys. 1).

p1= 17.65 MPa	t1= 535.0°C	h1= 3379.1 kJ/kg	s1= 6.37 kJ/(kg·K)							
pm= 4.00 MPa	tm= 535.0°C	hm1= 3043.8 kJ/kg	sm= 7.19 kJ/(kg·K)							
pk=0.00682 MPa	tk= 38.5°C	hm= 3525.9 kJ/kg								
	s1k= 0.55 kJ/(kg·K)	s2k= 8.28 kJ/(kg·K)								
	h1k= 161.3 kJ/kg	h2k= 2570.9 kJ/kg								
j	pu	tu	hu	su	tnu	pw	tw	hw	eta	x
1	4.4800	335.4	3043.8	6.46	257.2	20.90	252.7	1099.2	0.865	1.000
2	2.1400	439.3	3332.5	7.22	215.8	20.90	214.3	924.2	0.910	1.000
3	1.0800	340.8	3136.9	7.23	183.3	1.08	181.3	768.8	0.960	1.000
4	0.5460	261.9	2984.4	7.28	155.2	1.08	154.2	650.7	0.870	1.000
5	0.3140	204.9	2875.4	7.31	135.1	1.08	131.6	553.7	0.865	1.000
6	0.1060	104.9	2685.2	7.36	101.2	1.08	96.2	404.0	0.915	1.000
7	0.0382	74.8	2552.2	7.45	74.8	1.08	68.8	288.7	0.810	0.965
k	0.0068	38.5	2367.5	7.63	38.5	0.007	38.5	161.3	0.765	0.916
pwz= 20.9 MPa twz= 252.7°C tnwz= 369.4°C hwz= 1099.2 kJ/kg										
hr= 3332.5 kJ/kg para tr= 439.3°C mu2= 13.79 kg/s										
pwz= 20.9 MPa twz= 252.7°C tnwz= 369.4°C hwz= 1099.2 kJ/kg										
etaoe = 45.93%										

Rys. 1. Wyniki obliczeń bazowej sprawności obiegu cieplnego bloku 370 MW

Wykorzystując obliczoną w ten sposób wartość $\eta_{oe} = 45,93\%$ oraz uwzględniając sprawności poszczególnych urządzeń, tj.: elektromechaniczną turboszespołu $\eta_{em} = 97,8\%$, kotła $\eta_k = 88\%$, rurociągów $\eta_r = 98\%$, a ponadto pobór mocy na potrzeby własne $\epsilon = 0,073$, otrzymano w efekcie bazową wartość sprawności netto bloku 370 MW na poziomie $\eta_{bn} = 35,9\%$ [3].

Wprowadzie rzeczywiste sprawności eksploatacyjne poszczególnych bloków elektrowni „Bełchatów” odbiegają od tak określonej wartości bazowej, a ponadto różnią się także między sobą, to jednak typowo porównawczy charakter przeprowadzonych analiz (określających różnice wyrażone w punktach procentowych w stosunku do przyjętego układu odniesienia) oraz brak jednoznacznego kryterium co do wyboru któregośkolwiek bloku potwierdzają celowość przyjętego toku postępowania.

2. Zwiększenie parametrów początkowych pary

Zasadniczym źródłem poprawy sprawności bloku jest podwyższanie parametrów początkowych jego obiegu wodno-parowego. Według [1] osiągalny przyrost sprawności bloku

wynosi ok. 0,5% na każde 10°C wzrostu temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej oraz tylko 0,2% na każdy 1,0 MPa wzrostu ciśnienia początkowego. Ponieważ zwiększanie ciśnienia daje stosunkowo nieznaczny przyrost sprawności, a ponadto powoduje istotny wzrost grubości ścianek (masy) całego traktu ciśnieniowego kotła oraz wzrost pracy pompowania wody zasilającej, to w przeprowadzonej analizie ograniczono się do oceny celowości zwiększenia temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej o ok. 20÷25°C, tj. z obecnego poziomu 535/535°C do 560/560°C, czyli do poziomu opanowanego na świecie już od wielu lat dzięki zastosowaniu nowych gatunków stali martenzytycznych — przy jednoczesnym zachowaniu ciśnienia początkowego na nie zmienionym poziomie, tzn. 17,6 MPa.

Możliwość takiej modernizacji bloku 370 MW potwierdzają przeprowadzone przez autorów konsultacje z producentem kotła, firmą RAFAKO z Raciborza, oraz wytwórcą turbin, firmą ALSTOM z Elbląga.

Wykonane, przy tak określonych parametrach, obliczenia (rys. 2) wykazały wzrost sprawności energetycznej obiegu do $\eta_{oe} = 46,45\%$ (a więc o 0,52 pkt.% w stosunku do wartości bazowej), co skutkuje bezpośrednio wzrostem sprawności bloku netto do $\eta_{bn} = 36,32\%$ — a to oznacza jej bezwzględny przyrost o $\Delta\eta_{bn} = 0,42$ pkt.% oraz względny przyrost o $\delta\eta_{bn} = 1,17\%$.

p1= 17.65 MPa	t1= 560.0°C	h1= 3450.3 kJ/kg	s1= 6.46 kJ/(kg·K)							
pm= 4.00 MPa	tm1= 356.4°C	hm1= 3098.3 kJ/kg								
pk=0.00682 MPa	tk= 38.5°C	hm= 3583.1 kJ/kg	sm= 7.26 kJ/(kg·K)							
	s1k= 0.55 kJ/(kg·K)	s2k= 8.28 kJ/(kg·K)								
	h1k= 161.3 kJ/kg	h2k= 2570.9 kJ/kg								
j	pu	tu	hu	su	tnu	pw	tw	hw	eta	x
1	4.4800	356.4	3098.3	6.54	257.2	20.90	252.7	1099.2	0.865	1.000
2	2.1400	462.2	3383.0	7.29	215.8	20.90	214.3	924.2	0.910	1.000
3	1.0800	361.2	3180.4	7.30	183.3	1.08	181.3	768.8	0.960	1.000
4	0.5460	280.2	3022.4	7.35	155.2	1.08	154.2	650.7	0.870	1.000
5	0.3140	221.5	2909.5	7.38	135.1	1.08	131.6	553.7	0.865	1.000
6	0.1060	118.1	2712.2	7.43	101.2	1.08	96.2	404.0	0.915	1.000
7	0.0382	74.8	2577.1	7.52	74.8	1.08	68.8	288.7	0.810	0.975
k	0.0068	38.5	2390.4	7.70	38.5	0.007	38.5	161.3	0.765	0.925
pwz= 20.9 MPa		twz= 252.7°C	tnwz= 369.4°C	hwz= 1099.2 kJ/kg						
hr= 3383.0 kJ/kg para		tr= 462.2°C	mu2= 13.56 kg/s							
pwz= 20.9 MPa		twz= 252.7°C	tnwz= 369.4°C	hwz= 1099.2 kJ/kg						
etaoe= 46.45%										

Rys. 2. Wyniki obliczeń obiegu ciepłego bloku 370 MW dla podwyższonych parametrów pary 17,6 MPa, 560/560°C

Dalszy przyrost sprawności bloku można uzyskać w wyniku optymalizacji do przepływu trójwymiarowego systemu łopatkowego turbiny. Według ostrożnych szacunków przyrost sprawności wewnętrznej części WP i ŚP turbiny wyniesie z tego tytułu ok. 2 pkt.%, co przełoży się na wzrost sprawności wewnętrznej całej turbiny z 87,1% do 88,7%. Ostatecznie sprawność bloku netto z podwyższoną temperaturą pary świeżej i wtórnie przegrzanej oraz z wymienionym układem przepływowym części WP i ŚP turbiny wyniesie $\eta_{bn} = 36,98\%$, co oznacza jej bezwzględny przyrost o $\Delta\eta_{bn} = 1,08$ pkt.% oraz względny przyrost o $\delta\eta_{bn} = 3,01\%$.

Podniesienie temperatury początkowej o ok. 25°C wymagać będzie zmian konstrukcyjnych i materiałowych określonych, tzw. „krytycznych” elementów kotła i turbiny. W przypadku kotła dotyczy to: końcowych (dodatkowo rozbudowanych) powierzchni ogrzewalnych przegrzewacza pary pierwotnej i wtórnej, komór wylotowych i rurociągów pary świeżej oraz wtórnie przegrzanej. W instalacjach europejskich do produkcji tych elementów stosowana jest najczęściej zmodyfikowana stal P91 (X10CrMoVNb 91), która wykazuje bardzo dobre właściwości w warunkach ciśnień nadkrytycznych. Z kolei w odniesieniu do turbiny decydujące są: wstawki odkuwek wirników WP i ŚP, odlewy komór zaworowych i kadłubów wewnętrznych WP i ŚP turbiny, rurociągi pary świeżej i wtórnie przegrzanej w obrębie turbiny.

3. Obniżenie parametrów końcowych pary

W miarę obniżania temperatury skraplania pary w skraplaczu t_k (a tym samym i ciśnienia nasycenia p_k) maleje ilość ciepła oddawanego poprzez wodę chłodzącą do otoczenia, w wyniku czego wzrasta ilość ciepła zamienionego na pracę i w konsekwencji sprawność obiegu cieplnego. Istotnym ograniczeniem jest tu jednak temperatura dostępnego czynnika chłodzącego. W elektrowni „Bełchatów” realizowany jest zamknięty obieg chłodzenia z chłodniami kominowymi, w którym uzyskuje się typową jak dla warunków polskich temperaturę wody ochłodzonej na poziomie 24÷27°C. Temperatura skraplania pary wylotowej z turbiny ustala się wówczas na poziomie 38÷41°C, któremu odpowiada ciśnienie nasycenia w skraplaczu rzędu 6,6÷7,8 kPa.

Można wykazać, że obniżenie temperatury wody chłodzącej o 3°C (np. z 27 do 24°C) skutkuje pogłębieniem próżni w skraplaczu średnio o ok. 1,0÷1,2 kPa (zależnie od przyjętego poziomu temperatury). Zwiększa to adiabatyczny spadek entalpii w końcowej części turbiny o ok. $\Delta h_a = 20$ kJ/kg, co dla warunków bloku 370 MW przekłada się na przyrost mocy generatora $\Delta P_g = 2680$ kW. Przy stałej ilości ciepła dostarczonego w parze do turbiny oznacza to wzrost sprawności netto bloku o $\Delta \eta_{bn} = 0,285$ pkt.%, czyli o $\delta \eta_{bn} = 0,74\%$.

Powyższy efekt jest możliwy do uzyskania w warunkach elektrowni „Bełchatów”, co potwierdza przeprowadzona modernizacja chłodni nr 4. Modernizacja ta, obejmująca m.in. instalację aparatów rozbryzgowych z natryskiem w górę oraz wymianę wodorozdziału i zraszalnika, spowodowała obniżenie średniorocznej temperatury wody ochłodzonej o 3,8°C.

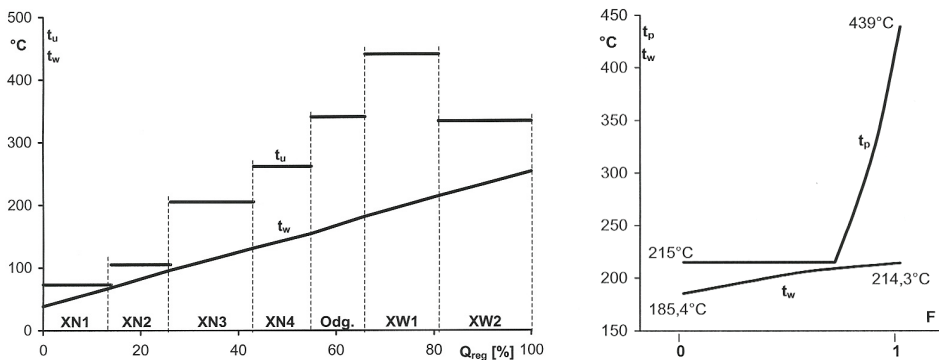
Na wartość osiągniętych parametrów końcowych (w skraplaczu), poza temperaturą wody ochłodzonej, wpływa także wartość spiętrzenia temperatur δt na ściankach rurek skraplaczy. Istotną zaletą tego sposobu zwiększenia sprawności bloku jest to, że ma on charakter bezinwestycyjny, bowiem obniżenie spiętrzenia temperatur można uzyskać poprawiając stan czystości skraplaczy, poprzez: prowadzenie ciągłego stabilizowania wody chłodzącej, ciągle czyszczenie skraplaczy kulkami gumowymi w czasie pracy oraz mechaniczne czyszczenie rurek skraplaczy w czasie postojów. Według ostrożnych szacunków modernizacja chłodni kominowych oraz zmniejszenie spiętrzenia temperatur δt pozwoli w praktyce na

zwiększenie sprawności bloków 370 [MW] z tytułu poprawy próżni w skraplaczu o ok. 0,35 pkt.%.

4. Optymalizacja układu regeneracyjnego

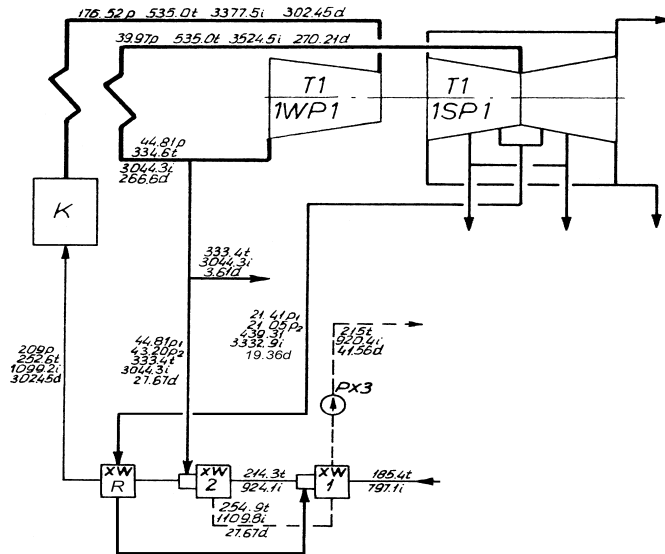
Podwyższenie temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej daje dodatkowe efekty, jeżeli jednocześnie podwyższy się temperaturę wody zasilającej. Taką możliwość stwarza zastosowanie układu „krzyżowego” w regeneracji wysokoprężnej (tzw. układu Ricarda).

Punktem wyjścia do analizy możliwości zwiększenia temperatury wody zasilającej tą drogą jest rozkład temperatur skroplin i wody zasilającej w poszczególnych stopniach podgrzewania regeneracyjnego oraz odpowiadających tym stopniom temperatur pary grzejnej z przyporządkowanym im upustów turbiny (rys. 3). Wynika z niego, że para z pierwszego upustu za międzystopniowym przegrzewaczem pary, o ciśnieniu $p_u = 2,14$ MPa, ma temperaturę 439°C , tj. ponad dwukrotnie wyższą od końcowej temperatury wody zasilającej, opuszczającej pierwszy podgrzewacz regeneracyjny wysokiego ciśnienia XW1 ($t_w = 214^\circ\text{C}$). Problem ten można rozwiązać, stosując znany w energetyce od lat 50. XX w. układ Ricarda.



Rys. 3. Rozkład temperatur pary w poszczególnych upustach t_u i temperatury wody t_w w podgrzewaczach regeneracyjnych bloku 370 MW w funkcji ciepła przejętego w układzie regeneracji

W układzie tym para wysoko przegrzana (za międzystopniowym przegrzewaczem pary), jednak o stosunkowo niewysokim ciśnieniu, jest schładzana w wymienniku para – woda, stanowiącym ostatni (dodatkowy) stopień podgrzewania regeneracyjnego. Schłodzona w tym wymienniku para (zwykle o sto kilkadziesiąt $^\circ\text{C}$) jest następnie kierowana do właściwego („swojego”) podgrzewacza, w którym zakres temperatur odpowiada ciśnieniu upustu (rys. 4). Dla parametrów jak na rys. 4 (z dotychczasowymi parametrami początkowymi pary) sprawność obiegu wyniesie $\eta_{oc} = 46,35\%$. Jest to wartość wyższa o 1,43 pkt.% od wartości bazowej $\eta_{oc} = 44,92\%$. Po uwzględnieniu pozostałych składników sprawności oznacza to, wzrost sprawności netto bloku do wartości $\eta_{bn} = 36,24\%$, czyli o $\Delta\eta_{bn} = 0,34$ pkt.%.



Rys. 4. Układ krzyżowy (Ricarda) podgrzewaczy regeneracyjnych wysokiego ciśnienia bloku 370 MW

W warunkach podwyższonej do 560°C temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej, schłodzenie pary z upustu za wtórnym przegrzewaczem z poziomu $t_{ii} = 462,2^{\circ}\text{C}$ do poziomu $t_r = 310,5^{\circ}\text{C}$ pozwala zwiększyć temperaturę wody zasilającej do $t_{wz} = 257,2^{\circ}\text{C}$, ale dzięki wyższym parametrom początkowym daje wzrost sprawności obiegu do $\eta_{oe} = 46,86\%$, czyli o 1,94 pkt.% więcej w stosunku do układu bazowego. Po uwzględnieniu pozostałych składników sprawności, oznacza to większy przyrost sprawności netto bloku (do wartości $\eta_{bn} = 36,64\%$).

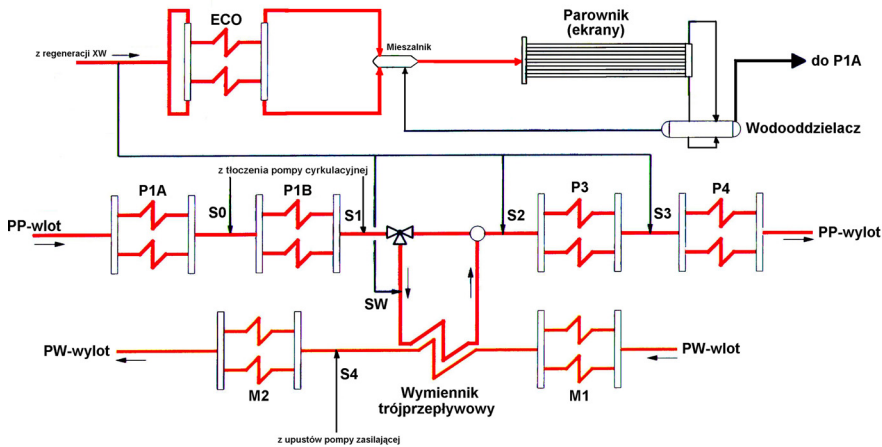
5. Minimalizacja strumieni wtryskowych do przegrzewaczy

Ograniczenie strumieni wtryskowych wody do przegrzewaczy wtórnych można uzyskać poprzez zastosowanie trójprzepływowego wymiennika ciepła. W energetyce światowej ten sposób poprawy sprawności kotłów realizowany jest w najnowszych rozwiązaniach konstrukcyjnych bloków na parametry nadkrytyczne.

Trójprzepływowy wymiennik ciepła wykonany jest w postaci dwóch koncentrycznych rur, przy czym rurą wewnętrzną przepływa część (tzw. obejście) całkowitego strumienia pary pierwotnie przegrzanej, natomiast rurą zewnętrzną o przekroju pierścieniowym — całkowity strumień pary wtórnie przegrzewanej [4, 5].

W rozwiązaniu tym para wtórna odbiera więc energię cieplną zarówno od spalin, jak i od pary pierwotnej, przy czym wartość tej energii może być regulowana przez obejście po stronie pary pierwotnej (regulacja ilościowa) lub bezpośredni wtrysk wody do pary pier-

wotnej (regulacja jakościowa) (rys. 5). W normalnych warunkach eksploatacyjnych omawiany wymiennik umożliwia redukcję strumienia wtryskowego wtórnego praktycznie do zera.



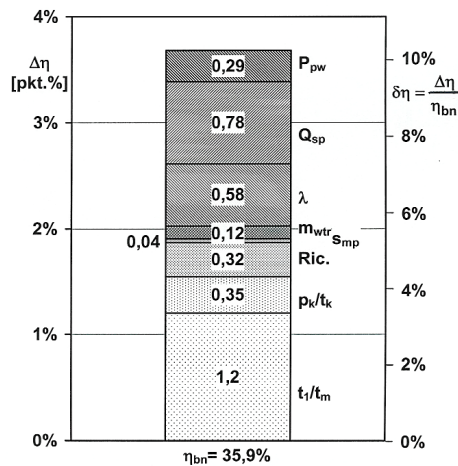
Rys. 5. Sposób włączenia trójprzepływowego wymiennika ciepła w trakt parowy kotła BB-1150

Na podstawie znajomości znamionowego natężenia przepływu wody wtryskowej do przegrzewaczy wtórnych oraz odchylenia jednostkowego zużycia paliwa umownego przez blok 370 MW w funkcji strumienia wody wtryskowej do przegrzewaczy wtórnych (wg metody TKE) można na drodze elementarnych obliczeń wykazać, że możliwy do uzyskania przyrost sprawności bloku netto z tytułu zredukowania do zera wtrysków wtórnych wynosi $\Delta\eta_{bn} = 0,096$ pkt.%. Trzeba jednak zaznaczyć, że w warunkach eksploatacyjnych rzeczywiste wartości wtrysków wtórnych są na ogół większe, a ponadto dość zróżnicowane w kolejnych latach eksploatacji. Ilość wody wtryskowej wtórnej zależy bowiem istotnie od stanu czystości powierzchni ogrzewalnych (przede wszystkim rur ekranowych parownika), który uwarunkowany jest w dużej mierze jakością (składem chemicznym) spalanej paliwa. W związku z tym można oczekiwać, że w warunkach ruchowych możliwy do uzyskania przyrost sprawności bloku netto $\Delta\eta_{bn}$ z tytułu całkowitej eliminacji wtrysków wtórnych będzie większy i wyniesie ok. $\Delta\eta_{bn} = 0,12$ pkt.%.

6. Podsumowanie

Poza omówionymi powyżej działaniami rozważano także szereg innych przedsięwzięć, takich jak: optymalizacja (redukcja) nadmiaru powietrza w procesie spalania, zwiększenie szczelności układu paliwo – powietrze – spaliny, zastosowanie w układzie próżniowym turbin smoczków (strumienic) parowych, wykorzystanie ciepła spalin wylotowych z kotła, optymalizacja poboru mocy przez urządzenia potrzeb własnych boku oraz optymalizacja układu ciepłowniczego (dla bloków przystosowanych do oddawania ciepła).

Na rysunku 6 przedstawiono graficznie możliwości podniesienia sprawności netto bloku 370 MW drogą różnorodnych przedsięwzięć, opisanych w referacie. Pominięto wpływ układu ciepłowniczego, ponieważ dotyczy on tylko trzech ostatnich bloków, przystosowanych do oddawania ciepła. Wynika z niego, że największy przyrost sprawności można uzyskać drogą zwiększenia parametrów początkowych (temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej), połączonego z odpowiednią rekonstrukcją przegrzewaczy pary oraz części WP i ŚP turbiny. Z dużym prawdopodobieństwem można oczekiwać przyrostu sprawności bloku netto z tego tytułu na poziomie co najmniej 1,2 pkt.%, czyli względnego przyrostu sprawności $\delta\eta_{bn}$ ponad 3,3%. Zdaniem autorów tak ujęty wykaz możliwości zwiększenia sprawności netto bloku 370 MW powinien ułatwić selektywny wybór dostępnych rozwiązań, w zależności od aktualnych potrzeb oraz stanu technicznego głównych urządzeń wytwórczych.



Rys. 6. Zestawienie możliwości zwiększenia sprawności netto bloku 370 MW:

t_1/t_m — zwiększenie temperatury pary świeżej i wtórnie przegrzanej oraz wzrost sprawności wewnętrznej zrekonstruowanych części WP i ŚP turbiny; p_k/t_k — obniżenie parametrów końcowych; Ric. — zastosowanie układu krzyżowego (Ricarda) w regeneracji WP; s_{mp} — zastosowanie smoczków parowych w układzie próżniowym; m_{wtr} — minimalizacja strumieni wtryskowych do przegrzewaczy; λ — szczelność kotła i współczynnik nadmiaru powietrza; Q_{sp} — wykorzystanie ciepła spalin; P_{pw} — optymalizacja potrzeb własnych

LITERATURA

- [1] Scarlin B.: Höherer Wirkungsgrad durch moderne Dampfturbinentechnik. ABB Technik, nr 8, 1996
- [2] Mandel H., Klauke U.: Moderne Dampfturbinen in den Neubaukraftwerken der VEAG Auslegung und Bewährung im Betrieb bei hohen Wirkungsgraden. Materiały XXXIII Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, 23–25.10.2001, 99–109
- [3] Vademecum Elektrowni Bełchatów, Bełchatów 1990
- [4] Drożyński A., Scheffknecht G.: Nowoczesne kotły o nadkrytycznych parametrach pary. Materiały Międzynarodowego Seminarium nt. „Wysokosprawne bloki energetyczne”. Słok, listopad 1996 (załącznik)
- [5] RWE Energie: Założenia do projektu BoA w Elektrowni Niederaussem. Materiały Międzynarodowego Seminarium nt. „Wysokosprawne bloki energetyczne”. Słok, listopad 1996, 145–175