

prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, dr hab. inż. Henryk Łukowicz, prof. nzw. w Pol. Śl.,
mgr. inż. Paweł Pilarz, Politechnika Śląska

Efektywność zastosowania zbiorników akumulacyjnych w instalacjach dużych bloków kondensacyjnych i duobloków

W ostatnich latach, szczególnie w Europie, priorytetem stało się wytwarzanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych (OZE), w tym z elektrowni wiatrowych i ogniw fotowoltaicznych, które pracują w sposób stochastyczny. Problematyka dekarbonizacji przesuwając coraz częściej technologie paliw kopalnych do funkcji bilansujących przy braku generacji elektryczności ze źródeł odnawialnych. To powoduje ciągłą zmianę istotności poszczególnych kryteriów oceny technologii węglowych, a także gazowych. Obok zawsze istotnego kryterium sprawnościowego w całym zakresie obciążenia, wzrasta znaczenie zdolności do zmiany obciążenia (elastyczność cieplna) wszystkich modułów instalacji i kryterium niezawodnościowego.

W szczególnie trudnej sytuacji znalazły się elektrownie opalane węglem kamiennym, którym trudniej niż siłownikom, na wyraźnie tańszy węgiel brunatny, sprostać konkurencji OZE. Istnieje ryzyko, że nawet najnowsze jednostki wytwórcze będą pełniły rolę regulacyjną, lub wręcz pracowały jako gorąca rezerwa (GR), co może radykalnie wydłużyć okres zwrotu nakładów poniesionych na ich budowę. Są to bloki o nadkrytycznych parametrach pary przewidziane pierwotnie do pracy w podstawie krajowego systemu energetycznego (KSE), zaprojektowane do pracy poślizgowej. Zaniżanie ich mocy

powoduje, że będą pracowały w warunkach podkrytycznych, przy obniżonej sprawności. Stan taki może mieć trwały charakter. Dla uniknięcia problemów ze zrównoważeniem bilansu mocy oraz zapewnienia realizacji zmian w strukturze technologicznej wytwarzania zgodnych z polityką energetyczną, poza budową nowych bloków klasy 1000 MW w Kozienicach, Opolu i Jaworznie, które zastąpią wycofywane z eksploatacji najstarsze bloki klasy 120 MW i mniejsze, należy wprowadzić dodatkowo inne działania zmierzające do modernizacji i rewitalizacji istniejących jednostek wytwórczych (głównie bloków 200 i 360

MW), które będą bilansować system przez co najmniej następnych kilkadziesiąt lat. Fakt, że dotyczyć to będzie bloków już w dużym stopniu wyeksploatowanych oraz głównie obciążenia.

W kontekście zmiany struktury technologicznej wytwarzania elektryczności, szczególnie ważne znaczenie mają: minimum techniczne bloku, skokowe zmiany mocy czynnej utrzymujące się w dłuższym okresie czasu, dopuszczalna szybkość zmiany mocy wytwarzanej, czas rozruchu bloku ze stanu gorącego i po dobowym postoju, a także wysoka sprawność w różnych stanach obciążenia. Postęp w tym zakresie to bardzo

ważny krok służący zwiększeniu udziału technologii węglowych w stabilizacji systemu elektroenergetycznego przy istotnym udziale w strukturze wytwarzania źródeł odnawialnych.

Należy podkreślić, że sposób rozwiązywania problemów jest istotnie zależny od historii eksploatacji. Dla nowych jednostek o wielu charakterystykach należy rozstrzygać na etapie projektowania i konstruowania głównych modułów bloku. Dla jednostek eksploatowanych, w pierwsze kolejności, należy określić stan wyczerpania ich żywotności. Należy przy tym wykorzystać adekwatne metody oceny zużycia niskocyklowego oraz zmęczenia pełzaniowego. Bardzo wskazanym jest zastosowanie odpowiednich metod eksperymentalnych (nieniszczących) weryfikujących modele obliczeniowe. Następnym krokiem jest przedyskutowanie i przyjęcie rozwiązań zwiększających, odpowiadającym założonym scenariuszom eksploatacyjnym, elastyczność cieplną. Każdy z przyjętych rozwiązań będzie miał konsekwencje dla trwałości i żywotności elementów bloku.

■ Analizowane struktury technologiczne bloków

■ Duoblok - obciążenie nominalne i minimalne 20%

W Duobloku dwa kotły generują parę na potrzeby jednego turbozespołu. Analizowany model Duobloku został przedstawiony na rys. 1. Posiada on nominalne parametry pary 600°C/609°C/28,5 MPa, ciśnienie przegrzewu wtórnego $p_p = 5$ MPa, temperaturę wody zasilającej 300,6°C, sprawność kotła 94% oraz ciśnienie w skraplaczu $p_{skr} = 3$ kPa. Moc brutto jaką osiąga przy obciążeniu 100% wynosi 526,7 MW. Na rys. 1. przedstawione zostały parametry czynnika w obiegu odpowiadające nominalnemu obciążeniu. W zakresie obciążenia od 100 do 40%, przewidywana jest regulacja poślizgowa, natomiast od 40 do 20% ciśnienie utrzymywane będzie na stałym poziomie. Rozwiązanie z dwoma kotłami daje możliwość wyłączenia jednego kotła w celu obniżenia obciążenia Duobloku do poziomu 20%. Wartości parametrów dla tego obciążenia przedstawiono na rys. 2.

Przy niskim zapotrzebowaniu na energię, wyłączenie jednego kotła pozwala na osiągnięcie minimalnej mocy ok. 97 MW, tj. przy obciążeniu 20% całego Duobloku.

■ Blok 900 MW

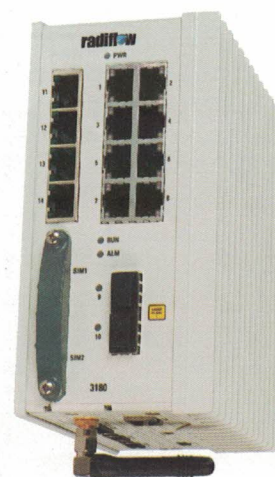
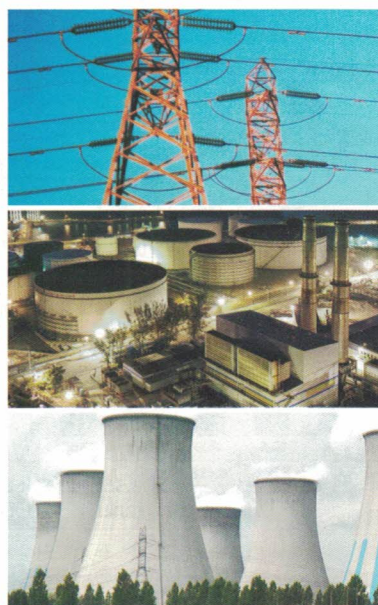
Do analizy zwiększenia elastyczności cieplnej turbozespołu z wykorzystaniem systemu akumulacji ciepła wykorzystano również referencyjny Blok 900 MW, szeroko analizowany w zad. 1. Projektu Strategicznego *Zaawansowane technologie pozyskiwania energii*. Parametry pary proponowanej instalacji mieszczą się między parametrami stosowanymi w obecnie opanowanych konstrukcjach, a parametrami charakterystycznymi dla bloku 50+: 653°C/672°C/30,3 MPa, ciśnienie wtórnego przegrzewu $p_p = 6$ MPa, temperatura wody zasilającej 315 °C, sprawność kotła 94,5%, ciśnienie w skraplaczu



CYBERBEZPIECZEŃSTWO

SIECI PRZEMYSŁOWYCH

ROUTER 3180



SCADA

DPI (Deep Packet Inspection) SCADA firewall dla protokołów DNP3, ModBus, IEC 104/61850



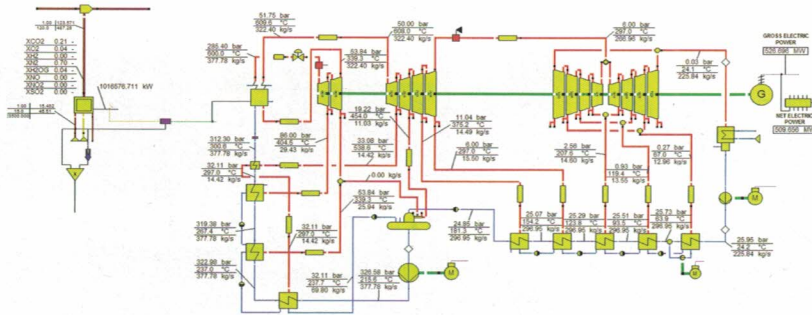
Obsługa bezpiecznych połączeń
IPSec VPN (X.509, AES256, 3DS), DM-VPN



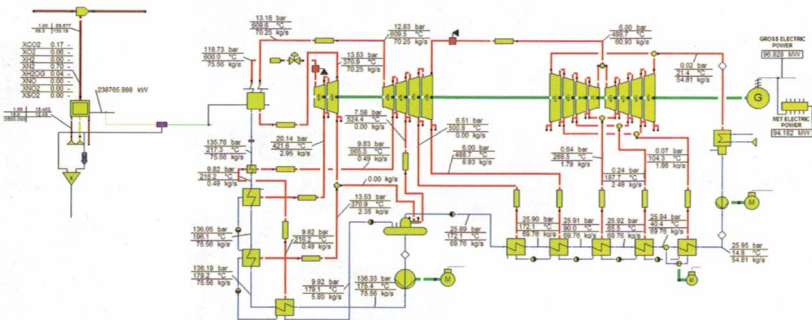
APA (Authentication Proxy Access)
lokalna baza użytkowników



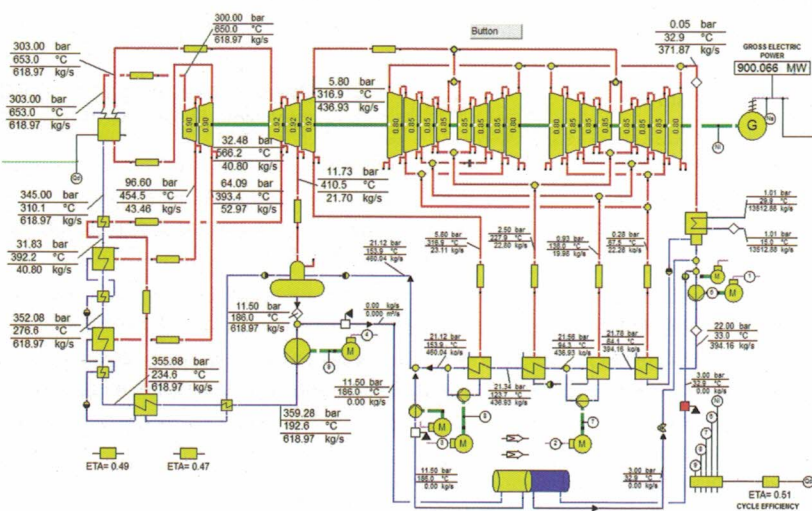
Tryb uczenia
dla łatwiejszego tworzenia reguł firewall



Rys. 1. Schemat cieplny Duobloku przy obciążeniu nominalnym



Rys. 2. Duoblok z włączonym jednym kotłem przy obciążeniu 40% - Obciążenie turbozespołu 20%



Rys. 3. Blok węglowy 900 MW z systemem zbiorników akumulujących ciepło

5 kPa. Schemat cieplny bloku przyjęty do obliczeń ilustruje rys. 3.

■ Akumulacja ciepła w zbiorniku hot-AKU dla Duobloku

Zwiększenie elastyczności pracy Duobloku jest możliwe po zastosowaniu dodatkowego zbiornika ciśnieniowego (hot-AKU) za odgazowywaczem. Proces akumulacji ciepła, który został szerzej przedstawiony w [2,3] polega na rozdeleniu strumienia czynnika przed pompą wody zasilającej kocioł i skierowaniu go do hot-AKU. Jednocześnie taki sam strumień wody jest doprowadzany za skraplaczem z zasobnika wody zimnej (cool-AKU). Prowadzi to do redukcji strumienia pary świeżej. Schemat Duobloku ze zbiornikami systemu akumulacji ciepła jest przedstawiony na rys. 4.

Obciążenie 40% jest założonym minimum technicznym pracy Duobloku przy pracy dwóch kotłów (moc brutto 208,3 MW), dla którego strumień wody do kotła wynosi 151,1 kg/s. Wartość ta limituje możliwość poboru wody do zasobnika hot-AKU. W niniejszej analizie założono, że akumulację ciepła prowadzi się dla obciążeń wyższych od 40%. Drugą wartością ograniczającą możliwości systemu akumulacji ciepła jest strumień skroplin kierowany do regeneracji niskoprężnej (RNP). Przy pracy z pełnym obciążeniem 100% (moc 526,7 MW), wynosi on 225,8 kg/s. Przy włączeniu akumulacji wody w hot-AKU następuje zwiększenie strumienia kondensatu do RNP, dlatego też akumulacja ciepłej wody jest zasadna przy obciążeniach niższych niż 100%.

Przy napełnianiu zbiornika hot-AKU zmniejsza się strumień wody zasilającej kocioł. Maksymalny pobór gorącej wody wynika z minimalnej ilości wody jaką należy skierować do kotłów (minimum techniczne pracy kotłów). Jednocześnie strumień wody doprowadzony ze zbiornika cool-AKU do regeneracji niskoprężnej przyczynia się do zwiększenia zapotrzebowania na parę z upustów turbiny średnio- i niskoprężnej. Na skutek tego

dodatkowo redukuje się ilość rozprężanego czynnika w turbinie. Dla zakresu obciążenia kotłów 40-100% określono spadki mocy brutto odpowiadające maksymalnym wartościom strumieni, które można skierować do akumulacji, rys. 5.

W czasie akumulacji ciepła największy spadek generowanej mocy z 420,7 MW do 184,3 MW uzyskana dla 80% obciążenia kotłów. Wartość ta jest niższa o ok. 11,5% mocy turbozespołu niż przy minimum technicznym duobloku 40% wynoszącym 208,3 MW.

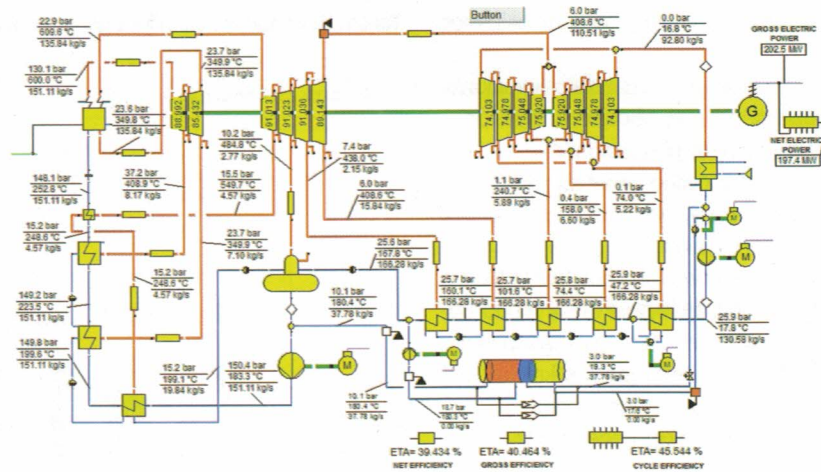
Biorąc pod uwagę założoną objętość zbiornika hot-AKU, okres jego napełniania jest zależny bezpośrednio od strumienia gorącej wody, rys. 5. Dla obciążenia 80%, przy którym następuje największy spadek mocy, czas trwania tego stanu jest ograniczony do 55 min. Przy obciążeniu 50% okres załadunku jest najdłuższy i wynosi 218 min. Redukcja mocy jest wtedy najmniejsza, lecz mimo to moc Duobloku jest niższa niż przy obciążeniu 40% bez akumulacji ciepła (o 5,8 MW).

■ Akumulacja ciepła w zbiorniku hot-AKU dla Bloku 900 MW

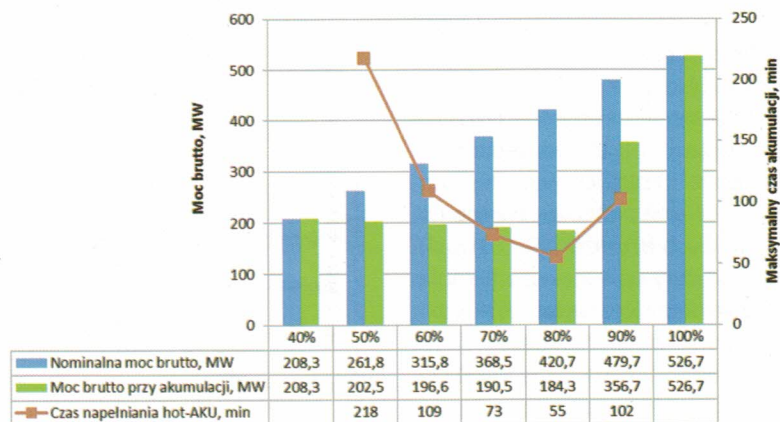
Modelowanie procesu akumulacji ciepła w zbiorniku hot-AKU dla Bloku 900 MW przebiegało podobnie jak dla modelu Duobloku, jednak z uwagi na inne parametry techniczne strumień kierowany do zasobnika wody gorącej był proporcjonalnie większy.

Akumulacja ciepła w zasobniku hot-AKU spowodowała największy spadek generowanej mocy przy obciążeniu 80% Bloku 900 MW, rys. 6. Redukcja ta nastąpiła z poziomu 724,3 MW do 355,2 MW. Wartość ta jest niższa o ok. 5,6% mocy turbozespołu niż dla obciążenia 40% (376,2 MW).

Czas napełniania zbiornika hot-AKU jest bezpośrednio związany ze strumieniem kierowanym do akumulacji, rys. 6. Dla obciążenia 80%, gdzie spadek mocy jest największy, czas trwania tego stanu jest ograniczony do 34 min. Dla obciążenia 50% proces ładowania zajmuje



Rys. 4. Duoblok przy obciążeniu 50% w trakcie akumulacji gorącej wody w hot-AKU



Rys. 5. Wyniki dla maksymalnych strumieni gorącej wody akumulowanej w hot-AKU

137 min., obniżenie mocy brutto bloku jest najmniejsze, lecz mimo to osiąga wartość niższą niż dla obciążenia 40% bez systemu akumulacji ciepła (wartość niższa o 5,4 MW).

■ Rozładunek zbiornika hot-AKU dla Duobloku

Rozładunek zakumulowanej wody z zasobnika hot-AKU jest realizowany poprzez pompowanie tego czynnika do rurociągu wody za wymiennikami regeneracji niskoprężnej (przed odgazowaczem - ODG). Adekwatny strumień skroplin za skraplaczem jest pompowany do zbiornika cool-AKU, co również ma na celu zachowanie odpowiedniego bilansu czynnika w obiegu Duobloku, w tym za-

pewnienie stałych strumieni pary świeżej właściwych dla analizowanych obciążeń duobloku.

Zależnie od obciążenia i warunków termodynamicznych obiegu parowego Duobloku, obliczono maksymalne wartości strumienia rozładunku hot-AKU, tab. 1.

Zastosowanie maksymalnych możliwych strumieni rozładunku zbiornika hot-AKU, zależnych od obciążenia Duobloku, przyniosło efekt w postaci przyrostu mocy. Doprowadzenie zmagazynowanej wody do ODG spowodowało znaczne obniżenie strumienia skroplin przepływających przez wymienniki regeneracji niskoprężnej (RNP). Doprowadziło to do redukcji zapotrzebowania na parę z upustów części średnio- i niskopręż-

nej turbiny (SP i NP), co podniosło moc brutto, rys. 7.

Włączenie opróżniania zakumulowanego ciepła przy obciążeniu 90% przyczyniło się do przyrostu mocy o blisko 9%, co odpowiada wartości 42,7 MW, natomiast przy obciążeniu nominalnym uzysk ten wyniósł 40,1 MW - wzrost mocy o 7,6% do wartości 566,8 MW. Można stwierdzić, że przyrost mocy brutto Duobloku przy włączonym rozładunku generuje dodatkową moc w zakresie 7-9% mocy przy danym obciążeniu.

Rozładunek gorącej wody za wymiennikami regeneracji niskoprężnej (RNP) przyczynia się do zmniejszenia strumienia wody do podgrzania, rys. 8. To z kolei prowadzi do ograniczenia zapotrzebowania na parę upustową z części SP i NP, co powoduje zwiększenie mocy Duobloku.

Większy strumień pary może zostać rozprężony w części średnio- i niskoprężnej turbiny, co w istotny sposób wpływa na produkcję energii. Dla najwyższych obciążeń (90 i 100%), strumień pary na wlocie do skraplacza zwiększył się o blisko 35% w porównaniu do wartości podstawowych, bez rozładunku zakumulowanego ciepła, czego efektem jest przyrost mocy, przedstawiony na rys. 9.

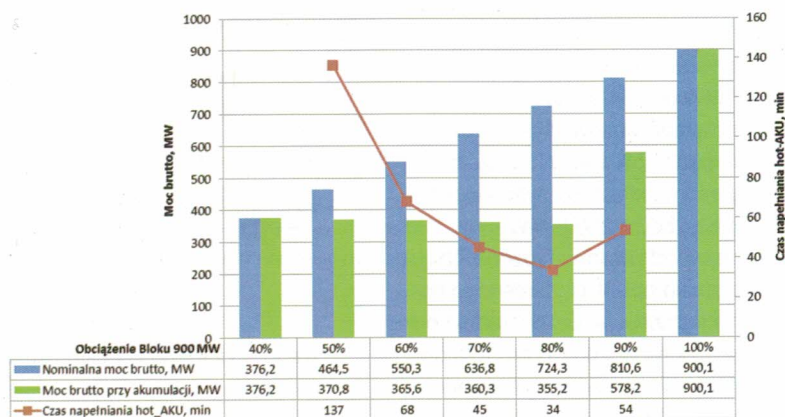
■ Rozładunek zbiornika hot-AKU dla Bloku 900 MW

Rozładunek gorącej wody z zasobnika hot-AKU został zamodelowany podobnie jak dla Duobloku, przy zastosowaniu strumieni przedstawionych w tab. 2, zależnych od parametrów termodynamicznych danego obciążenia Bloku 900 MW.

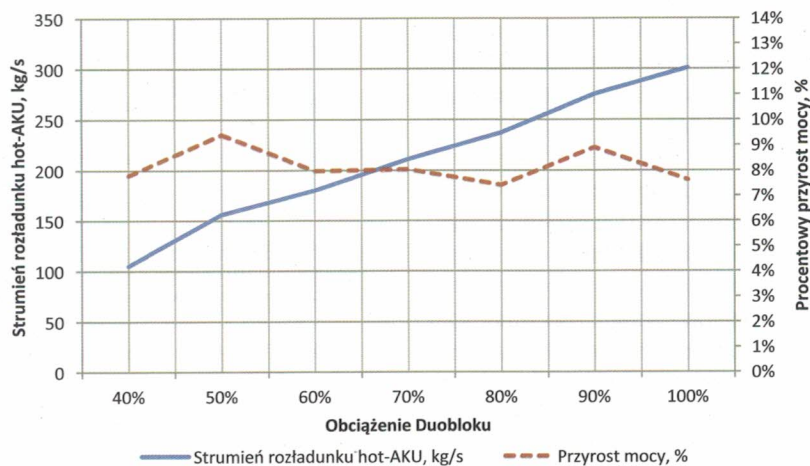
Doprowadzenie strumienia gorącej wody za regeneracją niskoprężną spowodowało analogiczną reakcję obiegu jak w Duobloku, zmniejszenie zapotrzebowania na parę upustową z SP i NP oraz przyrost mocy brutto, rys. 10. Dla obciążeń w zakresie 50-90% wzrost mocy wyniósł ok. 4%.

Tab. 1. Rozładunek zbiornika z gorącą wodą - wartości maksymalne

Obciążenie kotłów	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Rozładunek z hot-AKU, kg/s	105	156	180	211	237	275	301



Rys. 6. Wyniki dla maksymalnych strumieni akumulacji w hot-AKU dla bloku 900 MW



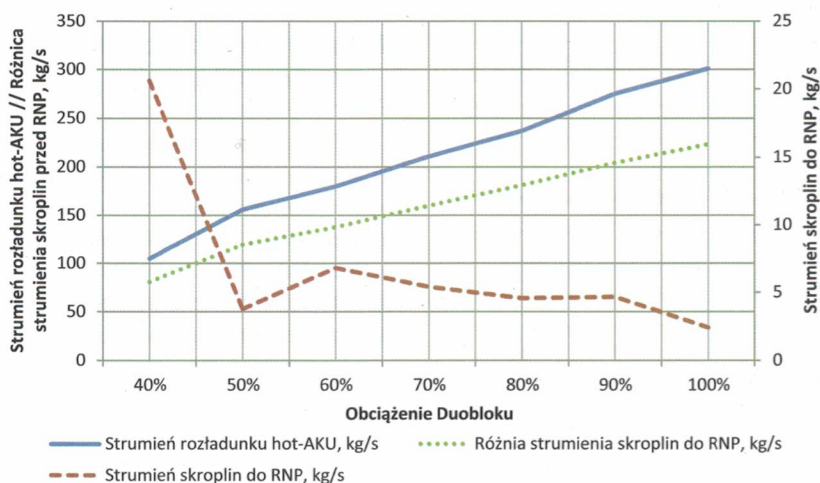
Rys. 7. Przyrost mocy przy rozładunku hot-AKU dla różnych obciążeń Duobloku

■ Przeciążenie turbiny niskoprężnej przy rozładunku hot-AKU

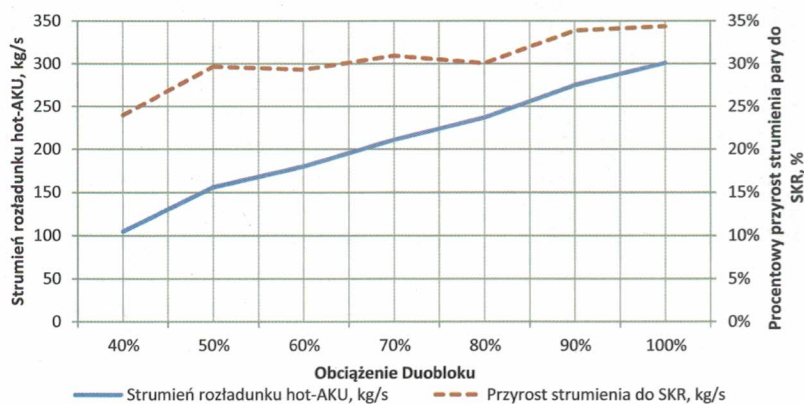
Włączenie rozładunku zasobnika hot-AKU z gorącą wodą przyczynia się do zwiększenia strumienia pary na wlocie do turbiny niskoprężnej, tym samym przyrostu mocy brutto Duobloku. Opierając się na analizie włączenia rozładunku hot-AKU przy obciążeniu kotła 100% przeanalizowano możliwe przeciążenia turbiny niskoprężnej o 5%,

10% i maksymalną wartość 13,8%. Na rys. 11. przedstawiono wyniki obliczeń, gdzie realizowano stopniowy przyrost strumienia rozładunku do momentu osiągnięcia założonego przeciążenia, po czym strumień ten osiągał wartość stałą, dla przeciążenia 5% = 95,5 kg/s, dla 10% = 214,5 kg/s, dla 13,8% = 301 kg/s.

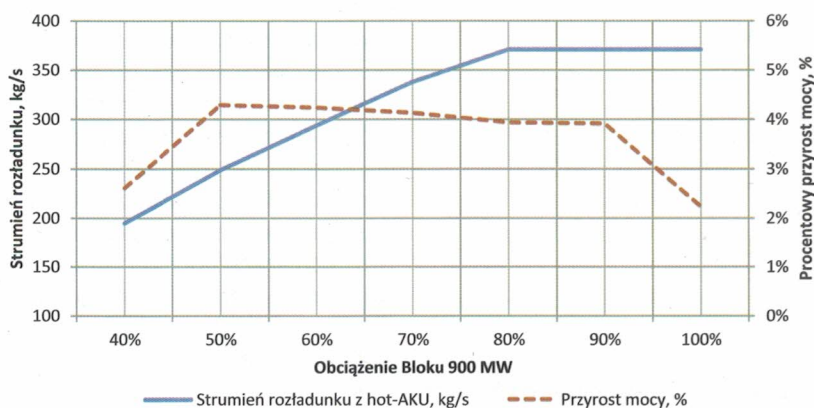
Wybrane warianty przeciążenia definiują również strumień rozładunku zasobnika hot-AKU, a tym samym czas jego opróżnienia, rys. 12. Dla przecią-



Rys. 8. Wpływ rozładunku hot-AKU na strumień kondensatu w regeneracji niskoprężnej



Rys. 9. Wpływ procesu rozładunku na zwiększenie strumienia pary na wlocie do skraplacza



Rys. 10. Przyrost mocy przy rozładunku hot-AKU dla różnych obciążeń Bloku 900 MW

Tab. 2. Rozładunek zbiornika z gorącą wodą - wartości maksymalne

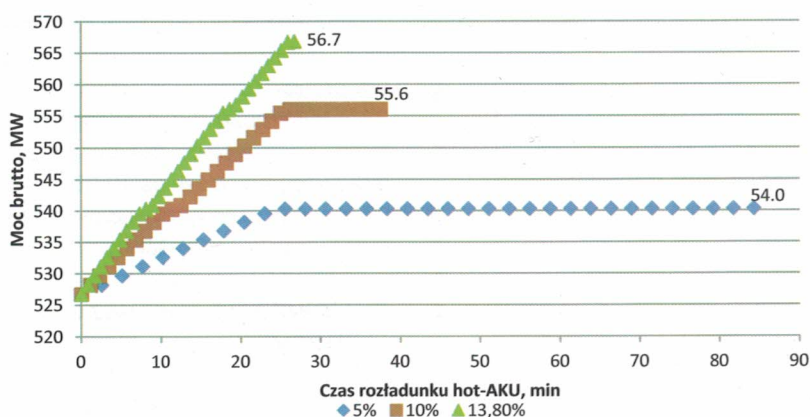
Obciążenie kotłów	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Rozładunek z hot-AKU, kg/s	195	249	294	338	371	371	371

żenia 5% przyrost mocy o 13,6 MW może być realizowany przez 84 min., dla przeciążenia 10% uzysk mocy 29,3 MW może trwać 37 min., natomiast w wariancie maksymalnego możliwego przeciążenia 13,8% przez 26 min. można utrzymywać produkcję mocy wyższą o 40,1 MW.

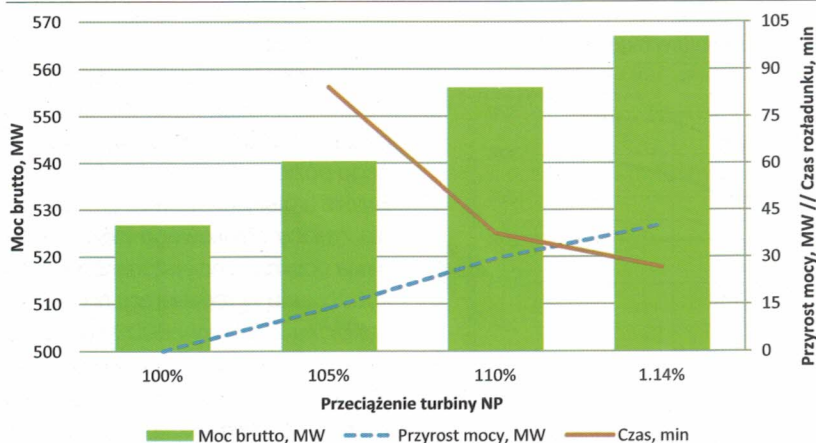
■ Chwilowe zwiększenie mocy

Szybkie zwiększenie mocy jest możliwe poprzez ograniczeniem dopływu skroplin do wymienników regeneracji niskoprężnej. Jednocześnie następuje zwiększona podaż czynnika ze zbiornika wody zasilającej (ZWZ). Proces ten może trwać do momentu osiągnięcia minimalnego dopuszczalnego poziomu w ZWZ. Okres ten jest zwykle krótszy niż 10 min. [1] Obliczenia zmiany chwilowego zwiększenia mocy poprzez zmniejszenie strumienia kondensatu w regeneracji niskoprężnej bloku 200 MW i 900 MW opisano w [2], natomiast dla Duobloku warian ten został szerzej przedstawiony w [3], rys. 13.

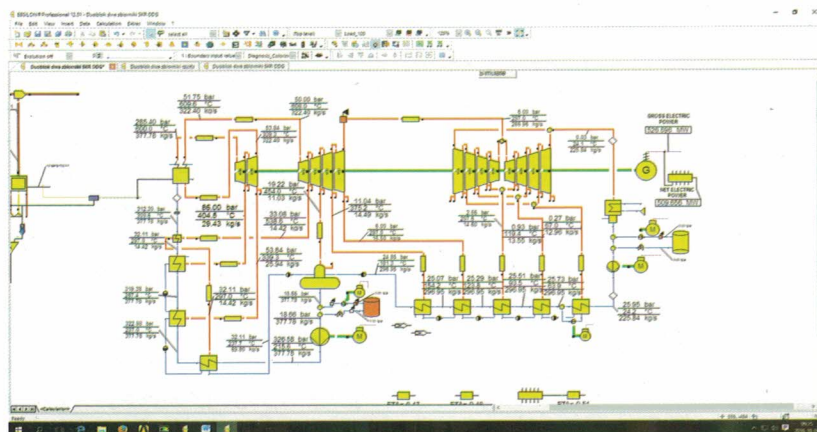
Zmniejszenie strumienia wody przepływającej przez regenerację niskoprężną za cyrkulacji skroplin ze skraplacza na pompie kondensatu. Ze względów obliczeniowych, zmniejszenie kondensatu w regeneracji niskoprężnej modelowano przez wprowadzenie dodatkowego zbiornika za skraplaczem SKR. Prowadzi to do podniesienia mocy turbozespołu, rys. 14. Wynika to ze zmniejszenia strumienia pary upustowej z części średnio- i niskoprężnej turbiny, wskutek czego turbozespół pracuje na zwiększonym strumieniu czynnika. Działanie tego procesu jest bezpośrednio zależne od objętości zbiornika wody zasilającej. Przy obciążeniu 100% maksymalny przyrost mocy osiągnął 34,8 MW, co stanowi 6,6% nominalnej mocy Duobloku. Natomiast maksymalny uzysk mocy, wynoszący 37 MW uzyskano przy obciążeniu 90%.



Rys. 11. Wpływ założonego przeciążenia turbiny NP na moc brutto i czas trwania tego stanu



Rys. 12. Przeciążenie turbiny NP na moc brutto Duobloku i czas trwania podwyższonej mocy



Rys. 13. Schemat obliczeniowy Duobloku ze zbiornikami ODG i SKR (obciążenie 100%)

Ładowanie zbiornika wody zasilającej

Przeanalizowano również proces zwiększania przepływu przez regenerację niskoprężną w celu napełnienia zbiornika wody zasilającej. W tym przypadku zwiększa się pobór pary upustowej z części średnio- i niskoprężnej, co prowadzi do obniżenia mocy Duobloku. Nadwyżka powyżej strumienia wody zasilającej kocioł jest przeznaczona na gromadzenie w ZWZ do momentu zapełnienia go.

Proces ten nie może być prowadzony podczas obciążenia nominalnego, ponieważ spowodowałby przekroczenie wartości granicznej dla założonego strumienia skroplin przed regeneracją niskoprężną (225,8 kg/s). Wartości strumienia opróżniania SKR przedstawiono w tab. 3.

Proces opróżniania zbiornika SKR może być prowadzony w niższych obciążeniach, jednak z uwagi na przywołany limit, najszybciej zbiornik ten jest opróżniany przy najniższym obciążeniu, jednocześnie skutkując redukcją mocy o 25,5 MW (o ponad 12% dla obciążenia 40%), rys. 15.

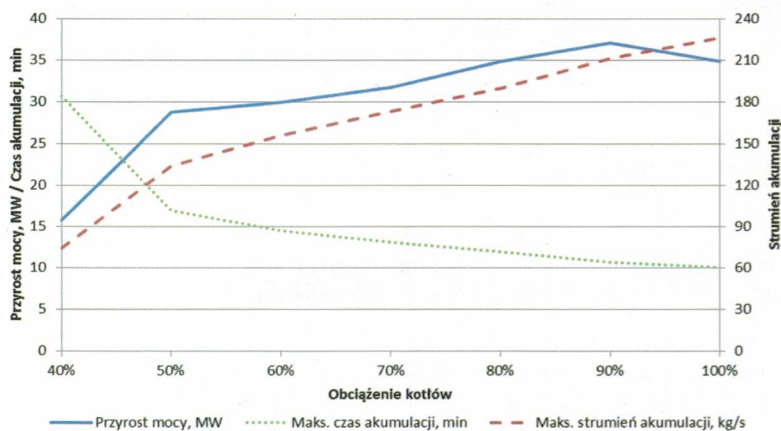
Czas rozładunku zbiornika SKR ze zgromadzonych skroplin wynika bezpośrednio z maksymalnego możliwego strumienia, zależnego od obciążenia Duobloku, rys. 16. Najdłuższy proces ten występuje przy obciążeniu 90% (98 min.) i stopniowo spada do wartości 14 min. przy 40% obciążeniu kotła. Można stwierdzić, że proces ten należałoby prowadzić przy zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Zagadnienie to może stanowić podstawę do optymalizacji działania tego systemu podczas zmiennego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Podsumowanie

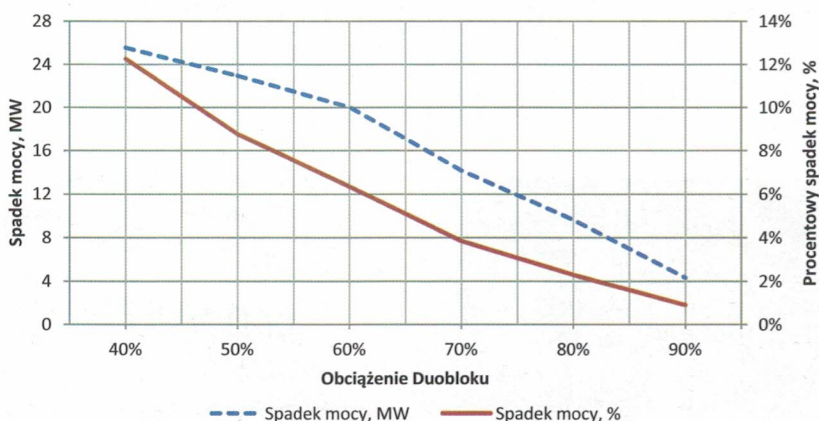
Zastosowanie zbiorników akumulujących gorącą wodę w instalacji bloku energetycznego umożliwia szybkie

Tab. 3. Maksymalne możliwe strumienie rozładunku skroplin ze skraplacza

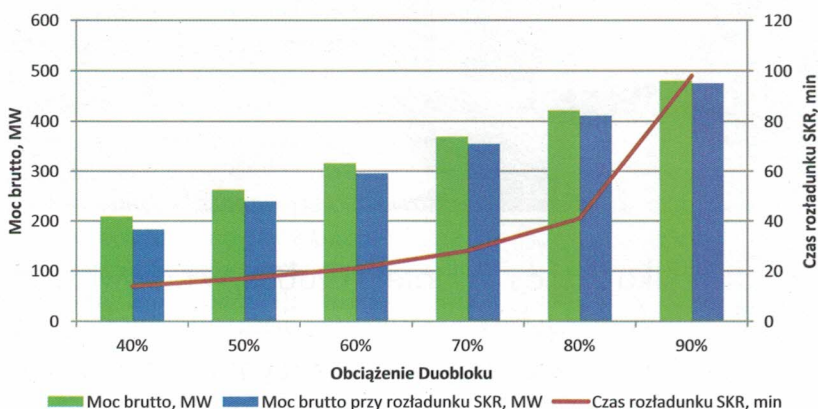
Obciążenie Duobloku	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Maksymalny strumień rozładunku skraplacza, kg/s	159	133	107	80,5	54	23



Rys. 14. Wyniki obliczeń dla kumulacji kondensatu w skraplaczu Duobloku



Rys. 15. Spadek mocy po zastosowaniu maksymalnych możliwych strumieni rozładunku zbiornika SKR



Rys. 16. Wyniki analizy rozładunku zbiornika SKR

zmiany mocy turbozespołu, co przy konieczności zapewnienia bilansowania systemu elektroenergetycznego przy dużych wahaniami mocy spowodowanych generacją elektryczności z wiatru i ze słońca, nabierać będzie coraz większego znaczenia.

Krótkie (kilkuminutowe) szybkie przyrosty mocą mogą być uzyskane przez zmniejszenie strumienia kondensatu w regeneracji niskoprężnej i wykorzystanie objętości zbiornika wody zasilającej.

Przedstawiono ograniczenia zarówno wartości zmiany mocy jak i czasu tej zmiany dla monobloku o mocy 900 MW i duobloku o mocy ok. 520 MW.

Rezultaty analizy wskazują na duży potencjał zwiększenia elastyczności przez zastosowanie dodatkowych zbiorników akumulujących gorącą wodę.

Przedstawione wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy PBS2/B4/8/2013 - Programu Badań Stosowanych - Niskoemisyjne innowacyjne technologie rekonstrukcji elektrowni węglowych z blokami o mocy 200 MW oraz Badaniach własnych Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej

□

Literatura

- [1] Określenie podstawowych parametrów i wstępny bilans dla DUOBLOK-u. Energo-projekt Katowice, nr projektu X-03423, czerwiec 2014
- [2] Kakaras E., Buddenberg T., Duggan J.: Solutions from the perspective of European power plant suppliers. VGB PowerTech 1/2 2014
- [3] Chmielniak T., Łukowicz H., Pilarz P., Elastyczność cieplna bloków energetycznych dużych mocy. Możliwości jej wzrostu, Nowa Energia, 5-6/2015, s. 40-53
- [4] Chmielniak T., Łukowicz H., Pilarz P., Thermal flexibility of a turbine set operating in a twin-boiler system, Proceedings of the 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering, Gliwice-Katowice 14-16.09.2016 r., 515-524