

Radosław SZCZERBOWSKI\*

## MODELOWANIE UKŁADÓW TECHNOLOGICZNYCH ELEKTROWNI JĄDROWYCH

Elektrownie jądrowe, w porównaniu do elektrowni parowych wykorzystujących paliwa kopalne, charakteryzują się niską sprawnością. Wynika to ze stosunkowo niskiej temperatury i ciśnienia pary świeżej w stosunku do elektrowni parowych. W referacie przedstawiono możliwości rozbudowy układów technologicznych elektrowni jądrowych. W kolejnych modyfikacjach przedstawiono możliwości współpracy bloku jądrowego z turbinami gazowymi. Połączenie turbin gazowych z elektrownią jądrową w cykl kombinowany powoduje wzrost sprawności i wydajności, w porównaniu do otwartego cyklu turbiny gazowej lub elektrowni jądrowej. W referacie przedstawiono możliwość wykorzystania gorących gazów opuszczających turbinę gazową do przegrzania pary z wykorzystaniem generatora pary elektrowni jądrowej.

### 1. WPROWADZENIE

W obecnej sytuacji energetycznej w świecie istotne znaczenie ma racjonalne wykorzystanie dostępnych surowców energetycznych przy jednoczesnym spełnieniu stale zaostrzających się wymagań odnośnie ochrony środowiska naturalnego. Efektem tego jest ponowny wzrost zainteresowanie energetyką jądrową. Wzrost efektywności ekonomicznej procesów przetwarzania energii wykorzystujących paliwo jądrowe, wysoki poziom bezpieczeństwa, jaki osiągnęły eksploatowane elektrownie jądrowe oraz pomijalnie mała wielkość emisji zanieczyszczeń do atmosfery skłaniają wiele krajów do ponownego zainteresowania się rozwojem energetyki jądrowej [1].

Na świecie pracuje ponad 430 reaktorów w elektrowniach jądrowych, głównie reaktorów lekkowodnych (LWR – Light Water Reactor). Korzystając z doświadczeń pracy wszystkich elektrowni jądrowych na przestrzeni wielu lat ich eksploatacji, znacznie poprawiła się efektywność bloków jądrowych, a także ich dyspozycyjność i osiąga ona już prawie 90%.

Globalny scenariusz rozwoju energetyki jądrowej przewiduje prawie dwukrotny wzrost ilości bloków jądrowych na świecie do roku 2050. Oczywiście wraz ze wzrostem ilości elektrowni jądrowych konieczne jest zmniejszenie ilości występowania poważnych awarii reaktorowych do minimum.

---

\* Politechnika Poznańska.

Rozwój reaktorów LWR zmierza w kierunku realizacji projektów, które wykorzystują połączenie czynnych i pasywnych układów bezpieczeństwa w celu zwiększenia niezawodności systemów bezpieczeństwa instalacji reaktorowych. Prowadzone są także prace nad reaktorami IV generacji oraz prace studyjne, w których bada się możliwości rozbudowy bloków jądrowych w celu podniesienia ich sprawności [2, 3, 4, 8, 9, 13].

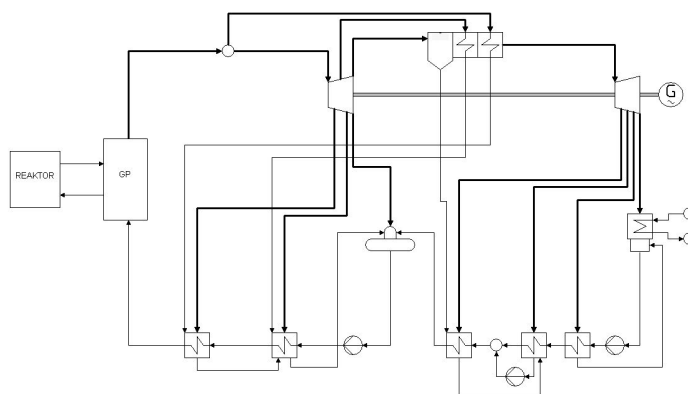
## 2. UKŁAD PODSTAWOWY

Jako wyjściowy układ do dalszych badań został zamodelowany uproszczony schemat bloku jądrowego AP600 o mocy elektrycznej 619 MW (rys.1). Reaktor AP600 wprowadzony przez firmę Westinghouse (USA) otrzymał certyfikat Komisji Nadzoru Jądrowego w 1999 roku i należy do III generacji reaktorów [7]. Podstawowe dane techniczne elektrowni jądrowej z tym reaktorem przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry bloku jądrowego z reaktorem AP600

Elektrownia jądrowa z reaktorem AP600	
Strumień pary świeżej, kg/s	1063
Temperatura pary świeżej, °C	272,5
Ciśnienie pary świeżej, MPa	5,72
Temperatury wody do generatora pary, °C	226,7
Moc cieplna reaktora, MW <sub>t</sub>	1933
Moc elektryczna, MW <sub>e</sub>	619
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej, %	32

W elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR) ciepło generowane przez rozszczepienia paliwa jądrowego w rdzeniu reaktora jest usuwane przez system chłodzenia reaktora. Ciśnienie jakie wytwarzane w „pierwotnej” pętli jest wystarczająco wysokie, aby woda chłodząca reaktor była cały czas w fazie ciekłej, nawet po zaabsorbowaniu ciepła z reaktora. Po przejściu ciepła w reaktorze, główny przepływ pierwszego obiegu wody jest kierowany do wytwornicy pary (wtórna pętla). Woda wtórnego obiegu dostaje się do generatora pary (z temperaturą ok. 226 °C), gdzie zamienia się w parę nasyconą o parametrach: ciśnienie  $p_0 = 5,72$  MPa i temperatura  $t_0 = 272,5$  °C. Para nasycona jest kierowana z generatora pary do turbin parowych, gdzie rozszerza się do ciśnienia w skraplaczu, które jest równe  $p_k = 0,008$  MPa. Moc elektryczna osiągnięta w tym bloku  $N_{el} = 619$  MW, a sprawność elektryczna netto osiąga wartość  $\eta_{el} = 31,79\%$ . Ta niewielka sprawność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych sprawia, że od lat prowadzi się badania nad możliwością jej zwiększenia.

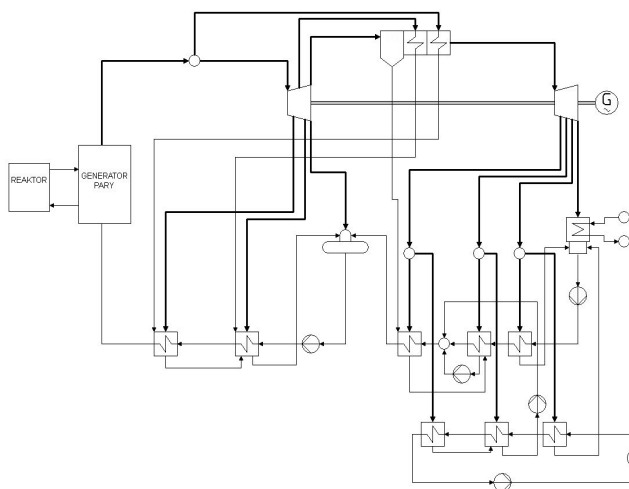


Rys. 1. Podstawowy układ technologiczny bloku elektrowni jądrowej (GP- generator pary)

### 3. ELEKTROCIEPŁOWNIA JĄDROWA

W chwili obecnej energetyka jądrowa ponownie zaczyna zyskiwać na znaczeniu, stąd wydaje się uzasadnione, aby powrócić do koncepcji wykorzystania paliwa jądrowego również do wytwarzania ciepła. Badania nad wykorzystaniem elektrowni jądrowych w ciepłownictwie prowadzone były od dawna jednak w większości przypadków pozostały jedynie w sferze projektów [1].

Na rysunku 2 przedstawiono układ technologiczny elektrowni jądrowej, w której dołączono wymienniki pozwalające wykorzystać parę z upustów turbiny do podgrzewania wody sieciowej.



Rys. 2. Układ technologiczny bloku elektrowni jądrowej z dołączonym członem ciepłowniczym

Na podstawie sporządzonego bilansu masowego oraz cieplnego dla obiegu wtórnego elektrowni jądrowej, w warunkach poboru z turbiny mocy cieplnej rzędu  $250 \text{ MW}_t$  (dla temperatury wody sieciowej równej  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ), wyznaczono nowe strumienie masy czynnika roboczego w poszczególnych punktach układu. Moc elektryczna wytwarzana w takim przypadku wynosi ok.  $579 \text{ MW}_e$ . Sprawność wytwarzania energii elektrycznej  $\eta_{el} = 29,75\%$ . Natomiast sprawność energetyczna w tym przypadku jest równa  $\eta_{en} = 42,8\%$ .

Oczywiście w przypadku elektrowni jądrowej o podobnej mocy istnieje możliwość wytwarzania ciepła o wiele większej mocy, jednak należy pamiętać o tym, że na to ciepło musi być zapotrzebowanie.

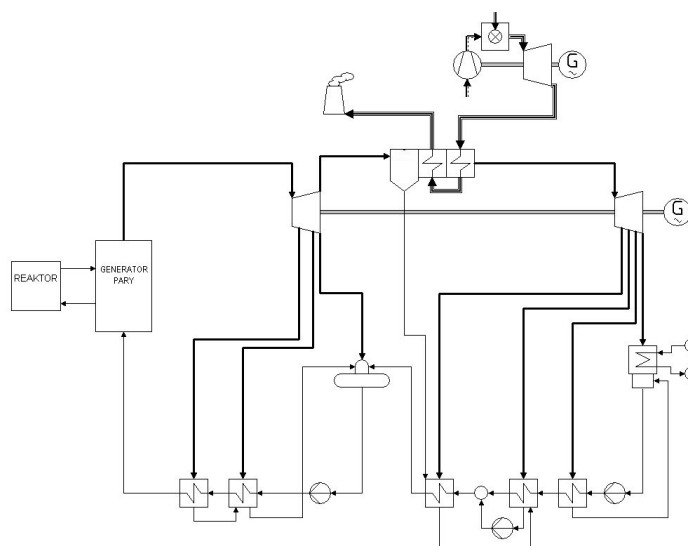
#### **4. WSPÓŁPRACA BLOKU JĄDROWEGO Z TURBINĄ GAZOWĄ PRACUJĄCĄ JAKO OSUSZACZ I PRZEGRZEWACZ PARY**

Technologie turbin gazowych są intensywnie badane i wykorzystywane w różnych aplikacjach energetycznych. Głównym celem łączenia różnych układów energetycznych z turbinami gazowymi jest zwiększenie efektywności energetycznej.

W układach z pojedynczą turbiną gazową, podłączoną bezpośrednio do generatora, możliwa jest produkcja energii elektrycznej ze sprawnością na poziomie ok. 38%. Sprawność taką uzyskuje się przy wykorzystaniu obecnych technologii, a prowadzone są prace i badania nad zwiększeniem tej sprawności do poziomu ok. 41%, w układzie prostym [6].

Powodem tak stosunkowo niskiej sprawności jest fakt, że gazy wylotowe, opuszczające turbinę gazową, mają jeszcze ciągle bardzo wysoką temperaturę i niosą ze sobą znaczną ilość energii, która w prostym układzie turbiny gazowej jest bezpowrotnie tracona razem ze spalinami. Energia ta może być wykorzystana w kolejnych przemianach energetycznych, podnosząc dzięki temu sprawność ogólną układu. Jednym z takich układów może być wykorzystanie turbiny gazowej w układzie kombinowanym z blokiem jądrowym. Na rysunku 3, przedstawiono propozycję włączenia turbiny gazowej do układu parowego elektrowni jądrowej w miejsce osuszacza pary. Spaliny opuszczające turbinę gazową o temperaturze  $t = 641 \text{ }^\circ\text{C}$ , służą w tym układzie do podniesienia parametrów pary opuszczających część wysokoprężną turbiny w elektrowni jądrowej. Para ta w tradycyjnym układzie ma wilgotność rzędu 12-13% i dalsze jej rozprężanie w części niskoprężnej turbiny jest niemożliwe bez osuszenia i podniesienia jej parametrów temperaturowych. W układzie przedstawionym na rysunku 3, turbina gazowa ma moc elektryczną równą  $P = 255 \text{ MW}$ . Spaliny opuszczające turbinę gazową mają temperaturę  $t_{sp} = 641 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wadą takiego rozwiązania jest fakt, że spaliny po opuszczeniu osuszacza ciągle mają wysoką temperaturę ( $t_{spwyl} = 218 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Zaletą jest fakt, że całkowita moc elektrowni jest

zdecydowanie większa i wynosi 955 MW (moc turbin parowych 700 MW, moc turbiny gazowej 255 MW).



Rys. 3. Układ technologiczny bloku elektrowni jądrowej współpracującej z turbiną gazową pracującą jako przegrzewacz pary

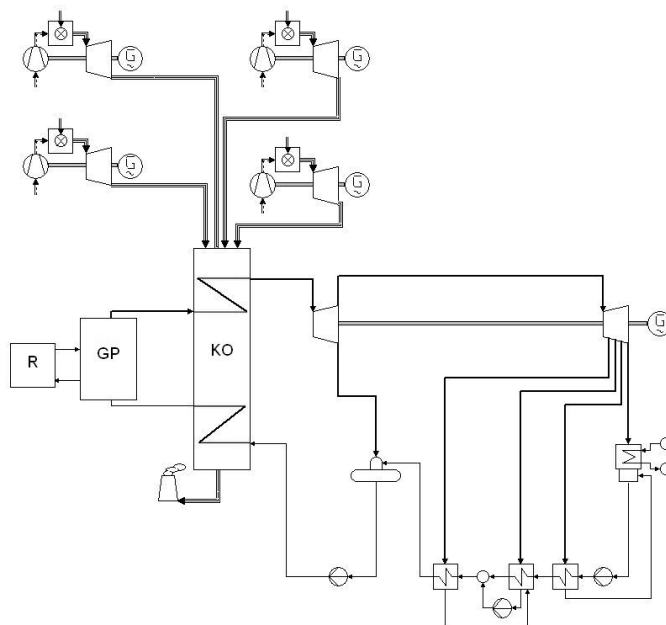
## 5. BLOK GAZOWO-JĄDROWY

Koncepcja bloku gazowo-jądrowego wynika z faktu, że temperatura pary jaką uzyskujemy w generatorze pary, ze względów bezpieczeństwa reaktora jądrowego, nie przekracza 300 °C. Jeśli połączymy w jednym układzie technologicznym turbinę gazową i wykorzystamy gorące spaliny do przegrzania pary opuszczającej generator pary bloku jądrowego, możliwe będzie podniesienie sprawności całego układu. Elementem łączącym oba obiegi jest kocioł odzysknicowy, w którym gorące spaliny (o temperaturze rzędu 550-600 °C) przekazują swe ciepło parze z generatora pary bloku jądrowego (rys. 4) [3, 5, 9, 10, 11, 12].

Poważnym problemem, który należy rozwiązać jest fakt, że ilość pary, którą należy przegrzać jest tak duża, że konieczne jest stosowanie układu kilku turbin gazowych pracujących na jeden kocioł odzysknicowy.

Kocioł odzysknicowy pracuje przy jednym ciśnieniu pary bez podgrzewania, z jednym przegrzewaczem pary. W celu ograniczenia temperatury spalin opuszczających kocioł odzysknicowy zastosowano ekonomizer. Ekonomizer zastępuje układ podgrzewania regeneracyjnego wody zasilającej generator pary bloku jądrowego. Pomimo tego zabiegu temperatura spalin za kotłem odzysknicowym przekracza 200 °C. Stąd celowe są dalsze badania nad

możliwością wykorzystania tego ciepła i podniesienia sprawności bloku gazowo-jądrowego. Turbiny gazowe pracujące na jeden kolektor spalin mają moc elektryczną równą  $4 \times 252$  MW. Temperatura spalin opuszczających turbinę gazową wynosi  $t_{\text{spwyl}} = 566$  °C. Strumień spalin z każdej z turbin jest równy  $D_{\text{sp}} = 659$  kg/s.



Rys. 4. Układ technologiczny bloku elektrowni gazowo-jądrowej (R – reaktor, GP – generator pary, KO – kocioł odzysknicowy)

Łączna moc bloku gazowo-jądrowego dla tak zbudowanego układu wynosi  $4625$  MW<sub>e</sub>, a sprawność wytwarzania energii elektrycznej jest równa  $43,54$  %.

## 6. WNIOSKI

1. Jednym z zagadnień, które należy wnikliwie przeanalizować przy opracowywaniu programu rozwoju energetyki jądrowej w Polsce jest możliwość wykorzystania elektrowni jądrowych do zasilania w ciepło odbiorców komunalnych. Jest to zagadnienie aktualne i może być brane pod uwagę na etapie wyboru lokalizacji przyszłych elektrowni jądrowych. Rozwiązanie takie może poprawić efektywność energetyczną oraz ekonomiczną elektrowni jądrowej. Aby tak było, elektrownia jądrowa powinna być zlokalizowana w pobliżu rejonów charakteryzujących się wysokim zapotrzebowaniem na moc cieplną.

2. Technologie wykorzystujące gaz ziemny lub jego pochodne stają się coraz popularniejsze w europejskim i światowym sektorze energetycznym. Obok energetyki atomowej jest to najbardziej dynamicznie rozwijający się podsektor wytwarzania energii elektrycznej na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat. Elektrownie jądrowe wykorzystujące cykl kombinowany mogą być ciekawą propozycją zwiększającą efektywność wytwarzania energii elektrycznej.
3. Przekształcenie tradycyjnego bloku jądrowego do technologii gazowo-jądrowej powoduje ponad 3-krotny wzrost produkcji energii elektrycznej, a osiągalna sprawność wytwarzania energii elektrycznej przekracza 43%, w zależności od zastosowanych turbin gazowych. Rozwiązanie to może dać nowy kierunek w rozwoju reaktorów jądrowych i elektrowni jądrowych. Zestawienie wyników badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie podstawowych danych uzyskanych z obliczeń dla poszczególnych wariantów

Numer wariantu (nr rys.)		Rys. 1	Rys. 2	Rys. 3	Rys. 4
Strumień pary	kg/s	1063			
Parametry pary	MPa/°C	57,2/272,5			
Moc generatora turbiny parowej	MW	619	579	700	1063
Wytwarzana moc cieplna	MW	-	250	-	-
Moc generatora turbiny gazowej	MW	-	-	255	4x252
Moc całkowita bloku	MW	619	579	955	4625
Sprawność wytwarzania en. elektr.	%	31,79	29,75	36,65	43,54
Sprawność energetyczna	%	31,79	42,80	36,65	43,54

## LITERATURA

- [1] Reński A., elektrownie jądrowe jako źródła ciepła sieciowego i technologicznego, Materiały III Szkoły Energetyki Jądrowej, Gdańsk 2010.
- [2] Tsiklauria G., Talbert R., Schmitt B., Filippov G., Bogoyavlensky R., Grishanin E., Supercritical steam cycle for nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, pp. 1651–1664, No. 235 (2005).
- [3] Panesor T., The Role of Physics in Improving the Efficiency of Electricity Generation and Supply, A report prepared for the Institute of Physics by AEA Energy & Environment, Londyn, 2008.
- [4] Alsairafi A.A., Effects of ambient conditions on the thermodynamic performance of hybrid nuclear-combined cycle power plant, International Journal of Energy Research, 2011.
- [5] Combining gas with nuclear energy, Electrical News – Supplement For Electrical Engineers, pp. 2-4, 2007.
- [6] Wędzik A., Układy kombinowane produkcji energii elektrycznej, Energetyka, str. 323-338, 2006.

- [7] Cummins W.E., Corletti M.M., Schulz T.L., Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant, Proceedings of ICAPP '03, Cordoba, Spain, May 4-7, Paper 3235, 2003.
- [8] Zaryankin A., Lyskov M., Arianov S., Rogalev A., Super powerful steam superheaters and turbines for hybrid nuclear power plants, Journal of Power Technologies, pp. 191–197, No. 91(4), 2011.
- [9] Homola V., Gazturbinas fejeles a Paksi Atomeromuben?, Magyar Energetika, str. 17-19, 2002/2.
- [10] Alsairafi A.A., Energetic and exergetic analysis of a hybrid combined nuclear power plant, International Journal Of Energy Research, 2011.
- [11] Darwish M.A., Al Awadhi F.M., Bin Amer A.O., Combining the nuclear power plant steam cycle with gas turbines, Energy, No. 35, pp.. 4562-4571, 2010.
- [12] Veszely K., Hybrid combined cycle power plant, International Conference Nuclear Energy for New Europe 2002, Kranjska Gora, Slovenia, pp. 0103.1- 0103.8, 2002.
- [13] Ядерный парогазовый цикл – путь экономии углеводородных энергоресурсов, Походяев Сергей Борисович, <http://www.and-tc.ru>.
- [14] Cycle-Tempo Release 5.0. Delft University of Technology.

#### **MODELLING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS**

Nuclear steam power plants (NPP) are characterized by low efficiency, compared to steam power plants using fossil fuels. This is due to the relatively low temperature and pressure-throttling conditions compared to those using fossil fuel.

The paper presents the possibility of development of the technological systems of NPP. In the following modifications presents opportunities for cooperation NPP with GT. Combining GT with the NPP can increase the capacity and efficiency of the combined plant, compared to either the GT open cycle or the NPP separate plants. This paper investigates the feasibility of utilizing the hot gases leaving the GT to superheat the steam leaving the steam generator of the NPP.