

Jakub SIERCHUŁA

ANALIZA ENERGETYCZNA UKŁADU TECHNOLOGICZNEGO ELEKTROWNI JĄDROWEJ

W niniejszej pracy zaprezentowano analizę energetyczną układu technologicznego elektrowni jądrowej, obejmującą swoim zakresem przedstawienie struktury elektrowni jądrowej z reaktorem wodnociśnieniowym, charakterystykę obiegu Rankien'a stanowiącego podstawowy obieg cieplny wykorzystywany w elektrowniach jądrowych, przedstawiono główne straty generowane podczas normalnej eksploatacji oraz metody wyznaczania sprawności, a także opis oraz metody optymalizacji najważniejszych parametrów obiegu pierwotnego oraz obiegu chłodzenia bloku jądrowego. Zaprezentowany został również uproszczony układ technologiczny rzeczywistej elektrowni jądrowej z wodnociśnieniowym reaktorem WWER-440, na podstawie którego przedstawiono metodę obliczeniową wykorzystywaną do wyznaczania konkretnych wartości parametrów bloku.

SŁOWA KLUCZOWE: energetyka jądrowa, reaktor wodnociśnieniowy, blok energetyczny, bilans energetyczny

1. ELEKTROWNIA JĄDROWA Z REAKTOREM WODNOCIŚNIENIOWYM

Elektrownie jądrowe z ciśnieniowymi reaktorami wodnymi cechuje system dwuobiegowy, w którego skład wchodzi: obieg pierwotny oraz obieg wtórny. Do obiegu pierwotnego zalicza się zbiornik reaktora z rdzeniem, wytwornicę pary, stabilizator ciśnienia oraz główną pompę obiegową. Do podstawowych elementów obiegu wtórnego zalicza się natomiast wytwornicę pary, turbinę parową, skraplacz, podgrzewacze regeneracyjne, a także pompę wody zasilającej. Ograniczenia konstrukcyjne pomp oraz ograniczenia związane z maksymalną wielkością wytwornic pary powodują konieczność podzielenia obiegu pierwotnego na kilka pętli, których liczba, w zależności od rodzaju i mocy reaktora wynosi od 2 do 6. Mianem pętli określa się zestaw wszystkich połączonych rurociągami urządzeń wchodzących w skład obiegu pierwotnego reaktora [1].

Czynnikiem roboczym zarówno obiegu pierwotnego jak i wtórnego jest zwykła woda (choć możliwe jest również wykorzystanie D_2O , CO_2 lub helu). W obiegu pierwotnym woda trafia do powierzchniowych wymienników ciepła

* Politechnika Poznańska.

(wytwornic pary), gdzie przepływa przez tysiące rurek zamieniając omywającą je wodę obiegu wtórnego w parę wodną pod wysokim ciśnieniem. Wygenerowana w ten sposób para wodna rozpręża się następnie w turbinie parowej połączonej z generatorem, a następnie podlega skropleniu w skraplaczu i ponownie trafia do wytwornic pary. W celu otrzymania zadowalających parametrów termodynamicznych wody obiegu wtórnego, temperatura wody w obiegu pierwotnym powinna wynosić od 300 do 350°C przy ciśnieniu około 14 MPa [1].

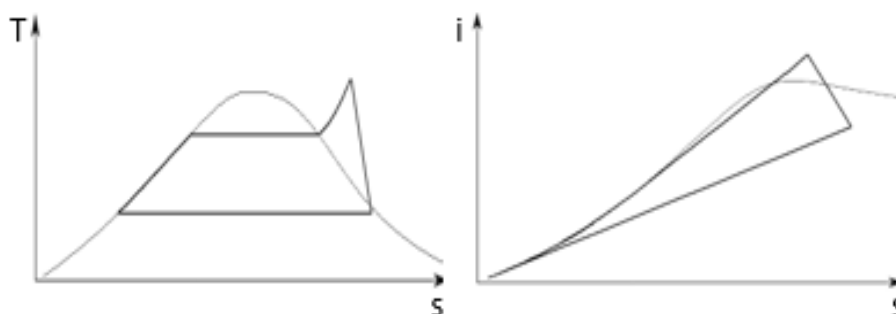
Wytwornice pary w ciśnieniowych reaktorach wodnych posiadają układ pionowy. Ponadto są podzielone na dwie sekcje: sekcję odparowania wody (występuje w niej wrzenie wody obiegu wtórnego) oraz sekcję separacji wilgoci (gdzie para nasycona sucha przeznaczona do rozprężenia w turbinie jest oddzielana od wody). Niektóre rozwiązania konstrukcyjne wytwornic pary przewidują zastosowanie dodatkowego przegrzewu, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie wilgoci pary na końcowych stopniach turbiny, co umożliwi zwiększenie sprawności oraz zmniejsza zużycie łopatek.

W celu zachowania stabilności oraz bezpieczeństwa eksploatacji, w rdzeniu należy utrzymywać odpowiedni poziom ciśnienia, aby nie doprowadzić do wrzenia wody. W celu zapobiegania wahaniom ciśnienia spowodowanym na przykład zmianom zapotrzebowania na energię cieplną lub elektryczną stosuje się stabilizator ciśnienia, który podłącza się bezpośrednio do obiegu pierwotnego. Zasadę działania stabilizatora ciśnienia można przedstawić na prostym przykładzie. Przykładowo, w wyniku spadku zapotrzebowania na energię elektryczną zmniejsza się obciążenia turbiny. Powoduje to wzrost temperatury oraz objętości czynnika roboczego (wody) w obiegu pierwotnym. Wzrost objętości wody bezpośrednio wpływa na poziom wody w stabilizatorze. Zwiększenie poziomu wody prowadzi do wzrostu ciśnienia sprężonej pary, co z kolei uruchamia dysze zraszające, zasilane wodą pobieraną z zimnej części rurociągu. Dzięki temu część sprężonej pary skrapla się, ciśnienie maleje, a układ powraca do równowagi. W przypadku gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną wzrasta, objętość oraz ciśnienie wody w obiegu pierwotnym maleje. W celu doprowadzenia układu w stan równowagi uruchamia się grzałki nurnikowe, dzięki którym część wody odparowuje, zwiększając swoją objętość oraz ciśnienie [1, 2].

Stabilizator ciśnienia wykonuje się w postaci wysokociśnieniowego cylindrycznego zbiornika, który od spodu połączony jest z częścią rurociągu, którą przepływa wyprowadzana z rdzenia woda. Na dnie stabilizatora znajduje się zestaw grzałek nurnikowych umożliwiających odparowanie części czynnika roboczego, natomiast na górze znajdują się zraszacze wtryskujące wodę pobieraną z zimnej części rurociągu (rurociągi znajdujące się przed zbiornikiem reaktora). W elektrowni jądrowej występuje tylko jeden stabilizator ciśnienia gwarantujący stabilizację we wszystkich pętlach obiegu pierwotnego [1, 2].

2. OBIEG TERMODYNAMICZNY ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Elektrownie jądrowe z reaktorami wodno-ciśnieniowymi, podobnie z resztą jak elektrownie konwencjonalne, pracują w oparciu o obieg Rankine'a. Na rysunku 2.1 zostały przedstawione przemiany tego obiegu na parę nasyconą zachodzące w typowej elektrowni jądrowej.



Rys. 2.1. Przemiany obiegu Rankine'a na wykresach T-s oraz i-s [3]

Termodynamiczne cechy powyższego obiegu wyrażane są poprzez sprawność teoretyczną oraz pracę jednostkową.

Pracą jednostkową obiegu (w) określa się pracę mechaniczną wykonaną przez 1 kg czynnika roboczego, którym w tym przypadku jest para wodna. Jest to różnica pomiędzy ciepłem doprowadzonym do wytwornicy pary (q), a ciepłem odprowadzonym do skraplacza (q_0) [3, 5].

$$w = q - q_0 \quad (1)$$

Sprawność teoretyczna η_t określana jest następująco:

$$\eta_t = \frac{w}{q} = 1 - \frac{q_0}{q} \quad (2)$$

Przyjmując odpowiednie wartości temperatur w zależności od doprowadzanego (q) lub odprowadzanego (q_0) ciepła oraz zmiany entropii Δs w trakcie wyżej wymienionych procesów:

$$T = \frac{q}{\Delta s} \quad \text{oraz} \quad T_0 = \frac{q_0}{\Delta s} \quad (3)$$

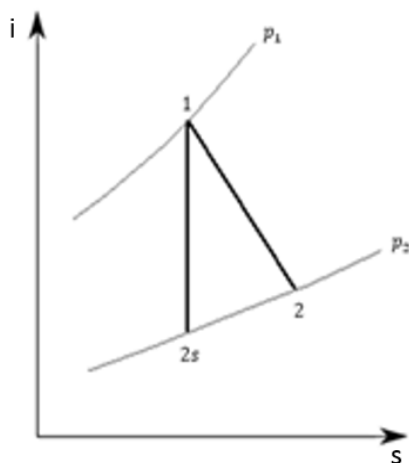
otrzymuje się następującą zależność na sprawność teoretyczną obiegu Rankine'a:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (4)$$

3. STRATY ORAZ SPRAWNOŚCI W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Straty w elektrowni jądrowej powstają na skutek naturalnych procesów dążących do osiągnięcia stanu równowagi. Do takich procesów zalicza się między innymi wyrównywanie temperatur czy ciśnień oraz straty generowane przez siłę tarcia. Wszystko to zmniejsza ilość energii cieplnej, którą można wykorzystać do wytworzenia pracy mechanicznej.

Opisane wyżej procesy można obserwować na przykład podczas procesu rozprężania pary wodnej w turbinie, gdzie straty generowane są w wyniku kontaktu kropelek wody z łopatkami turbiny oraz podczas przepływu czynnika roboczego (siły tarcia). Wówczas użyteczny wewnętrzny spadek entalpii Δi_i jest mniejszy od izentropowego spadku entalpii Δi_0 , co przedstawiono na wykresie – rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wykres i-s – przebieg procesu rozprężania pary w turbinie [3]

Wewnętrzna strata pracy spowodowana spadkiem entalpii opisana jest następującą zależnością:

$$\eta_{wt} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta i_{ik} \dot{m}_{pk}}{\sum_{k=1}^n \Delta i_{0k} \dot{m}_{pk}} \quad (5)$$

gdzie: n – liczba stopni turbiny, \dot{m}_{pk} – strumień masy pary przepływającej przez k-ty stopień.

Poza przedstawioną wyżej sprawnością wewnętrzną turbiny należy również uwzględnić sprawność mechaniczną, oraz sprawność generatora. Sprawność mechaniczna η_m definiowana jest jako stosunek mocy mechanicznej na sprzęgle generatora (P_m) do mocy turbiny przy użytecznym wewnętrznym spadku entalpii (P_t):

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_t} \quad (6)$$

Natomiast sprawność generatora η_g określa się jako stosunek mocy elektrycznej na zaciskach generatora (P_G) do mocy mechanicznej (P_m). Przy określaniu tej wielkości określa się zatem straty spowodowane siłą tarcia w łożyskach generatora, straty ciepłone, straty w żelazie czy w uzwojeniach.

$$\eta_g = \frac{P_G}{P_m} \quad (7)$$

Znając powyższe wartości można wyznaczyć sprawności brutto i netto dla turbozespołu. Sprawność brutto określana jest następującym wzorem:

$$\eta_{Tbrutto} = \eta_t \eta_{wt} \eta_g \quad (8)$$

Natomiast sprawność turbozespołu netto można wyznaczyć uwzględniając moc zużywaną przez elektrownie na potrzeby własny (P_{pw}), na przykład do napędów pomp, wentylacji, oświetlenia, itp.

$$\eta_{Tnetto} = \frac{P_G - P_{pw}}{P_t} \quad (9)$$

gdzie P_t jest teoretyczną mocą turbiny przy izentropowym spadku entalpii.

4. OBIEG PIERWOTNY ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Z wykresu T-s przedstawionego na rysunku 2.1 wynika, że temperatura pary nasyconej (T_p) generowanej w wytwornicy pary ma znaczący wpływ na sprawność elektrowni jądrowej z reaktorem wodno-ciśnieniowym. Temperatura ta zależy od temperatury wylotowej chłodziwa z wytwornicy pary – równej temperaturze na wlocie do reaktora – T_{chl} oraz od różnicy temperatur (ΔT) pomiędzy chłodziwem a czynnikiem roboczym.

$$T_p = T_{chl} - \Delta T \quad (10)$$

Zgodnie z powyższą zależnością, w celu osiągnięcia możliwie najwyższej temperatury pary nasyconej w na wylocie z wytwornicy pary przy danej temperaturze chłodziwa różnica temperatur ΔT musi być jak najmniejsza. Dzięki temu uzyskuje się wysoką sprawność teoretyczną oraz redukuje koszty paliwa. Niemniej zagwarantowanie małej różnicy temperatur wymusza zwiększenie powierzchni grzejnej układu wytwarzania pary, zgodnie z poniższą zależnością [4]:

$$Q_{wp} = \alpha A \Delta T_{sr} \quad (11)$$

gdzie: Q_{wp} – moc cieplna wytwornicy pary [W], α – współczynnik przenikania ciepła [W/m²K], A – powierzchnia wymiany ciepła w wytwornicy pary [m²], ΔT_{sr} – średnia logarytmiczna różnica temperatur [K].

W związku z tym, że wartość temperatury ΔT_{sr} jest uzależniona od różnicy temperatur pomiędzy chłodziwem a czynnikiem roboczym ΔT zmniejszenie tego parametru obniża moc cieplną wytwornicy pary. Zachowanie jednakowej mocy przy stałym współczynniku przenikania ciepła oraz zmniejszonej średniej logarytmicznej różnicy temperatur jest zatem możliwe jedynie poprzez zwiększenie powierzchni wymiany ciepła. W takim przypadku zestawia się zyski uzyskane w wyniku zmniejszenia zużycia paliwa z ceną rozbudowy wytwornicy pary. Za optymalne wartości ΔT przyjmuje się przeważnie od 5 do 15°C, natomiast w przypadku A około 5-10 m² na 1 MW mocy cieplnej [5].

Wartość temperatury T_{ch1} , determinująca temperaturę pary nasyconej, jest zależna od warunków pracy reaktora, zgodnie z bilansem dla reaktora:

$$Q_r = \dot{m}_{ch} c_{pch}(T_{ch2} - T_{ch1}) \quad (12)$$

przy czym: Q_r – moc cieplna reaktora [W], \dot{m}_{ch} – strumień masy chłodziwa [kg/s], c_{pch} – ciepło właściwe chłodziwa [J/kgK], T_{ch2} – temperatura chłodziwa na wylocie z rdzenia [°C].

Pomijając straty w obiegu pierwotnym, można założyć, że $Q_r = Q_{wp}$, zatem z bilansu wytwornicy pary można otrzymać następującą zależność:

$$\dot{m}_{ch} c_{pch}(T_{ch2} - T_{ch1}) = \dot{m} c_p (T_p - T_l) \quad (13)$$

gdzie: \dot{m} – strumień masy czynnika roboczego [kg/s], c_p – ciepło właściwe czynnika roboczego [J/kgK], T_l – temperatura wody zasilającej [°C].

Analizując zależność (13) można dojść do kilku wniosków. Po pierwsze zmniejszenie temperatury chłodziwa na wlocie do reaktora (T_{ch1}) zmniejszy strumień masy chłodziwa (\dot{m}_{ch}). W konsekwencji zredukuje się również moc pomp, co przełoży się na mniejsze potrzeby własne elektrowni. Wadą takiego rozwiązania jest jednak zmniejszenie wartości temperatury pary świeżej – zależność (10) – co doprowadzi do pogorszenia się sprawności teoretycznej elektrowni jądrowej. Istotnym zagadnieniem jest zatem optymalne dobranie różnicy temperatur $T_{ch2} - T_{ch1}$, w ten sposób, aby zachować stosunkowo wysoką sprawność układu, korzystną prędkość przepływu chłodziwa oraz optymalną powierzchnię wymiany ciepła. W obecnie projektowanych jednostkach różnica temperatur chłodziwa pomiędzy wlotem a wylotem z rdzenia wynosi ok 30-45°C [5] (reaktor AP1000 – 45,3°C, EPR – 34,8°C, WWER-1000 – 30,0°C [6]), co

wymusza ogromne przepływy w obiegu pierwotnym (reaktor AP1000 – 14,3 t/s, EPR – 34,0 t/s, WWER-1000 – 23,9 t/s [6]). Konstrukcja tak dużych pomp cyrkulacyjnych nie jest obecnie możliwa, w związku z czym obieg pierwotny dzieli się na kilka (2-6) pętli. Oczywiście rozwiązanie to ma również wiele zalet, między innymi zwiększa poziom bezpieczeństwa, ponieważ w przypadku awarii jednej z pomp z rdzenia reaktora nadal odbierane jest ciepło [1, 5].

5. OBIEG WODY CHŁODZĄCEJ

W obiegu wody chłodzącej najistotniejszy parametrem jest ciśnienie w skraplaczu p_k bądź odpowiadająca mu temperatura skraplania T_k . Różnicę pomiędzy wyżej wymienioną temperaturą a temperaturą wody chłodzącej na wylocie ze skraplacza T_{wch1} określa się poprzez minimalny spadek temperatury ΔT_{min} zgodnie z poniższą zależnością:

$$\Delta T_{min} = T_k - T_{wch2} \quad (14)$$

Jeżeli powyższa zależność zostanie uwzględniona w bilansie cieplnym skraplacza:

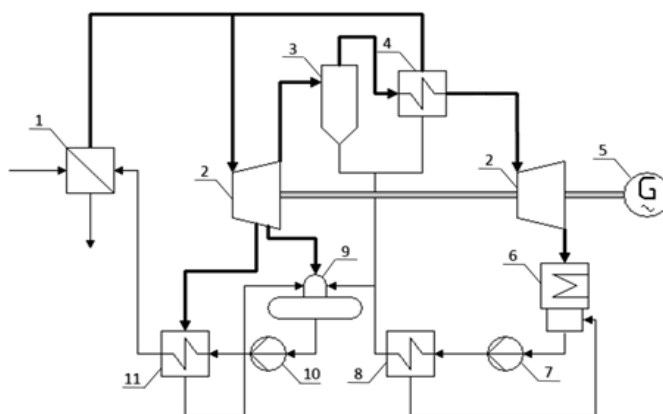
$$\dot{m}_{wch} c_{pwch} (T_k - \Delta T_{min} - T_{wch1}) = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (15)$$

gdzie: \dot{m}_{wch}/\dot{m} – strumień masy wody chłodzącej/czynnika roboczego [kg/s], c_{pwch}/c_p – ciepło właściwe wody chłodzącej/czynnika roboczego [J/kgK], T_{wch1}/T_2 – temperatura wody chłodzącej/czynnika roboczego na wlocie do skraplacza [°C], T_1 – temperatura czynnika roboczego na wylocie ze skraplacza [°C].

Po analizie zależności (15) można dojść do wniosku, że temperatura skraplania T_k (w obiegu wody chłodzącej o stałej temperaturze) zależy od trzech czynników: strumienia masy wody chłodzącej, strumienia masy czynnika roboczego oraz minimalnego spadku temperatury. Oczywiście im mniejsza wartość ostatniego parametru tym niższe ciśnienie w skraplaczu, dzięki czemu sprawność elektrowni jest większa. Problemem natomiast, podobnie jak w przypadku wytwornicy pary, jest konieczność zwiększenia powierzchni wymiany ciepła w skraplaczu, a co za tym idzie zwiększają się koszty jego budowy i utrzymania. Niską temperaturę skraplania T_k można również otrzymać przy dla strumienia masy wody zasilającej kilkunastokrotnie wyższych od strumienia masy czynnika roboczego. Stosunek dwóch wyżej wymienionych wartości nosi nazwę przekładni skraplacza. Niemniej zwiększanie przekładni również posiada pewne ograniczenia ze względu na możliwości konstrukcyjne. W obecnie stosowanych elektrowniach jądrowych, chłodzonych w obiegu otwartym ciśnienie w skraplaczu mieści się w przedziale od około 4 do 9 kPa [5] (reaktor AP1000 – 9,1 kPa, EPR – 6,6 kPa, WWER-1000 – 3,4 kPa [6]), a minimalny spadek temperatury wynosi 3–4°C [5].

6. UKŁAD TECHNOLOGICZNY ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM WWER-440

Na poniższym rysunku przedstawiony został uproszczony schemat bloku jądrowego z reaktorem WWER-440.



Rys. 6.1. Uproszczony schemat cieplny elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym – turbina K-220-44/3000 dla reaktora WWER-440 [5]

1 – wytwornica pary, 2 – turbina, 3 – separator wilgoci, 4 – przegrzewacz międzystopniowy, 5 – generator, 6 – skraplacz, 7 – pompa skroplin, 8 – podgrzewacz regeneracyjny, 9 – odgazowacz, 10 – pompa wody zasilającej, 11 – podgrzewacz regeneracyjny wysokociśnieniowy

Za pomocą modelu matematycznego można obliczyć, dla zadanych parametrów czynnika roboczego, wartości wskaźników eksploatacyjnych takich jak jednostkowe zużycie pary, jednostkowe zużycie ciepła czy jednostkowe zużycia paliwa. W poniższym przykładzie wyznaczone zostały równania bilansowe, wykorzystane w poniższej macierzy 5x5, dzięki czemu możliwe jest obliczenie rozplywów strumieni masy czynnika roboczego (na przykład w programie MATLAB).

$$\begin{vmatrix} i'_{u1} - i''_{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ i'_{u1} - i_2 + x * i''_2 & i'_{u2} - i_2 + x * i_2 & 0 & i_2 - i_{ow} * t_r & 0 \\ -t_r * x * c_p & -t_r * x * c_p & 0 & * c_p & 0 \\ x * (i_3 - i_{op}) & x * (i_3 - i_{op}) & 0 & (i_{op} - i_3) & 0 \\ (t_r - t_k) * x * c_p & (t_r - t_k) * x * c_p & i'_{u3} & (t_k - t_r) * x & 0 \\ i'_2 - i'_{u1} - x * i_3 & i'_2 - i'_{u2} - x * i_3 & -i''_{u3} & * c_p & 0 \\ + x * i'_k & + x * i'_k & -i'_{u3} & i_1 - i'_2 + x * i_3 & -1/(\eta_g * \eta_m) \end{vmatrix}$$

gdzie: i_1 – entalpia pary z wytwornicy pary, i_2 – entalpia pary na wlocie do osuszacza pary, i_3 – entalpia pary na wlocie do części niskoprężnej turbiny parowej,

i_{op} – entalpia pary za wylocie z osuszacza pary/na wlocie do przegrzewacza międzystopniowego, i_{ow} – entalpia wody na wylocie z przegrzewacza międzystopniowego, $i_{włodg}$ – entalpia wody na wlocie z odgazowywacza, i_{wyodg} – entalpia wody na wylocie z odgazowywacza, i'_{un} – entalpia pary na wylocie z n-tego upustu turbiny, i''_{un} – entalpia wody na wylocie z n-tego wymiennika ciepła, i'_k – entalpia pary na wlocie do skraplacza, t_k – temperatura wody na wylocie ze skraplacza, t_r – temperatura wody za wymiennikiem regeneracyjnym (8), x – stopień wilgotności pary, c_p – ciepło właściwe wody.

Stosując prostą macierz w łatwy i szybki sposób można wyznaczyć wszystkie interesujące nas wartości czynnika roboczego. W przykładzie obliczeniowym nieznanymi parametrami były przepływy w poszczególnych punktach, niemniej w ten sam sposób można wyznaczyć ciśnienia czy wartości temperatury. Dzięki temu istnieje możliwość dogłębnej analizy tych parametrów, a dzięki zastosowaniu metod optymalizacyjnych przedstawionych w punkcie 4 oraz punkcie 5 wyznaczenie możliwie najwyższej sprawności bloku jądrowego z uwzględnieniem ograniczeń wytrzymałościowych elementów i układów obiegu pierwotnego, wtórnego oraz chłodzenia.

LITERATURA

- [1] Celiński Z., Strupczewski A., Podstawy energetyki jądrowej, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- [2] Góra S., Elektrownie jądrowe, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978.
- [3] Laudyn D., Pawlik M., Elektrownie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [4] Pudlik W., Termodynamika, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011
- [5] Ackermann G., Eksploatacja elektrowni jądrowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- [6] <https://aris.iaea.org> (stan na 31.01.2016).

ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANT'S TECHNOLOGICAL SYSTEM

In this paper author presents an analysis of nuclear power plant's technological system. Analysis includes structure of the nuclear power plant, description of pressurised water reactor, characteristic of Rankien cycle, which is which is the main heat cycle using in nuclear power plants, presentation of major losses generated during normal power plant exploitation, methods of determining the efficiency and methods of optimization key parameters of primary and cooling circuit in nuclear power unit. Article also presents a simplified scheme of nuclear power plant with VVER-440 reactor and a mathematical model which allows to calculate the key parameters of this plant.

(Received: 18. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)