

Jakub SIERCHUŁA\*

## ROZRUCH ELEKTROWNI JĄDROWEJ NA PRZYKŁADZIE SYMULATORA C-PWR

Elektrownia jądrowa z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR) składa się z dwóch części: jądrowej oraz konwencjonalnej. Część konwencjonalna jest typowa dla wszystkich elektrowni ciepłych, przy czym od węglowych, różni się głównie niższymi parametrami czynnika roboczego. Istotną różnicę stanowi natomiast obieg jądrowy, którego głównym elementem jest reaktor jądrowy. W reaktorze wytwarzane jest ciepło, transportowane następnie do wytwornicy pary. Szereg procesów związanych z wytwarzaniem, transportem i przetwarzaniem energii cieplnej umożliwia finalnie produkcję energii elektrycznej. W pracy został przedstawiony przebieg rozruchu elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR), obejmujący początkową pracę pomp oraz stabilizatora ciśnienia w celu zwiększenia temperatury i ciśnienia czynnika roboczego w obiegu pierwotnym oraz stopniowe zwiększanie reaktywności w rdzeniu do uzyskania parametrów znamionowych reaktora. Wszystkie wyżej wymienione procesy zostały zasymulowane w programie C-PWR oraz poddane dogłębnej analizie.

SŁOWA KLUCZOWE: energetyka jądrowa, reaktor wodny ciśnieniowy, symulator bloku jądrowego, rozruch reaktora

### 1. ELEKTROWNIE JĄDROWE Z REAKTORAMI WODNYMI CIŚNIENIOWYMI

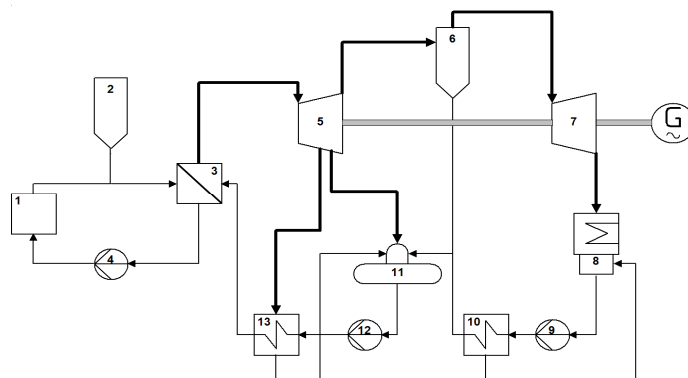
W elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym (PWR – ang. *Pressurized Water Reactor*) można wyróżnić dwa obiegi: pierwotny oraz wtórny. W skład obiegu pierwotnego wchodzi: reaktor jądrowy, wytwornica pary, główna pompa cyrkulacyjna oraz stabilizator ciśnienia. Do głównych elementów obiegu wtórnego zalicza się natomiast: wytwornicę pary, turbinę parową, skraplacz, pompy skroplin, odgazowywacz, podgrzewacze regeneracyjne oraz pompę wody zasilającej. Uproszczony schemat elektrowni jądrowej został przedstawiony na rysunku 1.1.

Zasada działania elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym jest zbliżona do typowej elektrowni konwencjonalnej opalanej węglem. Istotna różnica pomiędzy tymi jednostkami tkwi w sposobie wytwarzania ciepła.

---

\* Politechnika Poznańska.

W elektrowni jądrowej jest ono generowane w rdzeniu reaktora wskutek reakcji rozszczepienia paliwa jądrowego. W elektrowniach jądrowych z reaktorami typu PWR paliwem tym jest nisko/lekkobogacony uran (3–4%  $^{235}\text{U}$ ) [2]. Uwolnione w ten sposób ciepło (podobnie jak ciepło uzyskane w wyniku spalania węgla) wykorzystywane jest do produkcji pary. Para rozpręża się w turbinie sprzężonej z generatorem, dzięki czemu możliwa jest zamiana energii cieplnej na mechaniczną i finalnie na elektryczną. Oczywiście pomiędzy elektrownią jądrową a konwencjonalną istnieją zasadnicze różnice. Przede wszystkim występowanie (w przypadku elektrowni jądrowej) obiegu pierwotnego, utrzymywanego pod wysokim ciśnieniem rzędu 12–16 MPa i temperaturze od 300 do 350°C w zależności od konstrukcji [5]. Ze względu na ograniczenia mocy pomp cyrkulacyjnych obieg pierwotny dzieli się przeważnie na kilka (2–6) obiegów, czyli instalacji łączących rurociągami reaktor z wytwornicami pary [5]. Woda pełniąca rolę chłodziwa wykorzystywana jest nie tylko do odbioru ciepła, ale pełni również funkcję moderatora i reflektora. Woda jest bardzo taną i bezpieczną substancją, której własności termodynamiczne zostały bardzo dobrze poznane, dlatego właśnie tak szeroko wykorzystuje się ją w technologiach jądrowych. Po odebraniu ciepła z rdzenia woda trafia do wytwornicy pary, w której oddaje energię wodzie obiegu wtórnego, która ze względu na niższe ciśnienie (5–6 MPa) odparowuje i zostaje skierowana do turbiny [5].



Rys. 1.1. Uproszczony schemat elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym  
 1 – reaktor jądrowy, 2 – stabilizator ciśnienia, 3 – wytwornica pary, 4 – główna pompa cyrkulacyjna, 5 – turbina (część wysokoprężna), 6 – separator wilgoci, 7 – turbina (część niskoprężna), 8 – skraplacz, 9 – pompa skroplin, 10 – podgrzewacz regeneracyjny, 11 – odgazowywacz, 12 – pompa wody zasilającej, 13 – podgrzewacz regeneracyjny wysokociśnieniowy [4]

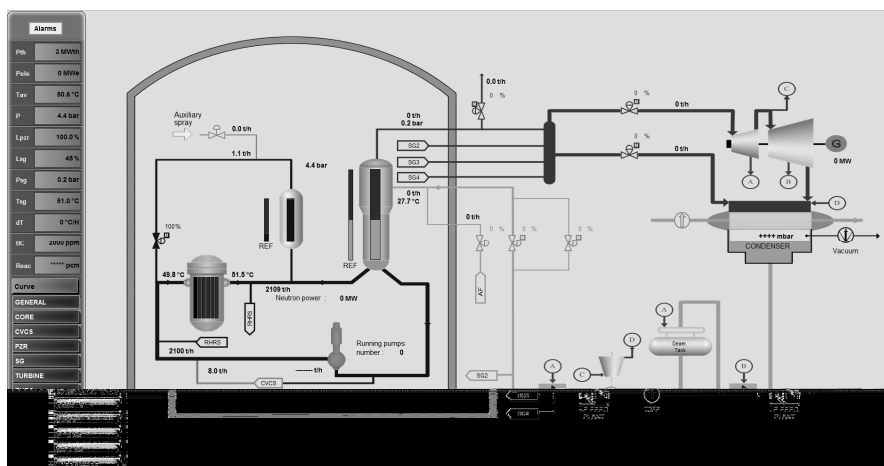
## 2. ROZRUCH BLOKU JĄDROWEGO

W poniższych podrozdziałach opisane zostały operacje ruchowe dla bloku jądrowego z reaktorem wodnym ciśnieniowym o mocy cieplnej 3500 MW, za-

modelowanym w programie C-PWR. W przypadku innych reaktorów PWR operacje ruchowe przebiegają w sposób analogiczny.

Procedury rozruchowe dla bloków jądrowych są uzależnione od stanu wyjściowego urządzeń. Poniżej przedstawiona została sytuacja, w której reaktor jądrowy został nagle odstawiony. Reaktor jest wypełniony wodą z zawartością kwasu borowego na poziomie 2000 ppm, średnia temperatura w obiegu pierwotnym wynosi 50.6°C, ciśnienie około 0.44 MPa. Pręty regulacyjne i bezpieczeństwa znajdują się w rdzeniu reaktora, jednakże samo wygaszenie reakcji łańcuchowej nie może całkowicie przerwać procesów związanych z rozpadem jąder atomowych, które cechują się pewną bezwładnością. W związku z czym przemiany pierwiastków, doprowadzające do ich rozpadu i uwalniania ciepła, przebiegają dalej. Powoduje to generacje tak zwanego ciepła powyłłączeniowego, które doprowadza do nagrzewania się reaktora, nawet po jego wyłączeniu. Właśnie z tego powodu można zaobserwować, że moc cieplna reaktora w fazie początkowej wynosi 3 MW. Stabilizator ciśnienia, zbiornik rozprężacza oraz pętla chłodzenia są wypełnione wodą. Wytwornice pary połączone zarówno z obiegiem pierwotnym jak i wtórnym, które wypełnione są wodą, przy czym w takiej sytuacji umożliwiają odprowadzenie ciepła powyłłączeniowego.

Opisany wyżej układ technologiczny razem z parametrami został przedstawiony na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Układ technologiczny elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym – zrzut ekranu z symulatora C-PWR

Proces ponownego uruchomienia reaktora odbywający się przy powyższych założeniach, obejmuje następujące etapy:

- uruchomienie urządzeń pomocniczych, po uprzednim przeprowadzaniu prób ich działania,

- uruchomienie pomp cyrkulacyjnych,
- podgrzanie wody w obiegu chłodziwa do około 150°C,
- podwyższanie ciśnienia w obiegu pierwotnym do wartości około 2.8–3.0 MPa poprzez zastosowanie systemu regulacji chemicznej i objętości – CVCS,
- dalsze podgrzewanie wody oraz ciśnienia z wykorzystaniem stabilizatora ciśnienia,
- regulacja poziomu stężenia kwasu borowego,
- monitorowanie zmian reaktywności w rdzeniu reaktora,
- stopniowe usuwanie prętów z rdzenia, uruchomienie obiegu wtórnego oraz przejmowanie ciepła z reaktora.

### **3. ZWIĘKSZANIE TEMPERATURY I CIŚNIENIA W OBIEGU PIERWOTNYM**

Podgrzewanie chłodziwa w obiegu pierwotnym następuje poprzez uruchomienie 4 pomp cyrkulacyjnych, które dzięki ciepłu tarcia generowanego podczas ich pracy, umożliwiają wzrost temperatury czynnika roboczego do około 130°C–150°C. Przed uruchomieniem pomp cyrkulacyjnych uruchomione są wszystkie pośrednie układy chłodzenia, a poziom wody w wytwornicach pary po stronie wtórnej doprowadzony jest do wartości znamionowej. Dzięki temu możliwy jest odbiór ciepła powyłączeniowego oraz chłodzenie elementów reaktora przy wyłączonych pompach cyrkulacyjnych. Rozruch pomp w układach z reaktorem wodnym ciśnieniowym odbywa się z reguły z wykorzystaniem zasuw odcinających po stronie ciśnieniowej. Przy uruchamianiu pomp zasuw są zamknięte, dzięki czemu silniki napędowe mogą charakteryzować się mniejszym momentem rozruchowym. Tego rodzaju rozwiązanie narzuca pewne ograniczenia, mianowicie praca pomp przy zamkniętych zasuwach nie może trwać dłużej niż kilka minut ze względu na nadmierne nagrzewanie i ryzyko uszkodzenia łożysk. Liczba pracujących pomp cyrkulacyjnych jest uzależniona od dopuszczalnej szybkości nagrzewania chłodziwa, która w temperaturze poniżej 100°C nie powinna przekraczać 20°C/h [1]. W przeprowadzonej symulacji uruchomione zostały wszystkie cztery pompy cyrkulacyjne.

W tabeli 3.1 przedstawiono temperaturę chłodziwa w obiegu pierwotnym przed załączeniem oraz po sześciu godzinach po załączeniu pomp cyrkulacyjnych.

Temperaturę na poziomie około 140°C–150°C utrzymuje się na stałej wartości poprzez zagwarantowanie odbioru ciepła w wytwornicy pary. W rzeczywistości, podczas rozruchu wykorzystywany jest również skraplacz rozruchowy [1], jednak nie został on uwzględniony w programie symulacyjnym, w związku z czym należy założyć, że całe ciepło odbierane jest w wytwornicach pary.

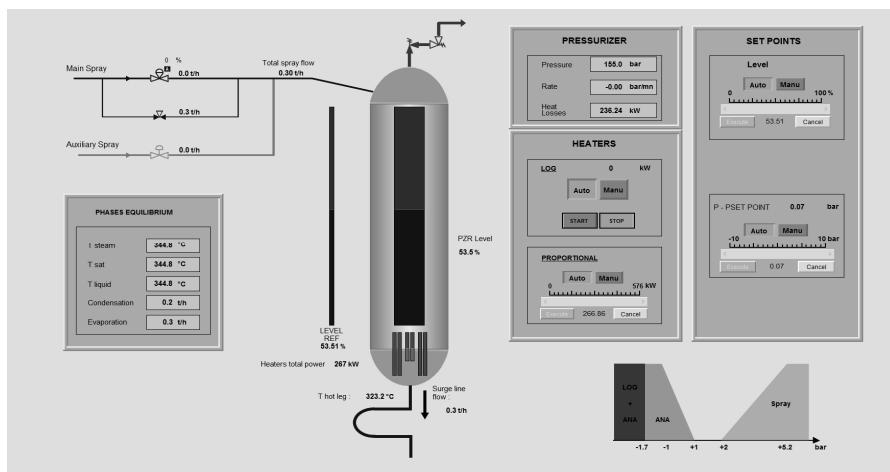
Tabela 3.1. Wyniki symulacji

Czas [godz.]	0	1	2	3	4	5	6
Temperatura na wlocie do reaktora [°C]	49.75	69.62	85.72	100.91	115.04	128.49	140,87
Temperatura na wylocie z reaktora [°C]	51.50	69.68	85.78	100.97	115.10	128.54	140,81

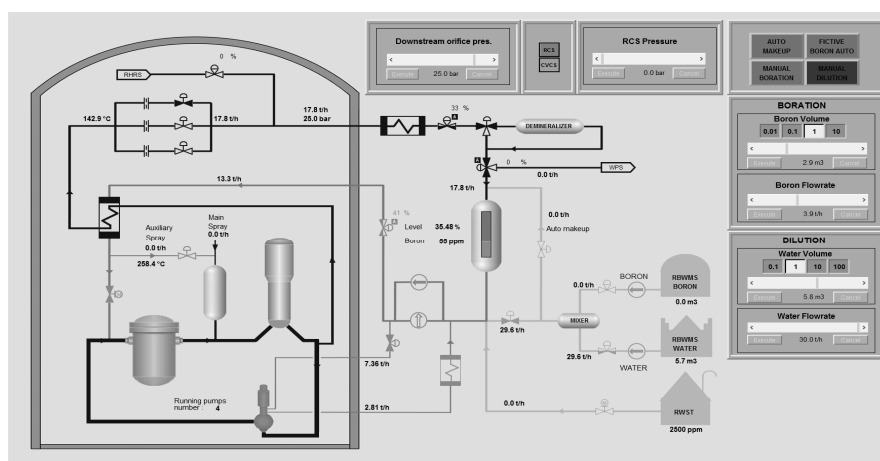
Ciśnienie w obiegu pierwotnym zwiększane jest poprzez zastosowanie pomp wchodzących w skład układu chłodzenia rdzenia (RCS – ang. *Reactor Coolant System*) oraz układu regulacji chemicznej i objętości (CVCS – ang. *Chemical and Volume Control System*). Pompy dodatkowego zasilania wodą lub wysokociśnieniowa pompa probiercza jest w stanie zwiększyć ciśnienie w obiegu pierwotnym do wartości 3.5 MPa. Następuje załączenie grzałek nurnikowych w stabilizatorze ciśnienia [2], powodujących wzrost temperatury wody w stabilizatorze w porównaniu z wodą w obiegu chłodzenia. Zabieg ten ma na celu dalsze zwiększanie ciśnienia w obiegu pierwotnym, co przy wzroście temperatury wody niedopuszcza do jej wrzenia. Aby uniknąć nadmiernemu odparowaniu wody, przez stabilizator przepuszcza się dodatkowo część wody z zimnej części obiegu pierwotnego (0–10% strumienia masy chłodziwa). Dzięki temu, utrzymywany jest stały wzrost ciśnienia i temperatury oraz stabilny poziom wody w stabilizatorze ciśnienia. W analizowanym przypadku maksymalna moc grzałek nurnikowych w stabilizatorze ciśnienia wynosi 2160 kW, jednak należy pamiętać, że dalsze nagrzewania i obciążanie ciśnieniem obiegu pierwotnego do wartości nominalnych musi być dokonywane w zgodzie z opracowanymi przepisami i maksymalną prędkością wynoszącą 20°C/h oraz przy zachowaniu różnicy temperatur pomiędzy stabilizatorem ciśnienia o obiegiem chłodzenia na poziomie 30–70°C. Niedotrzymanie wyżej wymienionych wartości może doprowadzić do powstania nadmiernych naprężeń termicznych w rurociągach, co w konsekwencji może doprowadzić nawet do ich uszkodzenia. W tym samym czasie należy zmniejszać stężenie kwasu borowego, w celu zwiększenia reaktywności, w systemie uzupełniania wody i boru (RBWMS – ang. *the boron and water makeup system*) [3].

Stabilizator ciśnienia oraz system uzupełniania wody i boru wraz z krótkim opisem zostały przedstawione na rysunkach 3.1 oraz 3.2.

Stabilizator ciśnienia wykonany jest w postaci wysokociśnieniowego cylindrycznego zbiornika, którego dolna część została połączona z rurociągiem, którym przepływa woda opuszczająca reaktor jądrowy. W dolnej części stabilizatora umieszczony został zestaw grzałek nurnikowych umożliwiających odparowanie części czynnika roboczego.



Rys. 3.1. Model stabilizatora ciśnienia zaimplementowany w symulatorze C-PWR



Rys. 3.2. System uzupełniania wody i boru

W prezentowanym symulatorze istnieją dwa osobne systemy grzałek, pierwszy o stałej mocy 1584 kW, drugi o regulowanym zakresie od 0 do 576 kW. W górnej części stabilizatora umieszczone są zraszacze wtryskujące wodę pobieraną z zimnej części rurociągu (rurociągi znajdujące się przed zbiornikiem reaktora) lub z dodatkowego zbiornika. Doprowadzenie wody do zraszaczy możliwe jest poprzez regulację systemem zaworów. Ciśnienie może być sterowane przez operatora bądź poprzez układ automatycznej regulacji ciśnienia. W elektrowniach jądrowych z reaktorem wodnym ciśnieniowym stosuje się jeden stabiliza-

tor ciśnienia, który kompensuje zmiany ciśnienia we wszystkich pętlach obiegu chłodzenia [1, 2].

W analizowanym przypadku, po uzyskaniu w obiegu chłodzenia średniej temperatury około 150°C zostają uruchomione wszystkie elementy grzejne w stabilizatorze ciśnienia. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie ciśnienia z początkowej wartości 2.8 MPa do 15.5 MPa

Rysunek 3.2 przedstawia system uzupełniania, umożliwiający kontrolowanie stężenia boru w chłodziwie reaktorowym. Parametr ten jest niezwykle istotny, gdyż bezpośrednio wpływa na reaktywność, a tym samym na moc reaktora jądrowego. W praktyce, w elektrowniach jądrowych zmiany reaktywności są wymuszane bądź kompensowane głównie przez zmianę stężenia kwasu borowego. Tego rodzaju regulacja przebiega spokojnie i jest mniej gwałtowna od zmiany położenia prętów sterujących. Symulator bloku jądrowego C-PWR umożliwia automatyczną bądź ręczną zmianę stężenia kwasu borowego, którego wartość jest nieustannie monitorowana i wyświetlana użytkownikowi. Sama regulacja polega na zmianie przepływu wody oraz boru do miksera, połączonego z układem uzupełniania wody w obiegu pierwotnym. W opisywanej sytuacji, w której wymagane jest zredukowanie reaktywności, załączony zostaje zawór odcinający dopływ boru i otwarty zawór wody, dzięki czemu stężenie kwasu borowego systematycznie maleje. Program umożliwia regulację przepływu obydwu substancji oraz kontrole ich objętości początkowej. W trakcie rozruchu reaktora załączony został automatyczny system kontroli stężenia kwasu borowego. Dzięki takiemu rozwiązaniu w momencie wyciągania prętów regulacyjnych z rdzenia reaktora program sam obliczał wymagany poziom stężenia boru, stopniowo go zmniejszając.

#### 4. URUCHOMIENIE REAKTORA

Przed uruchomieniem reaktora jądrowego należy doprowadzić do pełnej funkcjonalności wszystkie układy sterowania, bezpieczeństwa, wentylacji, odprowadzania ciepła oraz kontroli dozymetrycznej.

Zapoczątkowanie procedury rozruchu reaktora odbywa się przy stałym ciśnieniu i temperaturze. W analizowanym przypadku ciśnienie w obiegu pierwotnym zostało doprowadzone do poziomu 15.5 MPa, a temperatura do około 297°C. Po obliczeniu odpowiedniego poziomu stężenia kwasu borowego oraz położenia prętów następuje wyciągnięcie części prętów regulacyjnych w określonej procedurami kolejności. Część prętów regulacyjnych pozostaje zanurzona w rdzeniu i będzie służyła do kontroli poziomu reaktywności podczas zmniejszania stężenia kwasu borowego. Moc reaktora jądrowego wzrasta, przeprowadzane są na bieżąco pomiary strumieni neutronów w rdzeniu, monitorowana jest reaktywność oraz na bieżąco kompensowane jest położenie prętów regulacyj-

nych. Utrzymanie mocy reaktora na stałym poziomie odbywa się poprzez ustalenie krytycznego położenia prętów regulacyjnych oraz krytycznego stężenia kwasu borowego. W przypadku przeprowadzanej symulacji, wartość stężenia kwasu borowego w końcowej fazie rozruchu reaktora wyniosła 1350 ppm.

W eksploatowanych elektrowniach jądrowych przeprowadzane są następnie doświadczenia mocy zerowej w pobliżu stanu krytycznego [1]. Tego rodzaju badania umożliwiają weryfikacje modeli matematycznych zaimplementowanych w programach obliczeniowych (m.in. w programie symulacyjnym wykorzystanym w niniejszym artykule). Sprawdza się przede wszystkim skuteczność działania prętów regulacyjnych, wpływ temperatury i stężenia kwasu borowego na reaktywność czy zdolność wyłączeniową reaktora poprzez np. awaryjny zrzut prętów bezpieczeństwa.

## 5. URUCHOMIENIE CZĘŚCI KONWENCJONALNEJ

Proces uruchamiania obiegu wtórnego przebiega symultanicznie w stosunku do obiegu chłodzenia. Procedura uruchomienia urządzeń części konwencjonalnej, przy założeniu, że były wcześniej odstawione, przebiega w następującej kolejności:

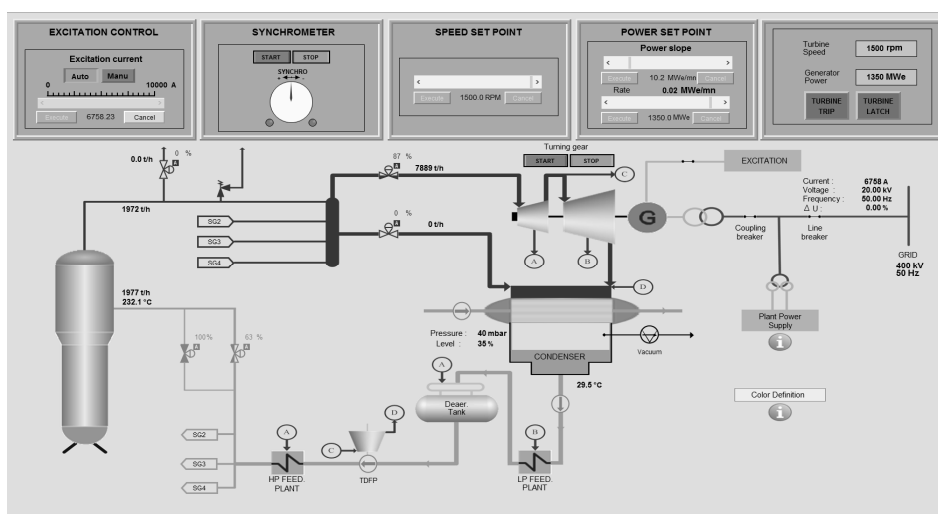
- załączenie układu wody chłodzącej,
- uruchomienie olejowych układów chłodzących oraz systemów smarowania łożysk,
- napełnienie skraplacza,
- otwarcie zaworów pomiędzy wytwornicą pary a turbiną,
- załączenie układu chłodzenia generatora.

Proces załączenia turbosespołu rozpoczyna otwarcie zaworów szybko odcinających oraz regulacyjnych, dzięki czemu para z wytwornicy pary zostaje podana na część niskoprężną turbiny. Prędkość obrotowa turbiny powinna ulegać zwiększeniu zgodnie z krzywymi rozruchu dla konkretnej jednostki, jednak nie zostało to uwzględnione w trakcie przeprowadzania symulacji, gdyż procesy związane z nagrzewaniem turbiny nie zostały odwzorowane. Po uzyskaniu przez turbinę prędkości znamionowej (3000 obr/min) następuje synchronizacja z systemem elektroenergetycznym, po czym moc reaktora jest dostosowywana do obciążenia turbiny. Zwiększaniu mocy reaktora jądrowego towarzyszy zmiana reaktywności, która kompensowana jest poprzez zmianę położenia prętów regulacyjnych. Jednocześnie, stale zmniejszany jest początkowy poziom stężenia kwasu borowego w celu zagwarantowania jak najefektywniejszego oddziaływania prętów regulacyjnych [3]. Stężenie boru w momencie uzyskania mocy znamionowej generatora wyniosło 50 ppm.

Rysunek 5.1 przedstawia schemat części konwencjonalnej, która została zaimplementowana w programie C-PWR. W analizowanym obiekcie występują



cztery pętle obiegu chłodzenia zawierające cztery wytwornice pary. W celu zachowania przejrzystości schemat został uproszczony i zawiera jedną zaznaczoną wytwornicę, przy czym symbolicznie zostały zaznaczone również trzy pozostałe (SG2, SG3, SG4). Na część niskoprężną turbiny parowej trafia sumaryczny strumień pary z czterech wytwornic.



Rys. 5.1. Schemat części konwencjonalnej bloku jądrowego

W trakcie uruchamiania bloku jądrowego wykonuje się szereg prób podczas zwiększania mocy, jak na przykład próba obiegu naturalnego, próba automatyki zabezpieczeniowej (np. w przypadku całkowitego zaniku napięcia), czy próby przy różnych nastawach regulatorów [1].

## 6. PODSUMOWANIE

W powyższej pracy przedstawiona została procedura uruchomienia bloku jądrowego na przykładzie symulatora C-PWR. W początkowej fazie, moc generowana w reaktorze wynosiła zaledwie 3 MW, które stanowiły ciepło powyłączeniowe. Średnia temperatura w obiegu pierwotnym wynosiła 50.6°C a ciśnienie 0.44 MPa. W rdzeniu reaktora umieszczone zostały wszystkie pręty regulacyjne, a urządzenia obiegu wtórnego były wyłączone. Wskutek działań opisanych w punktach 2–5 doprowadzono blok jądrowy do pełnej funkcjonalności. W końcowej fazie symulacji średnia temperatura chłodziwa w obiegu pierwotnym wzrosła do 306.5°C, ciśnienie wynosiło 15.50 MPa, moc cieplna reaktora 3507 MW, a moc elektryczna oddawana do systemu elektroenergetycznego 1350 MW, co stanowi wartość znamionową analizowanego bloku jądrowego.

Dzięki pewnym uproszczeniom zastosowanym w wykorzystywanym programie symulacyjnym osiągnięcie stanu pełnej funkcjonalności zostało zrealizowane po około 22 godzinach, przy czym należy pamiętać, że w rzeczywistym obiekcie jądrowym o takiej mocy proces ten trwałby znacznie dłużej. Niemniej symulator C-PWR cechuje się bardzo dobrym odwzorowaniem procesów zachodzących w elektrowni, zwłaszcza części jądrowej. W szczególności dotyczy to monitorowania zmian w czasie rzeczywistym takich wielkości jak stężenia kwasu borowego, reaktywności, poziomu wypalenia paliwa, ilości trucizn neutronowych (Xe, Sm) czy wielu innych, których wyznaczenie w sposób analityczny, np. przy zmiennej dynamice pracy obciążenia, byłby niezwykle trudne.

### LITERATURA

- [1] Ackermann G., Eksploatacja elektrowni jądrowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- [2] Celiński Z., Strupczewski A., Podstawy energetyki jądrowej, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- [3] Venz H., Ruhle W., Kysela J., Nordmann F., Start-up and Shutdown Practices in BWRs as well as in Primary and Secondary Circuits of PWRs, VVERs and CANDUs, Advanced Nuclear Technology International 2009.
- [4] Góra S., Elektrownie jądrowe, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978.
- [5] <https://aris.iaea.org> (stan na 25.01.2017).

### NUCLEAR POWER PLANT START-UP ON EXAMPLE OF C-PWR SIMULATOR

The nuclear power plant with pressurized water reactor (PWR) consists two parts: the nuclear and conventional. The conventional part is typical for all thermal power stations, but is characterized by lower parameters of working medium. The main difference is the primary circuit with nuclear reactor. In the reactor heat is generated and then transported to the steam generator. A number of processes associated with the production, transport and processing of thermal energy allows finally the production of electricity. The paper presents start-up process of nuclear power plant with pressurized water reactor (PWR), which includes an initial operation of the pumps and pressurizer in order to increase the temperature and pressure of the working medium in the primary circuit and the gradual reactivity increase in reactor core. All of above mentioned processes were simulated in the C-PWR and thoroughly analysed.

*(Received: 06. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)*