



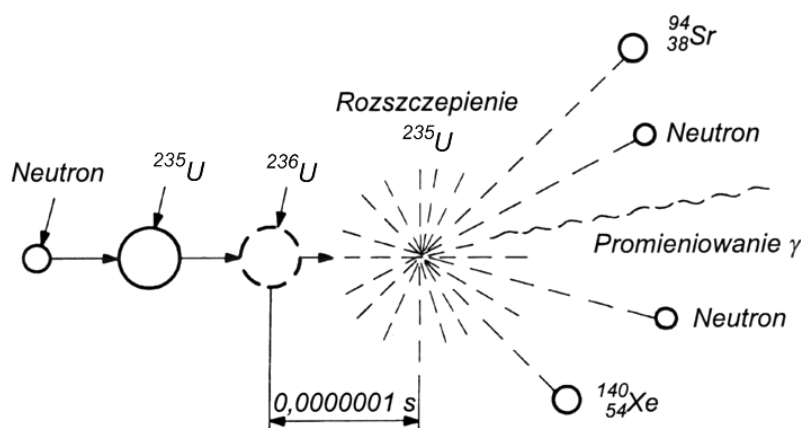
opracował: mgr inż. Piotr Marchel

Ćwiczenie ***Symulacyjne badanie elektrowni jądrowej***

1. Wstęp teoretyczny

a) Energetyczne reakcje jądrowe

W energetycznym reaktorze jądrowym zachodzi samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa. Polega ona na tym, że w wyniku rozszczepienia jądra, najczęściej ^{235}U , które nastąpiło po wychwyceniu jednego neutronu termicznego, powstaje kilka (średnio 2,47) neutronów prędkich, należących do kolejnego pokolenia. **Współczynnik mnożenia k** definiuje się jako stosunek liczby neutronów termicznych w drugim pokoleniu do liczby pochłoniętych neutronów z pierwszego pokolenia. Gdyby zatem każdemu oddziaływaniu neutronu termicznego z jądrem ^{235}U towarzyszyło rozszczepienie, a wszystkie neutrony rozszczepieniowe ulegały jedynie spowolnieniu do energii termicznych, wówczas współczynnik mnożenia wynosiłby $k = 2,47$.



Rys. 1. Przykładowy schemat reakcji rozszczepienia

W rzeczywistym reaktorze jest jednak inaczej. Część neutronów ulega wychwytowi, część neutronów może opuścić bezpowrotnie rdzeń reaktora. Po uwzględnieniu tych efektów współczynnik mnożenia całego reaktora nieznacznie różni się od jedności ($k_{\text{eff}} \approx 1$).

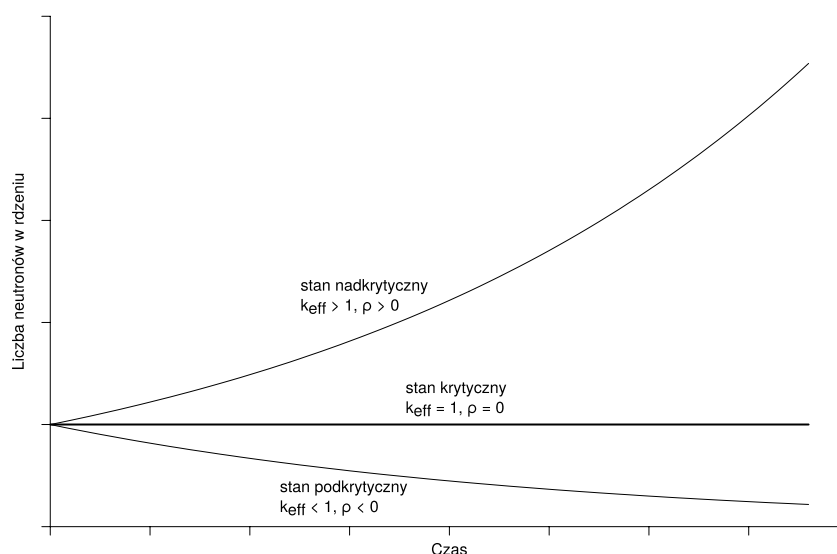
Jeśli w pewnej chwili czasowej współczynnik mnożenia k_{eff} jest nieco wyższy od 1, wówczas w kolejnych pokoleniach jest coraz więcej neutronów i moc reaktora

rośnie (reaktor jest w **stanie nadkrytycznym**). Przeciwnie, gdy $k_{eff} < 1$ - moc reaktora maleje (reaktor jest w **stanie podkrytycznym**). Najbardziej typowym stanem pracy reaktora jest praca z ustaloną mocą, czyli ze współczynnikiem mnożenia $k_{eff} = 1$ (**stan krytyczny**).

Oprócz efektywnego współczynnika mnożenia k_{eff} stosuje się również pojęcie **reaktywności reaktora** ρ :

$$\rho = 1 - \frac{1}{k_{eff}} \quad (1)$$

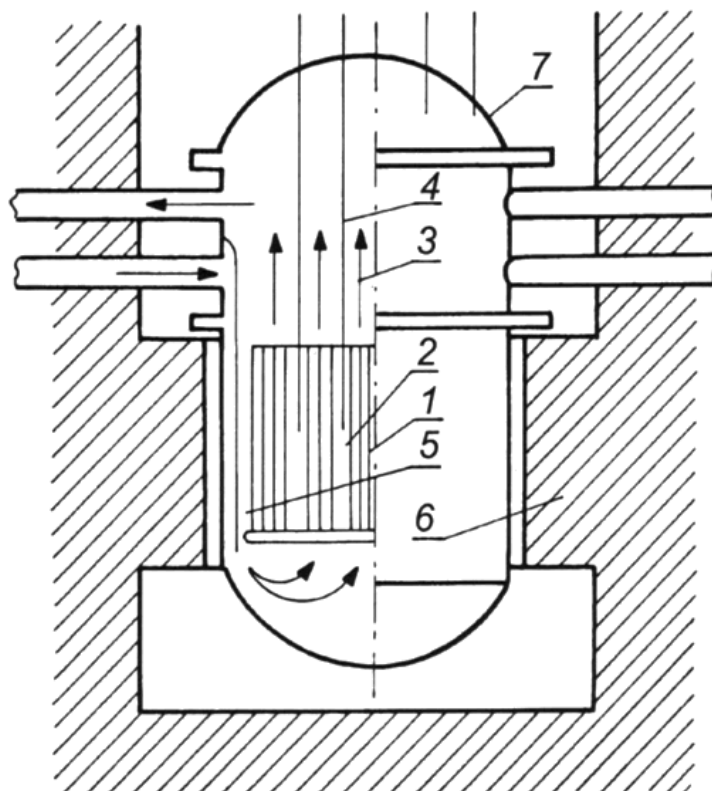
Charakteryzuje ona odchylenie łańcuchowej reakcji rozszczepienia w rdzeniu reaktora od stanu krytycznego. W stanie krytycznym $k_{eff} = 1$, zaś $\rho = 0$. Dla stanu nadkrytycznego $\rho > 0$, w stanie podkrytycznym $\rho < 0$.



Rys. 2. Zależność liczby neutronów w rdzeniu reaktora od czasu, w trzech stanach układu

Większość neutronów, zwanych natychmiastowymi powstaje równocześnie z rozszczepieniem. Istnieje również część neutronów powstających z opóźnieniem w wyniku rozpadu fragmentów rozszczepienia, są one zwane neutronami opóźnionymi. Mają one kluczową rolę w sterowaniu pracą reaktora. Reaktory są budowane w taki sposób, aby współczynnik mnożenia, odpowiadający neutronom natychmiastowym był zawsze niższy od 1. Wyższy od 1 współczynnik mnożenia, konieczny dla podwyższania mocy reaktora, uzyskuje się dzięki niewielkiemu dodatkowi neutronów opóźnionych. Sterowanie reaktorem, czyli zmiany poziomów mocy lub praca na ustalonym poziomie mocy, odbywają się jedynie za pomocą neutronów opóźnionych. Za zmniejszenie energii elektronów prędkich do energii termicznej odpowiada **moderator** (*spowalniacz*). W reaktorach energetycznych najczęściej w tej funkcji stosuje się: wodę (H_2O), ciężką wodę lub grafit. W większości reaktorów termicznych moderator jest również chłodziwem. Rdzeń reaktora jest otoczony **reflektorem**, tzn. warstwą materiałów o dużym

przekroju czynnym na rozpraszanie i małym na wychwyt. Jego zadaniem jest zwracanie części neutronów opuszczających rdzeń z powrotem do rdzenia.



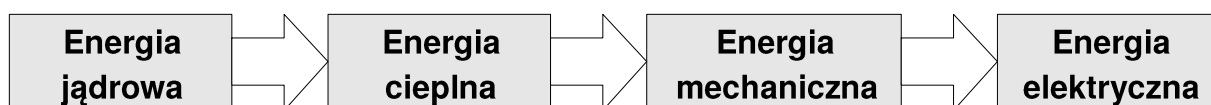
Rys. 3. Schemat reaktora na neutronach termicznych z moderatorem i chłodziwem wodnym: 1 - pręty paliwowe, 2 - moderator, 3 - chłodziwo, 4 - pręty regulacyjne, 5 - reflektor, 6 - osłona betonowa, 7 - zbiornik ciśnieniowy reaktora

Paliwo jądrowe jest wprowadzane najczęściej w stanie stałym, umieszczone w tzw. **prętach paliwowych**. Najczęściej stosowanym obecnie paliwem jest dwutlenek uranu (UO_2). Regulacja mocy reaktora realizowana jest trzema sposobami polegającymi na pochłanianiu neutronów:

- wprowadzaniu do rdzenia ruchomych pochłaniaczy neutronów w postaci **prętów regulacyjnych**, stanowiących integralną część układu sterowania i zabezpieczeń reaktora;
- dodawaniu kwasu borowego bezpośrednio do chłodziwa;
- kompensacji reaktywności za pomocą tzw. trucizn wypalających się.

b) Elektrownie jądrowe

Elektrownia atomowa jest rodzajem elektrowni cieplnej. Ciepło jest wytwarzane w kontrolowanych reakcjach łańcuchowych rozszczepiania jąder atomowych ciężkich pierwiastków takich jak uran czy pluton. Ciepło wytworzone w reakcjach jądrowych jest odbierane przy pomocy przepływającego przez rdzeń chłodziwa. Przemiana energii cieplnej w energię mechaniczną odbywa się za pomocą turbiny parowej lub gazowej. Następnym etapem jest przemiana tej energii w energię elektryczną przy pomocy generatora elektrycznego (rys. 4).



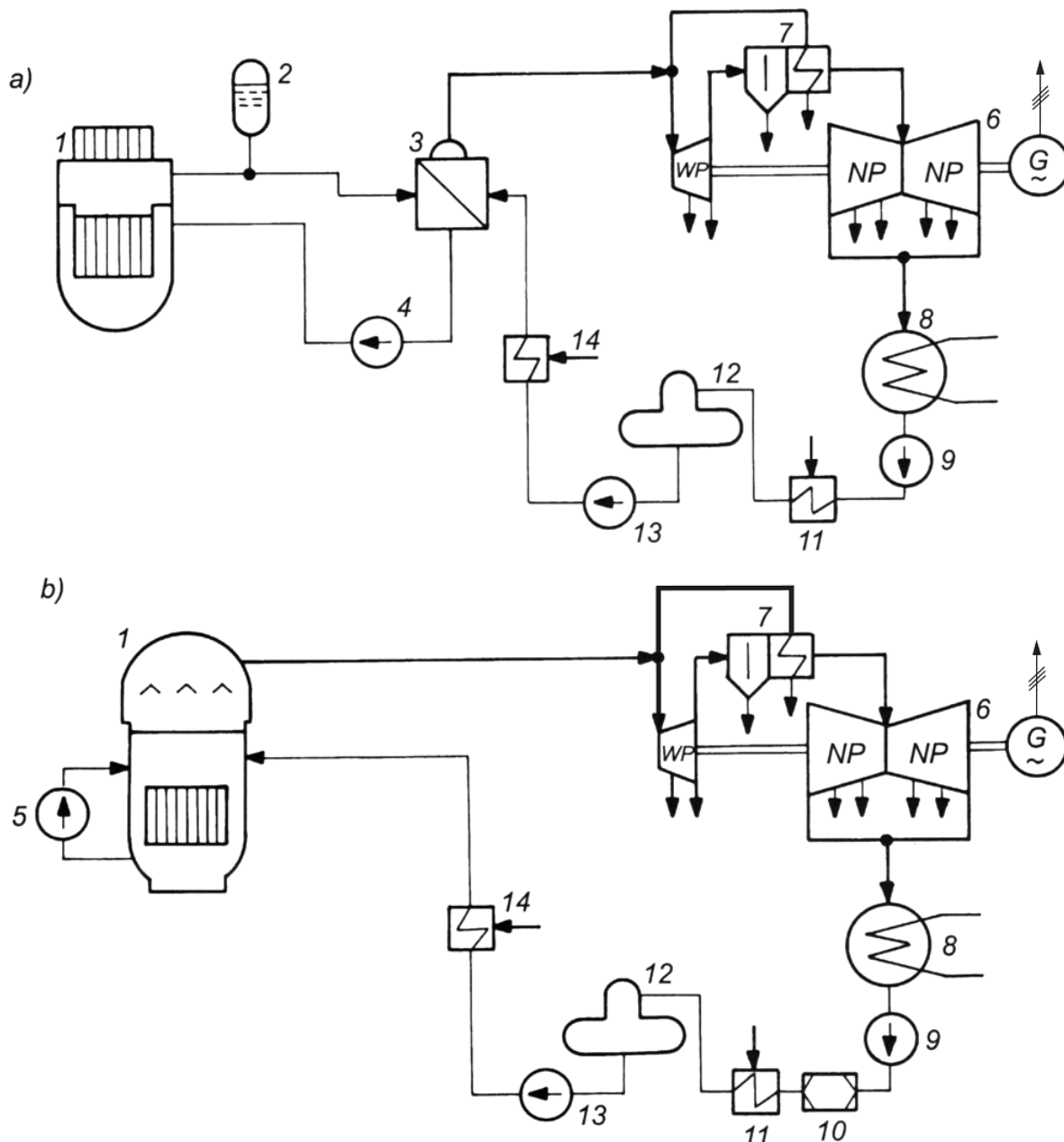
Rys. 4. Schemat przemian energii występujących w elektrowni jądrowej

Najczęściej występujące typy reaktorów energetycznych zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe typy reaktorów energetycznych

Typ reaktora	Konstrukcja	Mode-rator	Chłó-dziwo	Wzbogace-nie paliwa w ^{235}U	Liczba konturów (obiegów)
PWR <i>Pressurized Water Reactor</i> (reaktor wodny ciśnie-niowy)	zbiornikowy	woda (H_2O)	woda (H_2O)	3÷5%	2
BWR <i>Boiling Water Reactor</i> (reaktor z wrzącą wodą)	zbiornikowy	woda (H_2O)	woda (H_2O)	3÷5%	1
HWR <i>Heavy Water Reactor</i> (reaktor ciężkowodny)	kanałowy, zbiornikowy	ciężka woda (D_2O)	ciężka woda (D_2O)	0,7÷2%	2
RMBK <i>Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy</i> (ros. Реактор Большой Мощности Канальный) (reaktor kanałowy dużej mocy)	kanałowy	grafit	woda (H_2O)	2%	1
AGR <i>Advanced Gas Reactor</i> (zaawansowany reaktor chłodzony gazem)	zbiornikowy	grafit	gaz, (np. CO_2)	2÷3%	2
HTR <i>High Temperature Re-actor</i> (reaktor wysokotempe-raturowy)	zbiornikowy	grafit	hel (He)	0,7÷2%	2

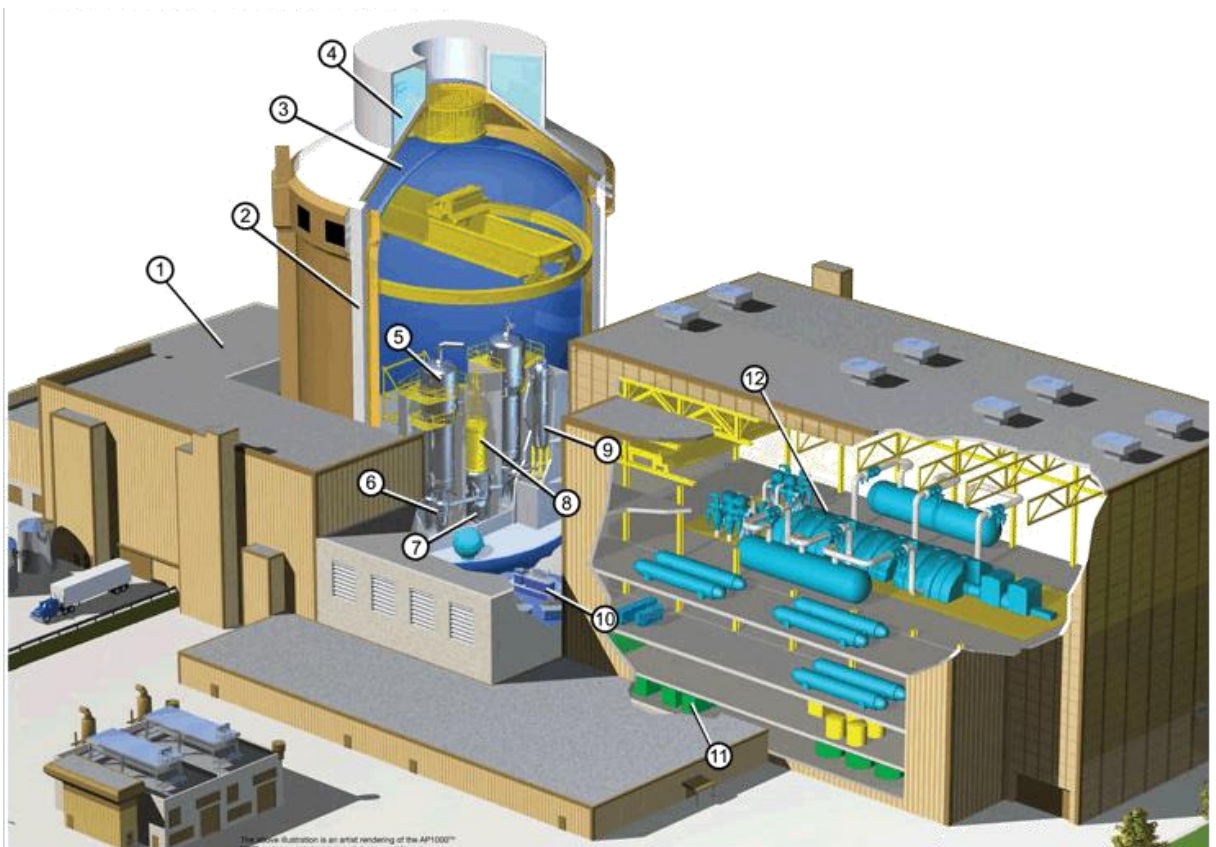
Najpowszechniej stosowanymi reaktorami energetycznymi są reaktory lekkowodne LWR (*Light Water Reactor*), do których zalicza się reaktory typu PWR (i jego rosyjski odpowiednik WWER – *Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor*) oraz BWR.



Rys. 5. Schematy ideowe układów cieplnych elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi: a) PWR, b) BWR; 1- reaktor, 2 - stabilizator ciśnienia, 3 - wytwornica pary, 4 - główna pompa obiegowa, 5 - pompa cyrkulacyjna, 6 - turboześpół, 7 - separator wilgoci i przegrzewacz międzystopniowy pary, 8 - skraplacz (kondensator), 9 - pompa skroplin, 10 - układ oczyszczania skroplin, 11 - podgrzewacze regeneracyjne niskiego ciśnienia, 12 - odgazowywacz, 13 - pompa wody zasilającej, 14 - podgrzewacze regeneracyjne wysokiego ciśnienia

Pierwszy ich rodzaj PWR (także WWER) charakteryzuje się dwoma obiegami. Nie występuje mieszanie czynnika chłodniczego i roboczego. Woda, będąca czynnikiem chłodniczym, nie ulega wrzeniu mimo wysokiej temperatury, gdyż utrzymywana jest pod znaczącym ciśnieniem. Ciepło z obiegu chłodniczego przekazywane jest w wymienniku (wytwornicy pary) do obiegu roboczego, w którym to znajduje się turbina napędzająca generator (rys. 5a).

Reaktory typu BWR posiadają jeden obieg wody (rys. 5b). Upraszcza to układ cieplny elektrowni, jednak wymusza generowanie pary bezpośrednio w reaktorze. Jest to zjawisko niekorzystne z uwagi na nieco większy poziom promieniotęczenia panującego w elektrowni i konieczność stosowania większych zbiorników w stosunku do reaktorów typu PWR tej samej mocy. Wynika to z mniejszej gęstości mocy w reaktorze.



Rys. 6. Przekrój nowoczesnego bloku jądrowego Westinghouse AP1000 z reaktorem typu PWR wyposażonego w pasywne systemy bezpieczeństwa:

- 1 - przechowalniki paliwa, 2 - betonowa zewnętrzna obudowa bezpieczeństwa,
- 3 - stalowa wewnętrzna obudowa bezpieczeństwa, 4 - zbiornik wody do pasywnego chłodzenia reaktora, 5 - wytwornice pary, 6 - pompy cyrkulacyjne, 7 - reaktor, 8 - zintegrowana głowica reaktora, 9 - stabilizator ciśnienia, 10 - nastawnia bloku, 11 - pompy wody zasilającej, 12 - turbozespol.

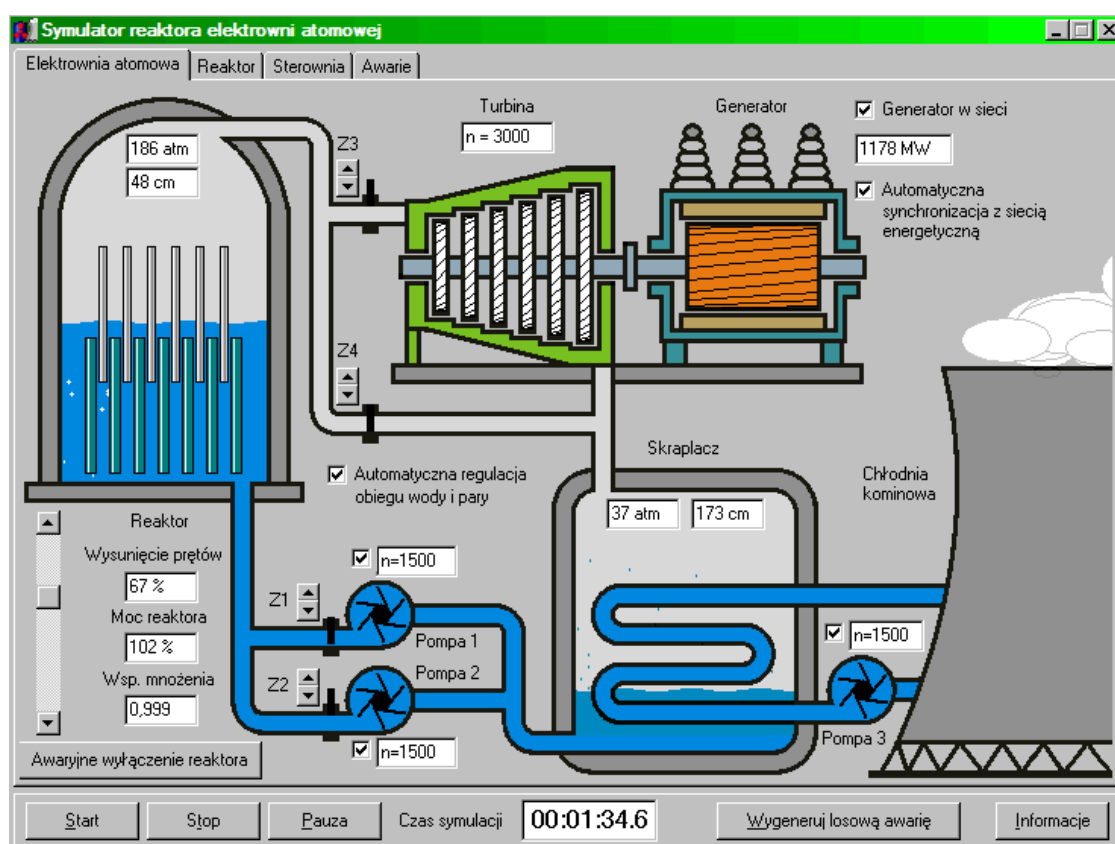
2. Symulator elektrowni jądrowej o mocy 1200 MW z reaktorem BWR

Program Reaktor jest stworzony w celu przybliżenia zasad funkcjonowania energetycznych reaktorów jądrowych i przedstawienia podstawowych procesów i problemów występujących w elektrowni z reaktorem jądrowym typu BWR. Jego obsługa jest intuicyjna, zbliżona do obsługi gier komputerowych. W programie można symulować podstawowe awarie, które mogą wydarzyć się podczas eksploatacji bloków jądrowych i wynikające z nich problemy.

Symulator znajduje się w katalogu Reaktor-SYMULATOR. Jego uruchomienie odbywa się za pomocą pliku Reaktor.exe (Rys. 7)

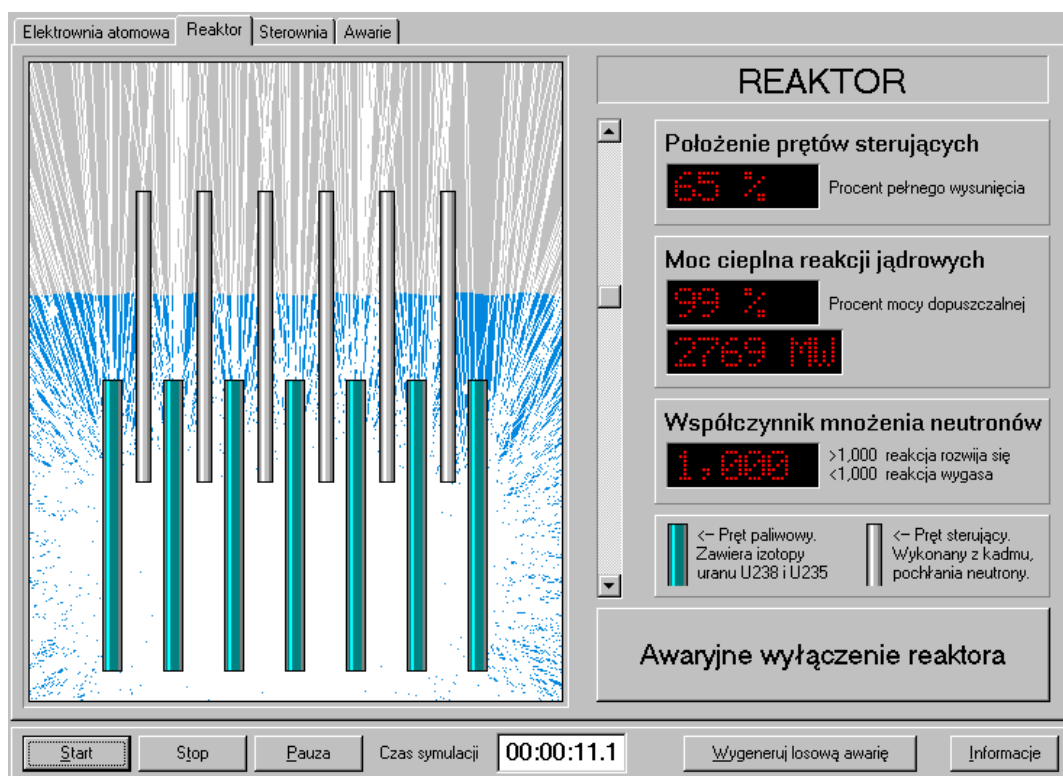


Rys. 7. Ikona programu symulatora



Rys. 8. Widok głównego okna programu Reaktor. Przedstawiony uproszczony schemat układu cieplnego elektrowni jądrowej z reaktorem typu BWR (Boiling Water Reactor). Suwak po lewej stronie steruje położeniem prętów sterujących. Możliwe jest również załączanie i wyłączanie pomp oraz sterowanie pracą zaworów (Z1, Z2, Z3 i Z4)

Po uruchomieniu program zgłasza się w stanie pokazanym na rys 8. Schematycznie przedstawione są cztery podstawowe zespoły elektrowni jądrowej: reaktor, turbozespół, zespół skraplacza z chłodnią kominową oraz pompy tłoczące wodę do reaktora. Szczegóły dotyczące pracy samego reaktora przedstawione są w zakładce „Reaktor” rys. 9.

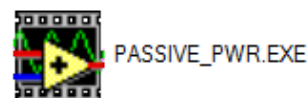


Rys. 9. Widok zakładki „Reaktor”

3. Symulator elektrowni jądrowej o mocy 600 MW z reaktorem PWR

Kolejnym programem, który pozwala na symulowanie pracy elektrowni z blokiem jądrowym, jest IAEA Pressurized Water Reactor (PWR) Simulator. Praca tego symulatora opiera się na środowisku LabView, lecz stanowi on oddzielny, kompletny program. Jest to symulacja bloku jądrowego typu Westinghouse AP600 o mocy znamionowej (elektrycznej) 625 MW. Jest to blok z reaktorem typu PWR wyposażony w pasywne systemy bezpieczeństwa. Blok AP600 jest pierwowzorem bloku AP1000 przedstawionego na rys. 6, od którego różni się mocą znamionową.

Symulator znajduje się w katalogu Passive PWR Simulator V3. Jego uruchomienie odbywa się za pomocą pliku PASSIVE_PWR.EXE (Rys. 10).



Rys. 10. Ikona programu symulatora

Po uruchomieniu program zgłasza się ekranem startowym przedstawionym na rys. 11. Można wybrać jedną spośród dołączonych do programu sytuacji: pracę elektrowni z mocą znamionową (*Full Power*), pracę przy 68% oraz 10% mocy znamionowej (odpowiednio: *68% FP* i *10% FP*), pracę w stanie gorącej rezerwy (*Zero Power Hot – No Scram*) oraz w stanie zimnej rezerwy po odstawieniu awaryjnym (*Zero Power Hot – After Scram*). Możliwe jest również wczytanie innej uprzednio zapisanej sesji. Aby uruchomić daną symulację, należy ją wybrać z przedstawionej listy, a następnie kliknąć dowolny fragment pozostałego miejsca na ekranie i zatwierdzić wybór (OK).

IAEA Generic Pressurized Water Reactor Simulator

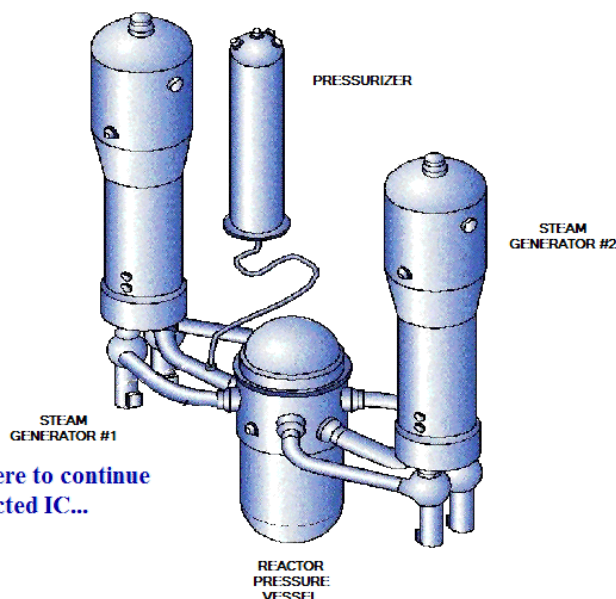


Click anywhere to continue
with the selected IC...

Select an IC to load

Full Power
68% FP
10% FP
Zero Power Hot - No Scram
Zero Power Hot - After Scram
Other...

IC Filename: FP_100.IC



Developed by

Cassiopeia Technologies Inc.

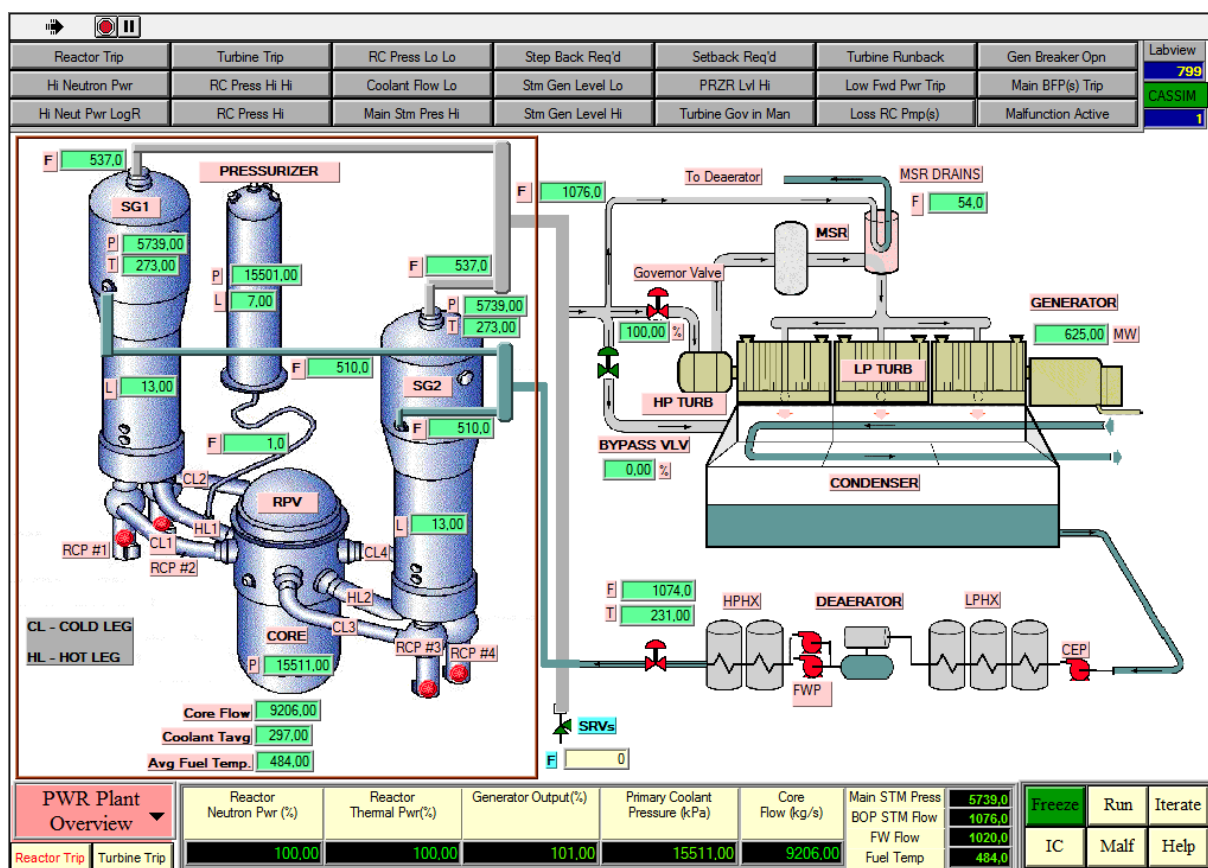
About PWR Simulator

Rys. 11. Widok ekranu startowego programu IAEA Pressurized Water Reactor (PWR) Simulator. W lewym dolnym rogu możliwy jest wybór jednej spośród przygotowanych sytuacji (IC), które mogą być symulowane.

Kolejny ekran jest podstawowym ekranem symulacji, na którym przedstawione są główne układy elektrowni oraz ich parametry (rys. 12).

W programie przyjęto następujące skróty:

- *F* – Flow – przepływ czynnika (kg/s);
- *T* – Temperature – temperatura (°C);
- *P* – Pressure – ciśnienie (kPa);
- *L* – Level – poziom słupa cieczy (m);
- *RPM* – obroty (1/min);
- *%FP* – procent mocy znamionowej (%);



Rys. 12. Widok głównego okna programu IAEA Pressurized Water Reactor (PWR) Simulator, przedstawiającego przegląd głównych części elektrowni (Plant Overview). W górnej części ekranu znajduje się pasek sterowania środowiskiem symulacyjnym, poniżej znajdują się kontrolki informujące o awaryjnych stanach elektrowni. Z prawej strony znajdują się dwa liczniki czasu symulacji (LabView oraz CASSIM). Środkową część stanowi plansza synaptyczna (pozwalająca również na kontrolę pracy). U dołu ekranu znajdują się: po lewej stronie przyciski pozwalający na wybór jednej spośród plansz synaptycznych (trójkąt skierowany w dół na różowym tle), po prawej stronie przyciski sterujące symulacją (Freeze – zatrzymaj symulację, Run – uruchom symulację, Iterate – wykonaj jedną iterację), po środku przedstawione są główne parametry aktualnej symulacji (moc neutronowa reaktora, moc termiczna reaktora, moc elektryczna bloku, ciśnienie czynnika chłodniczego w obiegu pierwotnym, przepływ przez rdzeń, ciśnienie oraz przepływ pary w głównym kolektorze, strumień pary oraz temperatura prętów paliwowych).

Sterowanie przebiegu symulacji odbywa się za pomocą przycisków Freeze (zatrzymaj), Run (uruchom) oraz Iterate (wykonaj 1 iterację). Nie ma możliwości cofnięcia czasu symulacji. Czas symulacyjny odczytywany jest za pomocą licznika CASSIM, przy czym jednej sekundzie czasu rzeczywistego odpowiada 10 jednostek CASSIM.

4. Wykonanie ćwiczenia

Ćwiczenie należy wykonywać po kolei według instrukcji prowadzącego.

a) Symulacja EJ z reaktorem BWR

- Uruchomić symulator REAKTOR. Zbadać sposób, w jaki możliwa jest regulacja pracy bloku jądrowego. Przeanalizować wpływ awarii poszczególnych elementów na bezpieczeństwo pracy elektrowni.

b) Badanie regulacji mocy w EJ z reaktorem PWR

Ćwiczenie składa się z następujących etapów:

- Uruchomić symulator PASSIVE_PWR. Wczytać symulację pracy z mocą znamionową.
- Uruchomić kilka sekund symulacji, aby ustabilizować parametry. Zatrzymać symulację i spisać odpowiednie parametry do protokołu ćwiczeniowego.
- Zmienić zadany poziom mocy generowanej (plansza PWR Reactor Power Control → Reactor lead power demand setpoint) na podany przez prowadzącego
- Prowadzić symulację, w taki sposób by można było na podstawie zebranych pomiarów narysować przebieg regulacji mocy neutronowej, termicznej i elektrycznej. Notować odpowiednie parametry do protokołu.

c) Badanie awaryjnego wyłączenia reaktora w EJ z reaktorem PWR

Ćwiczenie składa się z następujących etapów:

- Uruchomić symulator PASSIVE_PWR. Wczytać symulację pracy z mocą znamionową.
- Uruchomić kilka sekund symulacji, aby ustabilizować parametry. Zatrzymać symulację i spisać odpowiednie parametry do protokołu ćwiczeniowego.
- Uruchomić ręcznie awaryjne wyłączenie reaktora SCRAM (plansza PWR Reactor Power Control → SCRAM).
- Prowadzić symulację, w taki sposób by można było na podstawie zebranych pomiarów narysować przebieg mocy neutronowej, termicznej i elektrycznej. Notować odpowiednie parametry do protokołu. Zanotować moment odłączenia generatora od SEE.

5. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- 1) Tabelę tytułową (nazwa i numer ćwiczenia, nazwiska i imiona wykonujących ćwiczenie, data wykonania ćwiczenia oraz data oddania sprawozdania);
- 2) Protokół pomiarów
- 3) Dla symulacji I: wykresy mocy neutronowej $P_{n\%}$, mocy termicznej reaktora $P_{t\%}$ i mocy elektrycznej na generatorze w funkcji czasu, wykres ciśnienia i temperatury pary w głównym kolektorze w funkcji czasu. Omówić otrzymane wykresy.
- 4) Opisać, w jaki sposób reguluje się moc w EJ. Porównać parametry pary w EJ z parametrami pary w typowej elektrowni cieplnej opalanej węglem kamiennym. Opisać co to jest i na czym polega zatrucie ksenonowe. Jak wpływa na regulację mocy EJ?
- 5) Dla symulacji II: wykresy mocy neutronowej $P_{n\%}$, mocy termicznej reaktora $P_{t\%}$ i mocy elektrycznej na generatorze w funkcji czasu. Omówić otrzymane wykresy.
- 6) Opisać co to jest ciepło powyłłączeniowe. Omówić stosowane zabezpieczenia w elektrowniach jądrowych z reaktorami typu PWR.
- 7) Wnioski ogólne i spostrzeżenia dotyczące: ćwiczenia, pracy elektrowni jądrowej, bezpieczeństwa elektrowni jądrowych.

6. Przykładowe pytania

- Co to jest stan krytyczny, nadkrytyczny, podkrytyczny reaktora?
- Jak jest realizowana regulacja mocy reaktora jądrowego?
- Wymień najczęściej występujące typy reaktorów energetycznych oraz stosowane w nich moderatory, chłodziwa, wymagany stopień wzbogacania paliwa.
- Jak zbudowany jest reaktor energetyczny z moderatorem i chłodziwem wodnym?
- Jakie są różnice pomiędzy reaktorami PWR a BWR?

7. Literatura

- [1] Chmielnik T. „Technologie energetyczne”, WNT Warszawa 2008
- [2] Informacje o bloku Westinghouse AP 1000 ze strony producenta:
<http://www.westinghousenuclear.com/>
- [3] Kubowski J. „Nowoczesne elektrownie jądrowe”, WNT Warszawa 2010
- [4] Paska J. „Wytwarzanie energii elektrycznej”, Oficyna Wydawnicza PW Warszawa 2005
- [5] Pawlik M., Strzelczyk F. „Elektrownie”, WNT Warszawa 2011