

Mgr inż. MICHAŁ FERENC

Politechnika Śląska

PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH WŁASNOŚCI KOTŁA PAROWEGO
I ENERGETYCZNEGO REAKTORA JĄDROWEGO
RZUTUJĄCYCH NA UKŁAD AUTOMATYCZNEJ REGULACJI

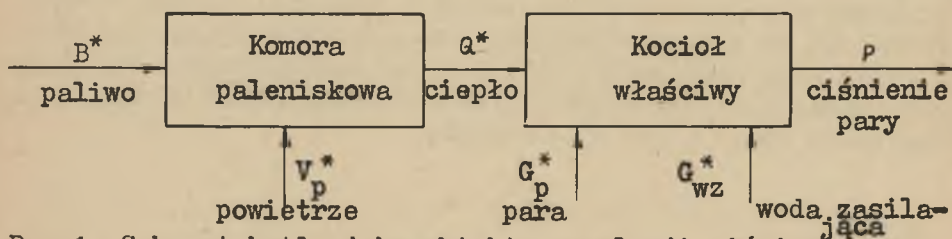
Kotły parowe i energetyczne reaktory jądrowe spełniają podobne funkcje w procesie przemiany energii. Kocioł parowy jest urządzeniem służącym do realizowania przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie w energię cieplną, natomiast reaktor jądrowy służy do przemiany energii jądrowej pierwiastków rozszczepialnych w energię cieplną. Energia jądrowa zawarta w pierwiastkach rozszczepialnych (np. w uranie) charakteryzuje się wielką gęstością skupienia. Jeden kilogram czystego uranu 235 zawiera tyle energii co 4 miliony ton węgla o wartości opałowej 5000 kcal/kg. Szybkość łańcuchowej reakcji rozszczepienia uranu w reaktorach termicznych przy bardzo małej reaktywności jest około 10 razy większa od szybkości spalania się pyłu węglowego w komorze paleniskowej kotła pyłowego (średni czas życia neutronów termicznych wynosi około 0,1 sek. a czas palenia się ziarenka pyłu węglowego około 1 sek.). W reaktorach krytycznych na neutronach natychmiastowych średni czas życia neutronów wynosi około 10^{-7} sek. i szybkość reakcji łańcuchowej jest 10 milionów razy większa od szybkości spalania się pyłu węglowego. Układ regulacji reaktora musi być bardzo czuły na zmiany mocy i szybko działający. Pomimo tego, że zarówno kocioł parowy jak i energetyczny reaktor jądrowy spełniają podobne funkcje w energetyce cieplnej, nie można doszukiwać się jakichkolwiek analogii pomiędzy kotłem i reaktorem. Są to agregaty pracujące na zupełnie innej zasadzie a porównanie problemów dynamiki oraz automatycznej regulacji potwierdza fakt, że zagadnienia kotłów są różne od zagadnień reaktorów nawet i pod tym względem.

Dynamika kotła

W referacie ograniczono się do rozpatrzenia własności dynamicznych przemiany energii chemicznej w ciepłą, realizowanej w procesie spalania. Kocioł rozpatrywany pod kątem automatycznej regulacji jest obiektem wieloparametrowym. Do kotła doprowadza się paliwo, powietrze i wodę zasilającą a odprowadza się spaliny i parę wodną.

W każdej chwili powinno się spalać w komorze paleniskowej kotła tyle paliwa, żeby ilość wytworzonej pary była równa obciążeniu kotła. Wskaźnikiem tej relacji jest ciśnienie pary w walczaku kotła. Jeżeli w komorze paleniskowej wydzieli się więcej ciepła niż to jest potrzebne do wytworzenia żądanej ilości pary, to nadmiar ciepła zakumuluje się w kotle i spowoduje wzrost ciśnienia pary. Odwrotnie, jeżeli doprowadzi się za mało paliwa, to para wytworzy się kosztem ciepła zakumulowanego w wodzie kotłowej i ciśnienie pary obniży się. Głównym parametrem regulowanym w kotle jest więc ciśnienie, które przede wszystkim zależy od poboru pary z kotła (obciążenia) i ilości doprowadzonego paliwa. Głównym parametrem nastawianym jest ilość doprowadzonego paliwa do komory paleniskowej. Pomocniczymi parametrami nastawianymi są: ilość doprowadzonego powietrza oraz ciąg. Aby zapewnić najekonomiczniejszy proces spalania paliwa należy zachować odpowiedni stosunek pomiędzy jakością i ilością spalanego paliwa z jednej strony a ilością powietrza z drugiej strony. Wskaźnikiem ekonomiczności procesu spalania jest odchylenie stosunku nadmiaru powietrza od wartości optymalnej. Zwiększenie nadmiaru powietrza ponad wartość optymalną zwiększa stratę wylotową wyraźną, a znaczne zmniejszenie nadmiaru powietrza zwiększa stratę wylotową utajoną. Regulacja ciągu ma na celu utrzymanie podciśnienia w komorze paleniskowej.

Kocioł jako obiekt regulacji ciśnienia pary można podzielić na dwa niezależne elementy połączone szeregowo.



Rys.1. Schemat kotła jako obiektu regulacji ciśnienia pary

Ilość wywiązanej ciepła Q^x w komorze paleniskowej zależy od doprowadzenia paliwa B^x i powietrza V_p^x . Wytworzone ciepło zostaje pochłonięte przez powierzchnie grzewalne kotła właściwego i łącznie z zapotrzebowaniem pary G_p^x i doprowadzeniem wody zasilającej G_{wz}^x oddziałuje na ciśnienie pary w walczaku kotła. Dynamikę kotła właściwego opisuje w przybliżeniu następujące równanie:

$$C \frac{dp}{dt} = Q^* - G_p^* (i'' - i_{wz}) - k_{wz} (G_{wz}^* - G_p^*) \quad (1)$$

gdzie:

- C - współczynnik charakteryzujący pojemność kotła właściwego przy zmianach ciśnienia,
- p - ciśnienie pary w walczaku kotła,
- t - czas,
- k_{wz} - współczynnik uwzględniający wpływ niezgodności bilansu wody na zmianę ciśnienia pary.

Kocioł jako obiekt regulacji ciśnienia pary zachowuje się podobnie do elementu całkującego. Jego charakterystyki czasowe przy skokowym wymuszeniu mają w przybliżeniu przebieg prostoliniowy.

Dynamiczne własności kotła zależą nie tylko od konstrukcji i rozmiarów agregatu kotłowego ale także od warunków, w których on pracuje.

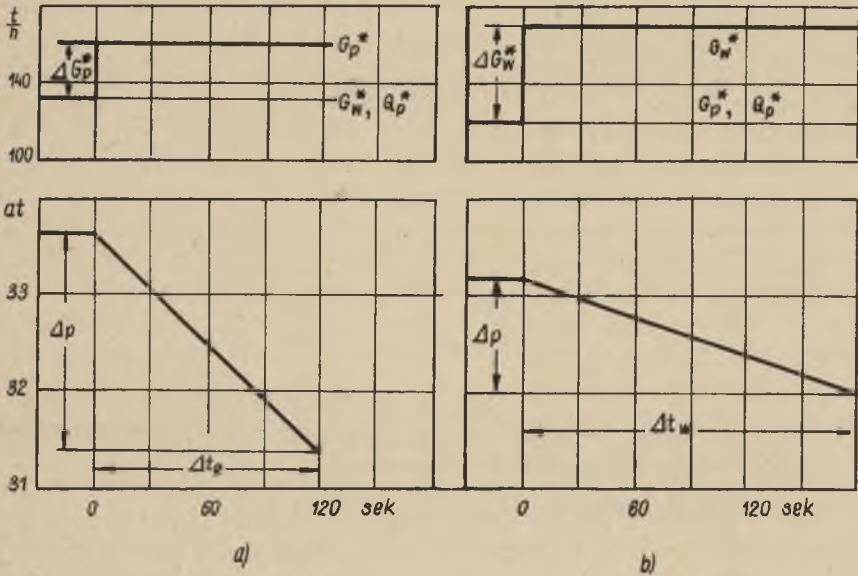
Dynamiczne własności reaktora jądrowego

Energetyczny reaktor jądrowy pracuje na ogół w połączeniu z wymiennikiem ciepła, w którym wytwarzana jest para wodna do napędu turbin.

Na regulację siłowni jądrowej decydujący wpływ mają własności dynamiczne zastosowanego reaktora jądrowego.

Moc cieplna wyzwalamąca się w rdzeniu reaktora jest wprost proporcjonalna do średniego strumienia neutronów termicznych ϕ

$$Q^x = A \cdot \phi \quad (2)$$



Rys.2. Rozbiegowe charakterystyki kotła jako obiektu regulacji ciśnienia

a - przy skokowej zmianie obciążenia kotła, b - przy skokowej zmianie ilości wody zasilającej, c - przy skokowej zmianie ilości doprowadzonego paliwa

gdzie:

A - stały współczynnik.

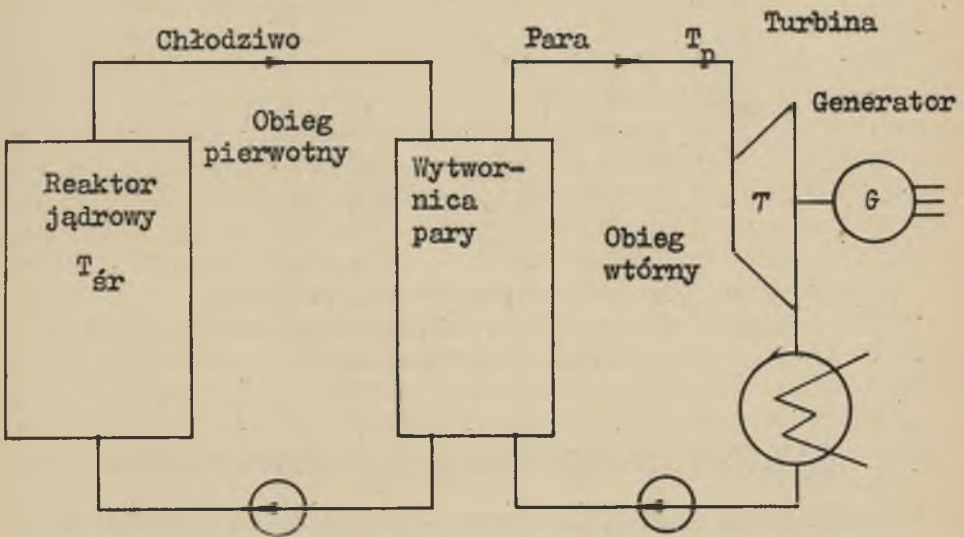
Przybliżony przebieg zmian zaburzonego strumienia neutronów termicznych w reaktorze przedstawia się w postaci funkcji wykładniczej

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{t}{T}} \quad (3)$$

gdzie:

t - jest czasem a

T - nazywa się okresem reaktora i jest wartością stałą zależną od wielkości wprowadzonej reaktywności ρ .

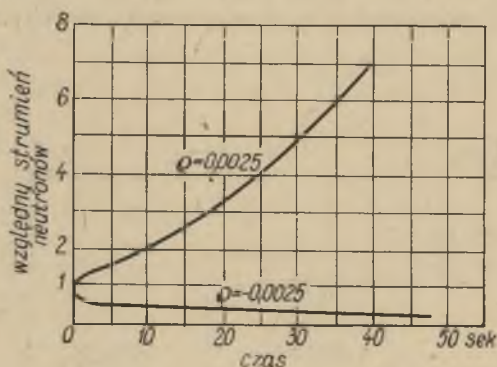


Rys.3. Schemat siłowni jądrowej

Dla dodatnich reaktywności $\rho > 0$ okres reaktora jest dodatni, więc strumień neutronów termicznych wzrasta w miarę upływu czasu, zaś dla ujemnych reaktywności $\rho < 0$ okres reaktora jest ujemny i strumień neutronów termicznych maleje wg funkcji wykładniczej.

Ponieważ moc cieplna reaktora jest proporcjonalna do średniego strumienia neutronów termicznych, więc sterowanie reaktora jest oparte na zmianie reaktywności, która ma bezpośredni wpływ na strumień. Dla reaktywności dodatnich moc reaktora stale wzrasta. Zmniejszając reaktywność do zera uzyskuje się stałą moc równą wartości, którą wykazywał reaktor przed zmianą reaktywności. Dla reaktywności ujemnej moc reaktora maleje.

Najpowszechniej stosowanym sposobem zmiany reaktywności jest wsuwanie lub wysuwanie z rdzenia prętów sterowniczych zawierających materiał silnie pochłaniający neutrony.



Rys.4. Przebieg zmian strumienia neutronów termicznych w czasie dla skokowej zmiany reaktywności

Wpływ obciążenia zewnętrznego na pracę reaktora

Podobnie jak w kotle parowym obciążenie zewnętrzne wywiera wpływ na pracę reaktora, głównie poprzez ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności. Dla przykładu rozpatrzono wpływ zmian obciążenia turbiny na pracę reaktora dla siłowni z dwoma obiegami (rys.3).

Jeżeli natężenie przepływu chłodziwa w obiegu pierwotnym jest stałe, to moc siłowni można z dużym przybliżeniem wyrazić wzorem:

$$N = K(T_{sr} - T_p) \quad (4)$$

gdzie:

K - stały współczynnik,

T_{sr} - średnia temperatura chłodziwa w reaktorze,

T_p - średnia temperatura pary na wlocie do turbiny.

Automatyczną regulację siłowni jądrowej można tak zaprojektować, aby zrealizować jeden z następujących warunków:

- 1) praca przy stałej temperaturze średniej chłodziwa
 $T_{\text{sr}} = \text{const}$,
- 2) praca przy stałej temperaturze (i ciśnieniu) pary,
 $T_p = \text{const}$,
- 3) praca optymalna, spełniająca warunek: $T_p = \text{const}$.
przy powolnych zmianach mocy, $T_{\text{sr}} = \text{const}$. przy szybkich zmianach obciążenia.

Ad 1. Jeżeli założymy $T_{\text{sr}} = \text{const}$, to zmianie mocy układu musi odpowiadać odpowiednia zmiana temperatury i ciśnienia pary wynikająca z wzoru (4),

Utrzymanie średniej temperatury chłodziwa na stałym poziomie dokonuje się samoczynnie przez działanie ujemnego temperaturowego współczynnika reaktywności. Wzrost obciążenia generatora zwiększy zużycie pary przez turbinę, a ponieważ moc reaktora jeszcze nie uległa zmianie więc dodatkowa ilość pary wytworzy się kosztem ciepła zakumulowanego w wodzie zawartej w parogeneratorze. W rezultacie ciśnienie i temperatura pary obniżą się. W dalszej kolejności spowoduje to obniżenie się temperatury chłodziwa na wlocie do reaktora. Rdzeń reaktora ochłodzi się nieco powodując wzrost reaktywności. Wskutek tego wzrośnie strumień neutronów termicznych oraz moc reaktora do takiego poziomu, przy którym średnia temperatura chłodziwa T_{sr} będzie równa wartości poprzedniej a reaktywność będzie równa zero.

Wynika stąd, że średnia temperatura chłodziwa nie ulegnie zmianie, ale wzrośnie temperatura chłodziwa na wylocie z reaktora.

Reaktor automatycznie dostosowuje się do zmian obciążenia, nie jest przy tym wymagany ruch prętów sterowniczych. Wadą tego systemu pracy są duże wahania ciśnienia pary w obiegu wtórnym, w związku z tym konieczne jest stosowanie turbin o specjalnej budowie.

Ad. 2. Praca przy stałej temperaturze pary jest idealna z punktu widzenia obwodu wtórnego, lecz jest niekorzystna dla reaktora. Jakakolwiek zmiana obciążenia powinna spowodować zmianę średniej temperatury chłodziwa. Na przykład przy wzroście obciążenia powinna wzrosnąć średnia temperatura chłodziwa, wywoła to spadek reaktywności, a tym samym obniżenie mocy reaktora i temperatury średniej chłodziwa. Aby temu zapobiec, należy skompensować wpływ temperaturowego współczynnika reaktywności przez ruch prętów regulacyjnych. Stawia to wysokie wymagania układowi regulacji reaktora.

Ad. 3. Pracę optymalną można osiągnąć przez zaprojektowanie odpowiedniego układu sterowania, zapewniającego powolny ruch prętów regulacyjnych przy zmianie mocy reaktora. Wówczas przy nagłych i krótkotrwałych zmianach obciążenia pręty regulacyjne nie zdążą zadziałać i reaktor zachowuje się tak, jak gdyby pracował bez prętów sterowniczych. Przy szybkim wzroście obciążenia obniży się temperatura pary przed turbiną oraz temperatura chłodziwa na wlocie do reaktora, spowoduje to wzrost reaktywności. Moc reaktora będzie wzrastać tak długo, aż temperatura średnia chłodziwa osiągnie poprzednią wartość a moc reaktora ustali się na wyższym poziomie. Ponieważ temperatura pary w nowym stanie równowagi jest niższa od wartości zadanej, więc zacznie działać układ regulacji automatycznej przesuując powoli pręty regulacyjne tak, aby wzrosła średnia temperatura chłodziwa w rdzeniu.

Wnioski

Dynamiczne własności kotła parowego i energetycznego reaktora jądrowego opisane są zupełnie innymi równaniami. Zmiany ciśnienia w kotle pod wpływem działania zakłóceń są stosunkowo powolne, a zatem można stosować proste układy regulacji o powolnym działaniu. W celu zabezpieczenia kotła przed wybuchem z powodzeniem stosuje się parowe zawory bezpieczeństwa.

Reaktor jądrowy jest obiektem trudnym do regulacji. Strumień neutronów termicznych zmienia się wg funkcji wykładniczej, co pociąga za sobą bardzo szybkie zmiany mocy reaktora. Do sterowania reaktorów stosuje się szybko działające elektroniczne układy regulacji.

W reaktorze istnieje niebezpieczeństwo pojawienia się bardzo krótkiego okresu T i prawie natychmiastowego wyzwolenia się całej energii zawartej w materiale rozszczepialnym. Wypływają stąd wysokie wymagania odnośnie układu zabezpieczenia reaktora.

Jednakże na skutek istnienia wewnętrznych sprzężeń zwrotnych, szczególnie dzięki istnieniu neutronów opóźnionych oraz ujemnego temperaturowego współczynnika reaktywności, reaktor jest urządzeniem stabilnym, a nawet w niektórych przypadkach samosterowalnym. Układy automatycznej regulacji reaktorów jądrowych na ogół działają sprawnie, ale są skomplikowane i kosztowne.