

Jacek KARCZEWSKI
Paweł SZUMAN

OPTIMALIZACJA PRACY BLOKU ENERGETYCZNEGO NA PODSTAWIE BADAŃ SYMULACYJNYCH RÓŻNYCH KONFIGURACJI UKŁADÓW AUTOMATYKI

STRESZCZENIE

W Oddziale Techniki Ciepłej „ITC” Instytutu Energetyki od ponad 25 lat prowadzone są prace badawcze dotyczące elektrohydraulicznej regulacji mocy czynnej bloków energetycznych. W artykule przedstawiono model takiego bloku, złożony z różnego rodzaju bloków funkcyjnych opisujących poszczególne węzły technologiczne zespołu kocioł – turbina. Model ten wprowadzono do programu symulacyjnego SCILAB. Zaprezentowano wyniki symulacji różnych konfiguracji układu regulacji mocy i ciśnienia pary świeżej bloku energetycznego. Porównano wybrane przebiegi symulacji z wynikami eksperymentów przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie.

Słowa kluczowe: blok energetyczny, regulacja, modelowanie matematyczne, symulacja

1. WSTĘP

Oddział Techniki Ciepłej w Łodzi Instytutu Energetyki prowadzi od wielu lat prace naukowo-badawcze związane z wdrożeniem na blokach energetycznych elektrohydraulicznej regulacji mocy[1-5]. Efektem tych prac jest m.in. zainstalowanie na blokach energetycznych, biorących udział w regulacji systemu elektroenergetycznego, zaprojektowanych i skonstruowanych w OTC IEn mikroprocesorowych, elektrohydraulicznych regulatorów mocy (MREH)[4]. Dzięki zastosowaniu regulatorów możliwe stało się włączenie wybranych bloków energetycznych jako elementów regu-

dr inż. Jacek KARCZEWSKI, inż. Paweł SZUMAN
e-mail: [jacek.karczewski; p.szuman]@itc.edu.pl

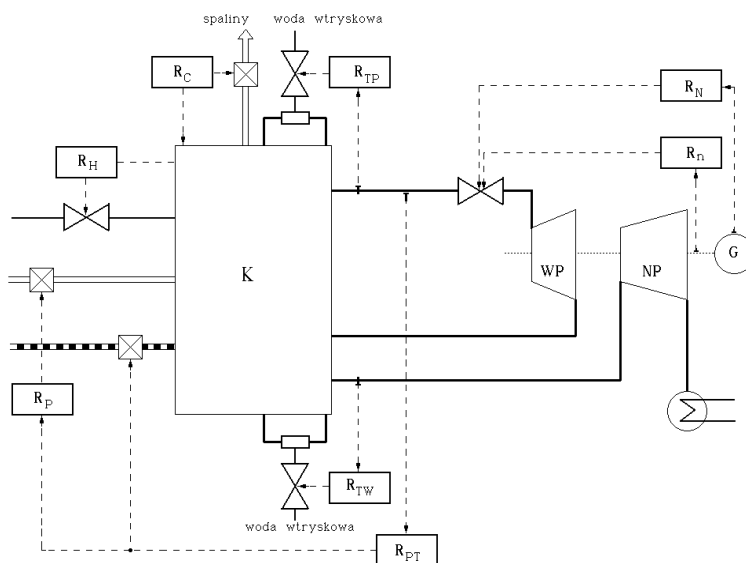
Instytut Energetyki, Oddział Techniki Ciepłej „ITC” w Łodzi
93-208 Łódź, ul. Dąbrowskiego 113

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 270, 2015

lacji systemu elektroenergetycznego (udział elektrowni w regulacji pierwotnej, wtórnej i trójnej polskiego systemu elektroenergetycznego.[1, 6]) W artykule przedstawiono modele różnych konfiguracji systemów regulacji bloków energetycznych (zespołu kocioł-turbina) uczestniczących w regulacji mocy systemu. Modele te wprowadzono do programu symulacyjnego SCILAB. Zaprezentowano wyniki symulacji różnych konfiguracji układu regulacji mocy oraz ciśnienia pary świeżej bloku energetycznego i na tej podstawie dokonano wyboru układu optymalnego z punktu widzenia wymagań narzuconych na Jednostki Wytwórcze Centralnie Dysponowane (JWCD). Porównano wybrane przebiegi symulacji z wynikami eksperymentów przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie, na którym zainstalowano skonstruowany w OTC regulator mocy.

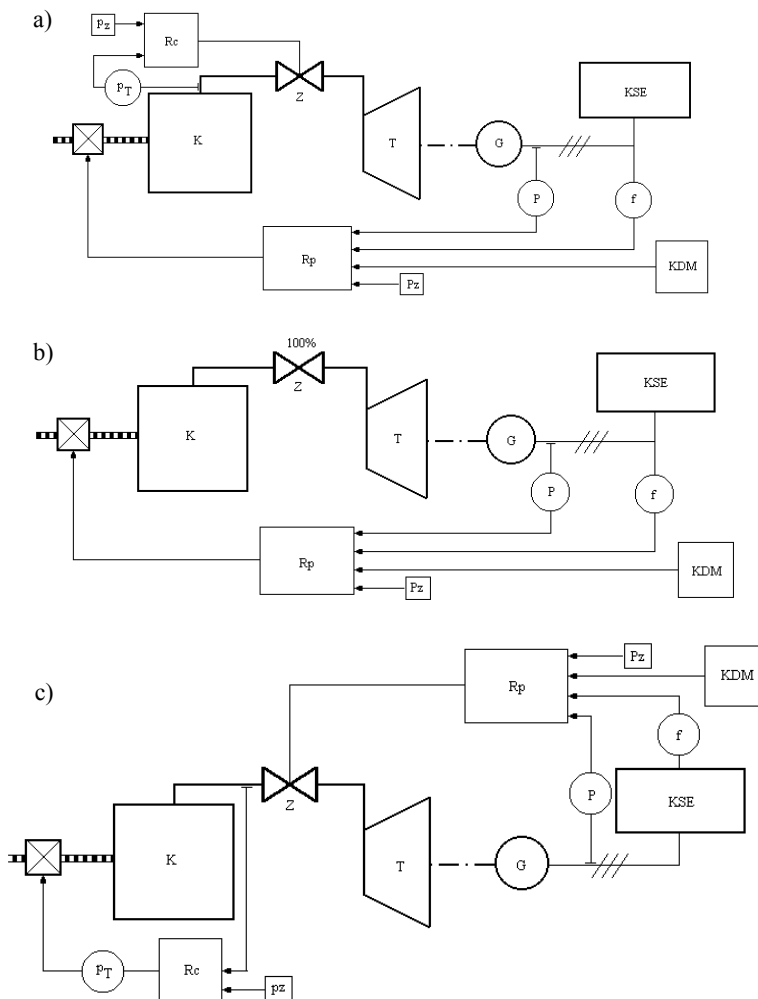
2. STRUKTURA UKŁADU REGULACJI OBCIĄŻENIA BLOKU ENERGETYCZNEGO

W elektrowniach zawodowych układ blokowy kocioł-turbina-generator stanowi złożony, wielowymiarowy obwód regulacyjny [7]. W jego skład wchodzi szereg składowych układów regulacji automatycznej, których zadaniem jest utrzymanie określonych parametrów regulacyjnych na zadanym poziomie (rys. 1). Jest to obiekt o wielu wielkościach regulowanych, w którym występują sprzężenia skrośne. Oznacza to, że każda niemal wielkość wejściowa oddziałuje na więcej niż jedną wielkość wyjściową.



Rys. 1. Najważniejsze obwody regulacyjne układu regulacji bloku:

R_H – regulator poziomu wody w walczaku; R_C – regulator ciągu w komorze paleniskowej; R_P – regulator dopływu powietrza; R_{PT} – regulator ciśnienia pary; R_{TP}, R_{TW} – regulatory temperatury pary pierwotnie i wtórnie przegrzanej; R_n – regulator prędkości obrotowej turbiny; R_N – regulator mocy



Rys. 2. Typowe układy regulacji obciążenia bloku energetycznego:

a) układ regulacji bloku przez oddziaływanie na kocioł (z reg. ciśnienia), b) układ regulacji bloku pracującego przy poślizgowym ciśnieniu pary, c) układ regulacji bloku przez oddziaływanie na turbinę

Oznaczenia: K – kocioł, T – turbina, G – generator, KDM – Krajowa Dyspozycja Mocy, KSE – Krajowy System Elektroenergetyczny, Z – zawór regulacyjny, R_p – regulator mocy, R_c – regulator ciśnienia, p_z – wartość zadana ciśnienia pary, P_z – wartość zadana mocy, P – tor pomiarowy mocy czynnej, p_T – tor pomiarowy ciśnienia pary, f – częstotliwość napięcia w KSE

Głównym zadaniem bloku energetycznego, biorącego udział w regulacji mocy i częstotliwości systemu elektroenergetycznego jest właściwa realizacja zmian mocy turbozespołu tzn. szybkie, możliwe bez opóźnień i deformacji nadążanie za sygnałem mocy zadanej. Jednym ze sposobów zapewnienia wymaganej szybkości zmian obciążenia bloków jest stworzenie odpowiedniej struktury układu regulacji obciążenia, a w szczególności wchodzącego w jego skład UAR ciśnienia pary przed turbiną [2].

Układy regulacji obciążenia bloku energetycznego oddziałują na strumień masy pary doprowadzonej do turbiny bądź to przez zmianę wydajności kotła za pośrednictwem strumienia masy paliwa doprowadzonego do spalania, bądź też przez zmianę położenia zaworów regulacyjnych turbiny. Trzy podstawowe warianty regulacji mocy czynnej wytwarzanej przez blok przedstawiono na rysunku 2. Układy przedstawione na rysunku 2a i 2b są układami obciążenia bloku poprzez oddziaływanie na kocioł. Jest to tzw. regulacja z wiodącym kotłem. Regulator mocy oddziałuje na strumień paliwa doprowadzanego do kotła. W wyniku zmian dopływu paliwa zmienia się strumień masy pary wytwarzanej, a w rezultacie również i ciśnienie pary za kotłem. W układzie z rysunku 2a regulator ciśnienia steruje pracą zaworu regulacyjnego turbiny utrzymując ciśnienie na stałym, zadanym poziomie. W ten sposób obciążenie turbiny dostosowuje się do wydajności kotła a wydajność kotła do wartości mocy zadanej będącej sumą mocy bazowej ustawianej przez operatora bloku i sygnałów zadawanych z Krajowej Dyspozycji Mocy. W układzie z rysunku 2b brak jest regulatora ciśnienia a zawór regulacyjny jest całkowicie otwarty. Obciążenie turbiny zależne jest tylko od ciśnienia za kotłem, a co za tym idzie od strumienia masy doprowadzonego paliwa. Wadą układów omawianych powyżej jest niemożliwość uzyskiwania szybkich zmian obciążenia bloku ze względu na opóźnienie wprowadzane przez kocioł i niewykorzystywanie zdolności akumulacyjnych kotła.

Układem powszechnie stosowanym w systemie jest układ regulacji obciążenia bloku poprzez oddziaływanie na turbinę czyli układ z wiodącą turbiną (rys. 2c). W układzie tym regulator mocy steruje pracą zaworów regulacyjnych turbiny. Każde przestawienie zaworów wywołuje zmianę ciśnienia pary, a to z kolei reakcję regulatora ciśnienia, zmieniającego strumień masy doprowadzonego paliwa do kotła aż do zbilansowania strumienia masy pary produkowanej przez kocioł ze strumieniem masy pary pobieranej przez turbinę. W rezultacie wydajność kotła dopasowuje się do obciążenia turbiny.

Regulacja mocy i prędkości obrotowej dokonywana jest przez oddziaływanie układu regulacji na zawory regulacyjne części wysokoprężnej (WP) turbiny. W sterowniku wypracowywany jest sygnał nastawczy, który przez przetwornik elektrohydrauliczny steruje pracą zaworów.

3. MODELE WYBRANYCH STRUKTUR OBCIĄŻENIA BLOKU ENERGETYCZNEGO

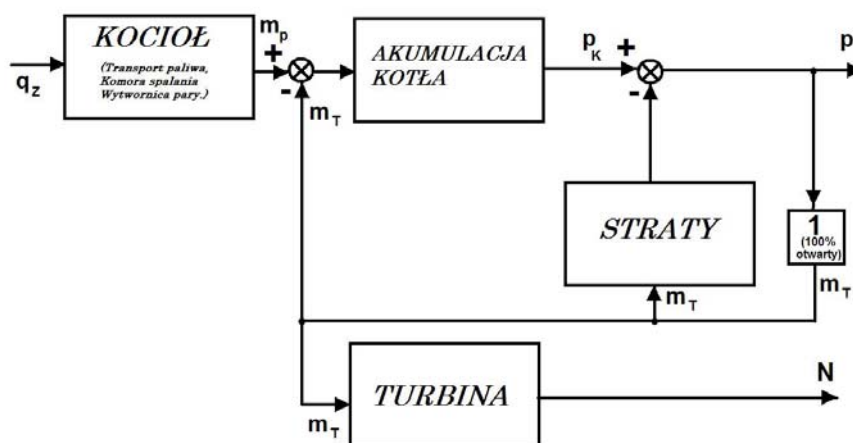
Omówione w rozdziale poprzednim struktury układów regulacji zamodelowano, przyjmując następujące założenia:

1. Modele dotyczą bloków energetycznych pracujących przy obciążeniu powyżej minimum technicznego.
2. Modele dotyczą turbin zsynchronizowanych z siecią, dlatego nie uwzględnia się w nich elementów związanych z rozruchem (np. regulacji prędkości obrotowej)
3. Przedmiotem zainteresowania jest regulator mocy konstrukcji OTC, a model obiektu jest narzędziem do sprawdzania funkcjonalności i prawidłowości pracy regulatora. Zwrócono więc szczególną uwagę na te parametry obiektu, które oddziałują na regulator w procesie regulacji mocy i ciśnienia pary świeżej. Dla uproszczenia modelu przyjęto, że pozostałe parametry kotła jak temperatura pary świeżej i wtórnie

przegrzanej, poziom wody w walczaku, ciśnienie spalin w komorze paleniskowej są utrzymywane na właściwym poziomie przez autonomiczne, wyizolowane układy regulacji.

4. Przy zakłóceniach spowodowanych zmianą mocy zadanej i zmianą strumienia paliwa model obiektu musi reagować podobnie jak obiekt rzeczywisty. Zatem dynamiczne właściwości bloku takie jak opóźnienia i inercja w torze paliwa oraz akumulacja w przestrzeniach parowych kotła muszą być odwzorowywane w szerokich granicach umożliwiających badanie reakcji poszczególnych obwodów we wszystkich przewidywanych przypadkach zakłóceń. Pozwoli to na sprawdzenie przydatności poszczególnych struktur regulacyjnych do regulacji parametrów systemu elektroenergetycznego, w kontekście wymagań jakościowych narzucanych na tę regulację.

Na rysunku 3 przedstawiono model układu sterowania mocą bloku z ciśnieniem poślizgowym (por. rys. 2b).

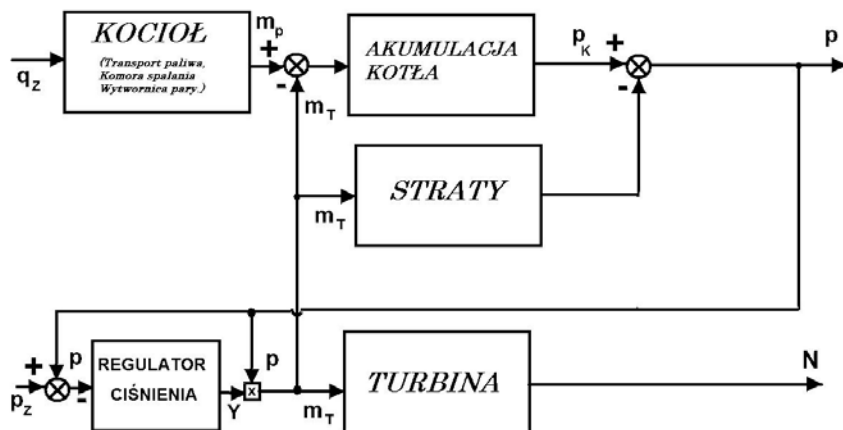


Rys. 3. Model układu sterowania mocą bloku z ciśnieniem poślizgowym

W układzie tym sygnał regulacyjny od mocy oddziałuje jedynie na kocioł (sygnał na palenisko kotłowe), a moc turbozespołu zmienia się przy, w pełni otwartych, zaworach regulacyjnych (w przybliżeniu proporcjonalnie do zmian ciśnienia pary). Sygnał wejściowy (sygnał na palenisko kotłowe) wprowadzany jest do bloku reprezentującego człon modelujący podajniki paliwa (opóźnienie transportowe) komorę spalania i wytwornicę pary. Kocioł, jako obiekt regulacji ciśnienia pary jest członem całkującym. Zachwianie równowagi pomiędzy energią doprowadzaną do kotła w strumieniu paliwa m_p a odbieraną w strumieniu pary z kotła (m_T) prowadzi do akumulacji energii w walczaku, co powoduje zmianę ciśnienia pary p_K ze stałą czasową odpowiadającą tej akumulacji. Sygnał p_K pomniejszony o stratę ciśnienia pary w kotle i w rurociągach (stratę tę można wyznaczyć w zależności od strumienia masy pary m_T) stanowi wartość ciśnienia pary p podawanego do turbiny. Ciśnienie to jest niezależne od położenia zaworów regulacyjnych turbiny, ponieważ są one, w tym przypadku, całkowicie

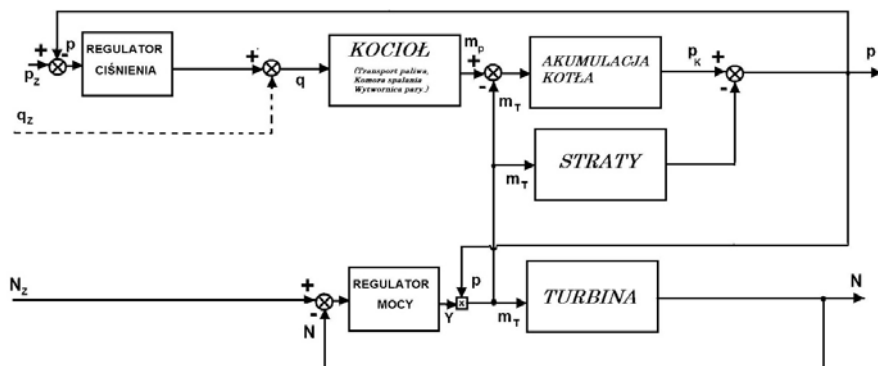
otwarte. Strumień masy pary m_T jest wielkością wejściową do turbiny, na wyjściu której otrzymujemy sygnał mocy rzeczywistej.

Rysunek 4 przedstawia model układu sterowania mocą bloku z wprowadzonym regulatorem ciśnienia pary (por. rys. 2a)



Rys. 4. Model układu sterowania mocą bloku z wprowadzonym regulatorem ciśnienia pary

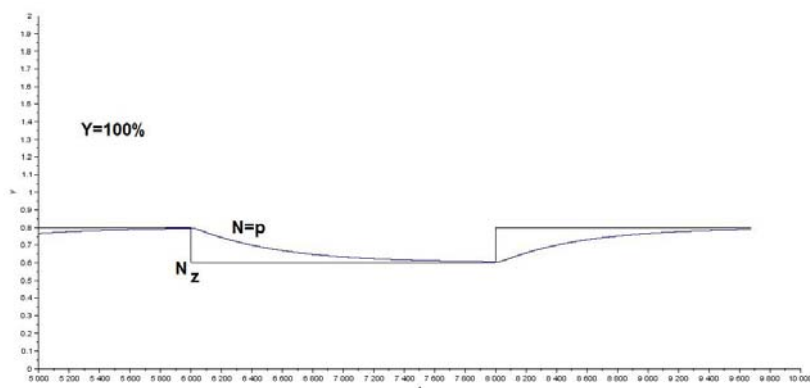
Podobnie jak w poprzednio omówionym przypadku, sygnał regulacyjny od mocy oddziałuje na kocioł. Dodatkowa pętla regulacyjna pozwala na utrzymywanie stałego ciśnienia pary poprzez odpowiednie otwarcie zaworów regulacyjnych turbiny. W układzie tym nie dopuszcza się więc chwilowych zmian ciśnienia, zaś turbina przejmuje tyle pary ile zostanie wytworzone przy stałym ciśnieniu. Sygnał nastawczy regulatora ciśnienia Y przedstawia otwarcie zaworów regulacyjnych doprowadzających parę do części wysokoprężnej turbiny. Strumień masy tej pary m_T jest iloczynem sygnału Y oraz ciśnienia pary świeżej p .



Rys. 5. Model układu sterowania mocą bloku poprzez oddziaływanie na turbinę

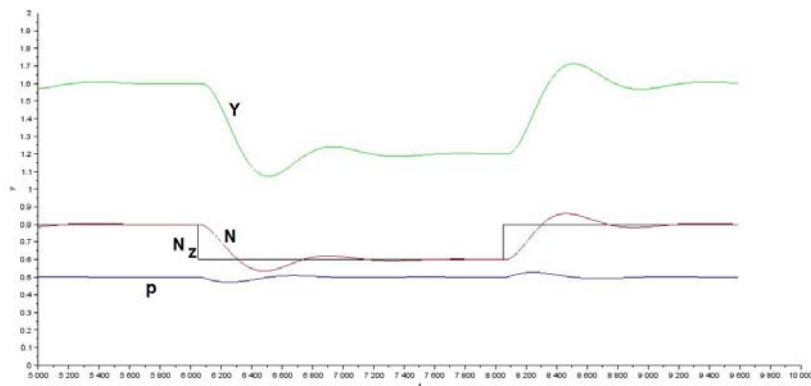
różnego rodzaju wymuszenia tak po stronie turbiny jak i kotła (wymuszenie zmianą doprowadzanego do kotła paliwa oraz wymuszenie zmianą położenia zaworów regulacyjnych turbiny). Przykładowe przebiegi uzyskane w wyniku symulacji zostały zaprezentowane na rysunkach 7-10. Na rysunkach tych wymuszeniem były skokowe zmiany wartości zadanej mocy. Na wykresach przedstawiono przebiegi mocy, ciśnienia pary świeżej i położenia zaworów regulacyjnych w odpowiedzi na dwukierunkową zmianę wartości zadanej.

Rysunek 7 przedstawia przebiegi w układzie regulacji z ciśnieniem poślizgowym. W układzie tym zawory regulacyjne są w pełni otwarte a moc rzeczywista bloku nadąża za zmianami ciśnienia, wywołanymi poprzez zmianę doprowadzenia paliwa do kotła. Mimo iż moc płynnie i bez przeregulowań nadąża za zmianami ciśnienia, to jednak długi czas przebiegu przejściowego dyskwalifikuje ten układ w regulacji systemu elektroenergetycznego.



Rys. 7. Symulacja pracy układu regulacji bloku z ciśnieniem poślizgowym

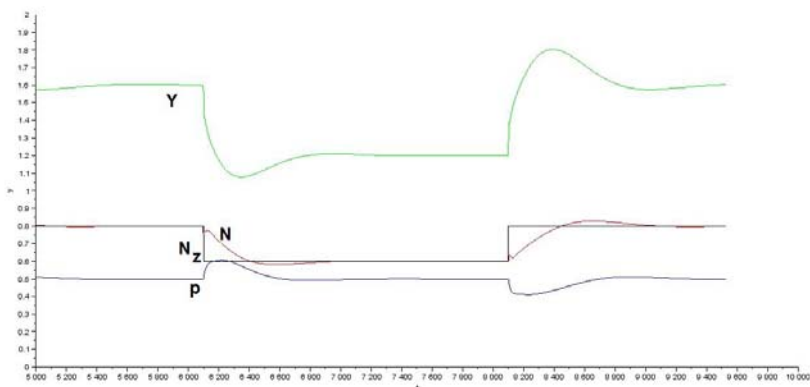
Na rysunku 8. przedstawiono symulację układu regulacji bloku energetycznego z wiodącym kotłem, w którym zastosowano regulację ciśnienia pary świeżej.



Rys. 8. Symulacja pracy układu regulacji bloku z wiodącym kotłem (z regulatorem ciśnienia)

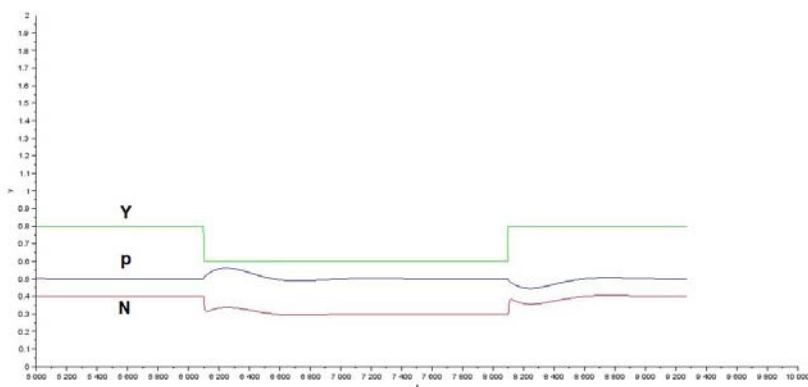
W układzie z wiodącym kotłem, z regulowanym ciśnieniem pary nie dopuszcza się do chwilowych zmian ciśnienia, zaś turbina przejmuje tyle pary ile zostanie wytworzone przy stałym ciśnieniu. Czas regulacji jest nadal długi a w przebiegu mocy występuje wyraźne przeregulowanie.

Na rysunku 9 przedstawiono symulację układu regulacji bloku energetycznego z wiodącą turbiną.



Rys. 9. Symulacja pracy układu regulacji bloku z wiodącą turbiną

W układzie wiodącej turbiny regulator mocy steruje pracą zaworów regulacyjnych turbiny. Każde przestawienie zaworów, wywołuje zmianę ciśnienia pary, a to z kolei reakcję regulatora ciśnienia zmieniającego strumień masy doprowadzonego paliwa do kotła. Układ regulacji bloku z wiodącą turbiną charakteryzuje się szybkim przejmowaniem sygnału mocy zadanej tak więc nadaje się do pracy bloku w regulacji systemu. Szybkie zmiany mocy wywołują jednak wahania ciśnienia, które muszą być niwelowane przez UAR kotła. Tak więc celowe jest powiązanie obu UAR dodatkowymi sygnałami sprzęgającymi [5].



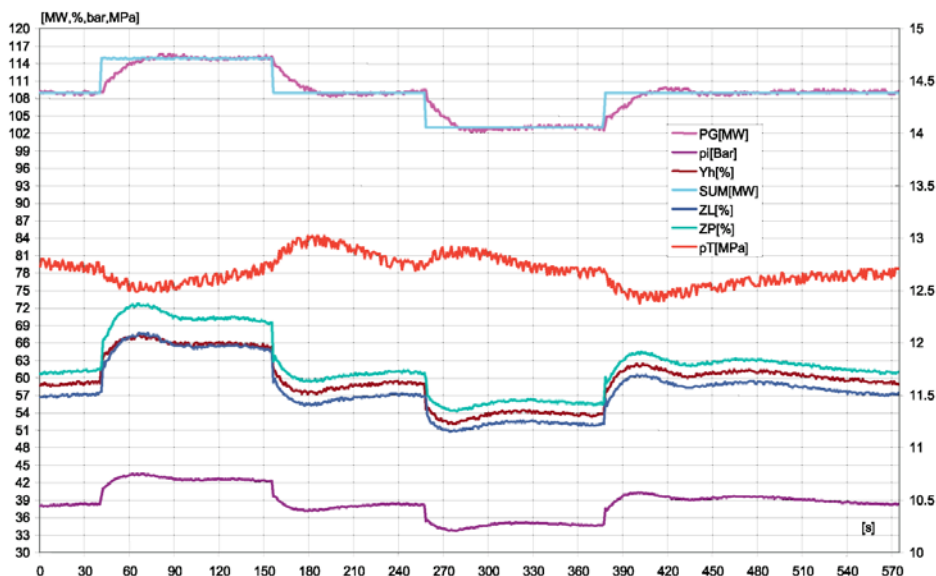
Rys. 10. Symulacja pracy układu ręcznego sterowania zaworami regulacyjnymi turbiny

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki symulacji pracy bloku podczas ręcznego sterowania zaworami regulacyjnymi turbiny (przerwana pętla sprzężenia zwrotnego w UAR mocy, brak regulatora mocy, który w tym przypadku stanowi zadajnik położenia zaworów regulacyjnych).

W zaprezentowanych przebiegach wyraźnie widać wpływ obwodu ciśnienia na przebieg mocy. Moc „czeka” na odbudowę ciśnienia, która dokonuje się poprzez zmianę doprowadzenia paliwa. Dopiero po tej odbudowie, możliwe jest osiągnięcie poziomu mocy, wynikającego z otwarcia zaworów regulacyjnych turbiny.

4. BADANIA OBIEKTOWE

Otrzymane podczas symulacji wyniki porównano z przebiegami, zarejestrowanymi podczas badań odbiorczych regulatorów mocy produkcji OTC [2]. Badania przeprowadzono na rzeczywistym obiekcie (blok 120 MW). Ponieważ rzeczywisty układ pracy regulatorów, to układ z wiodącą turbiną, przedstawione przebiegi dotyczą tego właśnie przypadku. Celem przeprowadzonych badań było przetestowanie regulatora mocy pod kątem spełnienia wymagań, dotyczących udziału bloku w regulacji systemu elektroenergetycznego (regulacja pierwotna i wtórna). W czasie badań symulowano zmiany mocy w zakresie regulacyjnym (80 ÷ 120 MW) i sprawdzano odpowiedź bloku na te zmiany. Poniżej przedstawiono wyniki wybranych prób.



Rys. 11. Badania obiektowe układu regulacji bloku w układzie „wiodącej turbiny”

Wykaz oznaczeń: PG [MW] – moc generatora, pi [Bar] – ciśnienie oleju impulsowego regulatora otwarcia, Yh [%] – sygnał nastawczy regulatora, SUM [MW] – sumaryczna moc zadana (za Ogranicznikiem Szybkości Obciążania OSO), pT [MPa] ciśnienie pary świeżej z kotła, ZL [%] położenie zaworu WP lewego, ZP [%] położenie zaworu WP prawego

Zaprezentowane wykresy dowodzą poprawnej pracy układów regulacji, ale jednocześnie stanowią potwierdzenie rezultatów otrzymanych podczas symulacji. Skokowe zmiany wartości zadanej mocy, przetworzone w Ograniczniku Szybkości Obciążenia (OSO), poprzez sygnał nastawczy i ciśnienie oleju impulsowego sterują pracą zaworów regulacyjnych wywołując zmiany mocy rzeczywistej. Skoki mocy 6 MW (rys. 11) wywołane zostały zmianą częstotliwości 100 mHz. Dynamika jest prawidłowa (stan ustalony osiągany jest po $t < 30$ s). Niewielkie przeregulowanie nie przekracza 1,2 MW. W układzie widoczne jest również oddziaływanie obwodu regulacji mocy na UAR ciśnienia. Zmiany mocy wywołują odchyłkę ciśnienia, która niwelowana jest przez regulator ciśnienia, który oddziałuje na strumień doprowadzanego paliwa (por. rys. 9).

5. PODSUMOWANIE

Porównując rezultaty badań wybranych układów regulacji można zauważyć, że:

1. Układ wykorzystujący poślizgowe ciśnienie pary posiada wiele zalet statycznych (dobra charakterystyka sprawności energetycznej przy częściowych obciążeniach). Blok pracuje w korzystnych warunkach termicznych i wytrzymałościowych. Układ nie znajduje jednak zastosowania w przypadku uczestnictwa bloku w regulacji systemu elektroenergetycznego. Nie wykorzystuje się w nim nie tylko możliwości akumulacyjnych kotła, ale zmusza się kocioł do zwiększenia produkcji pary przy jednoczesnym zwiększeniu energii akumulacji. Skutkuje to dużymi opóźnieniami dostosowania produkcji energii do zmiennego w czasie zapotrzebowania.
2. W układzie z wiodącym kotłem, z regulowanym ciśnieniem pary, nie dopuszcza się chwilowych zmian ciśnienia, zaś turbina przejmuje tyle pary ile zostanie wytworzone przy stałym ciśnieniu. System ten wykazuje mniejsze deformacje mocy niż przy ciśnieniu poślizgowym ale czas regulacji jest nadal długi
3. Układ regulacji bloku z wiodącą turbiną, charakteryzuje się szybkim przejmowaniem sygnału mocy zadanej tak więc nadaje się do pracy bloku w regulacji systemu. Szybkie zmiany mocy wywołują jednak wahania ciśnienia, które muszą być niwelowane przez UAR kotła. Tak więc celowe jest powiązanie obu UAR dodatkowymi sygnałami sprzęgającymi, które z wyprzedzeniem informują UAR ciśnienia pary o zamierzonej zmianie mocy..
4. Przedstawione modelowanie wybranych struktur układów regulacji mocy i ciśnienia pary świeżej bloków energetycznych pozwala na symulację ich pracy i dobrze oddaje charakter przebiegów wybranych sygnałów. Znajduje to potwierdzenie w badaniach obiektowych.

LITERATURA

1. Karczewski J, Pawlak M, Szuman P., Wąsik P: Availability assessment of power units participating in electrical power system control. Archives of Energetic, nr 1-2, s. 89-103, 2010.
2. Karczewski J, Pawlak M.: Weryfikacja poprawności działania elektrohydraulicznego regulatora mocy turbiny kondensacyjnej biorącej udział w regulacji systemu elektroenergetycznego. Materiały konferencji „PES-8”, s. 67-70, 2013.

3. Karczewski J, Szuman P, Wąsik P „Sterowanie serwomotorów zaworów regulacyjnych turbiny za pomocą elektrohydraulicznego regulatora mocy czynnej” Wiadomości Elektrotechniczne, 11/2014, s. 46-49, 2014.
4. Karczewski J, Pawlak M: „New structure of governor electrohydraulic power with meets the requirements of the implemented LFC-System” Acta Energetica 1/18, s. 126-135, 2014.
5. Karczewski J., Pawlak M: „Power control problems of units co-burning biomass” Archives of Energetic, tom XXI, nr 3, s. 3-13, 2011.
6. Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007.
7. M. Pawlik, F. Strzelczyk, Elektrownie, WNT, Warszawa, 2009.

Przyjęto do druku dnia 23.10.2015 r.

POWER UNIT WORK OPTIMIZATION BASED ON SIMULATION OF VARIOUS CONTROL SYSTEM CONFIGURATIONS

Jacek KARCZEWSKI, Paweł SZUMAN

SUMMARY *The Heat Engineering Branch “ITC” in Lodz of the Institute of Power Engineering has conducted, for many years, R&D projects related to the implementation of electro-hydraulic power controllers to power units. Models of power unit are presented in this article. These models were implemented to Scilab simulation program. Simulation results of the power unit work in various configurations are presented. These results have been compared to results of experiments carried out on the real object.*

Keywords: *power unit, control system, mathematical model, simulation*

Dr inż. Jacek KARCZEWSKI, adiunkt, dyrektor Oddziału Techniki Ciepłej „ITC” Instytutu Energetyki w Łodzi, specjalista w zakresie regulacji turbin



Inż. Paweł SZUMAN, starszy specjalista badawczo-techniczny Oddziału Techniki Ciepłej Instytutu Energetyki w Łodzi, kierownik Zakładu Automatyzacji, specjalista w zakresie projektowania elektronicznych układów pomiarowych i układów automatyki.