ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: MECHANIKA z.99 Nr kol. 1057

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"
POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ
Beskid Śląski, 1990

Krzysztof Badyda, Janusz Lewandowski,
Andrzej Miller, Jacek Szczap
Instytut Techniki Cieplnej
Politechnika Warszawska

MODEL MATEMATYCZNY DYNAMIKI UKŁADU PAROWO-GAZOWEGO Z CIŚNIENIOWYM KOTŁEM FLUIDALNYM

Streszczenie. Omówiono koncepcję modelu matematycznego do badania procesów nieustalonych zachodzących w układzie parowo-gazowym z ciśnieniowym kotłem fluidalnym, w zakresie średnich i dużych obciążeń. Podano podstawowe równania będące podstawą do sformułowania modelu. Przedstawiono wyniki symulacji wybranych procesów nieustalonych.

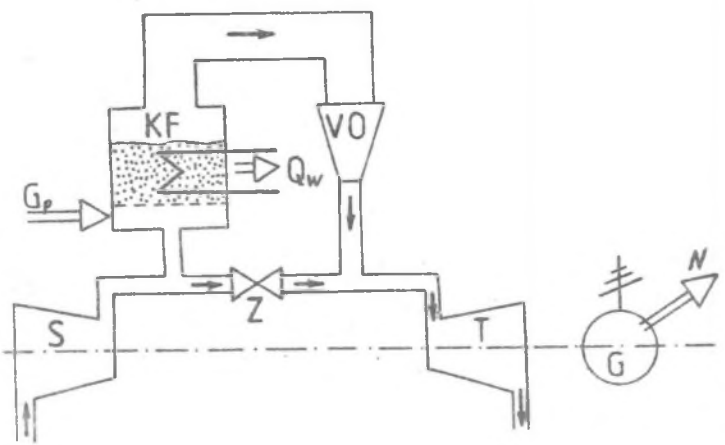
1. Wstęp

Elektrownie parowo-gazowe z ciśnieniowymi kotłami fluidalnymi uważane są obecnie za jedne z najbardziej perspektywicznych instalacji energetycznych wykorzystujących paliwo węglowe. Pozwalają one bowiem, w porównaniu z instalacjami konwencjonalnymi, na produkcję energii elektrycznej z wyższą sprawnością oraz przy znacznie mniejszej emisji SO_2 i NO_x.

W wyniku dekompozycji układ parowo-gazowy można podzielić na dwie części: praktycznie konwencjonalną część parową oraz część gazową o niedostatecznie jeszcze rozpoznanych właściwościach, szczególnie w zakresie charakterystyk dynamicznych. Schemat części gazowej układu przedstawiono na rys.1. W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny o stałych skupionych do badania dynamiki tej części układu.

2. Koncepcja modelu

Decydujący wpływ na przebieg rozpatrywanych procesów nieustalonych ma akumulacja masy i energii czynnika roboczego w elementach rozpatrywanego układu. Proces ten zachodzi w sposób ciągły na całej drodze przepływu powietrza i spalin. Do jego opisu należałoby zatem wykorzystać model o stałych rozłożonych, co jednak przysparza znaczych trudności i jak się wydaje, byłoby niecelowe na obecnym etapie prac, tym bardziej, że doświadczenia uzyskane przy mo-



Rys.1.Schemat części gazowej układu parowo-gazowego z ciśnieniowym kotłem fluidalnym; S-sprężarka, KF-kocioł fluidalny, VO-instalacja oczyszczania spalin, Z-zawór regulacyjny na rurociągu obejściowym kotła, T-turbina gazowa, G-generator elektryczny, G_{pal} - strumień masy paliwa, Q_w - ciepło oddawane do części parowej, N- moc elektryczna.

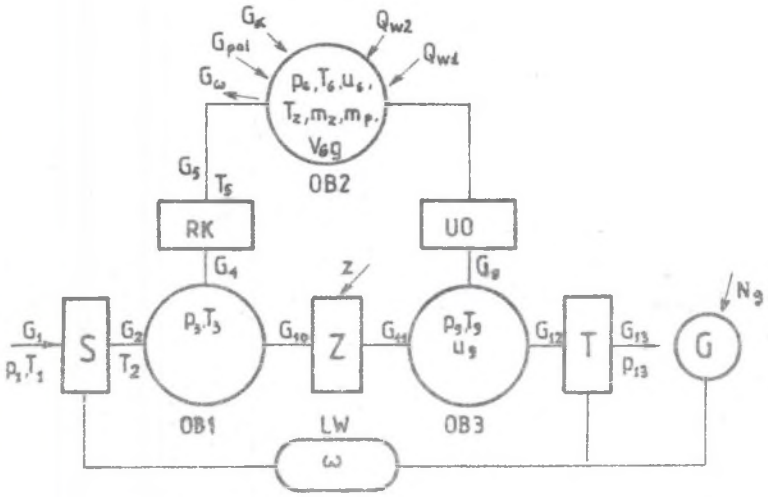
delowaniu dynamiki innych obiektów energetycznych wykazały, iż zadowalające wyniki można uzyskać stosując modele matematyczne o stałych skupionych.

W rozpatrywanej instalacji wyróżnić można elementy, w których zachodzące zjawiska nieustalone mają stałe czasowe wielokrotnie mniejsze od stałej czasowej całej instalacji. Elementy te mogą być zatem modelowane statycznie, tj. zachodzące w nich zjawiska mogą być rozpatrywane jako ciągi chwilowych stanów ustalonych. W analizowanym przypadku zjawiskami tymi są przemiany termodynamiczne czynnika roboczego, zjawiska związane z przemianami energii w turbinie,

sprężarce i zaworze. Dynamicznie powinny być modelowane te elementy, w których decydujące znaczenie mają zjawiska akumulacji czynnika roboczego. W omawianym wariancie modelu elementy te związano z trzema przestrzeniami akumulacyjnymi.

Powyższe rozumowanie pozwala sporządzić schemat zastępczy rozpatrywanej instalacji. W schemacie tym, przedstawionym na rys.2. wyróżniono:

- przestrzeń akumulacyjnę OB1, obejmującą kolektor tłoczny sprężarki, rurociąg doprowadzający powietrze do kotła, komorę pod rozdzielaczem powietrza w kotle oraz rurociąg obejściowy do zaworu;
- przestrzeń akumulacyjną OB2, obejmującą komorę palewniskową kotła od rozdzielacza do urządzeń odpylających;



Rys.2.Schemat zastępczy rozpatrywanej instalacji.Oznaczenia elementów objaśniono w tekście. Wypisano współrzędne stanu oraz wielkości wejściowe i wyjściowe dla wyróżnionych elementów (p, T-ciśnienie i temperatura powietrza lub spalin, u-udział masowy spalin stechiometrycznych, T_z -temperatura złoża fluidalnego, m_z- masa złoża m_p- masa paliwa, G-strumień masy)

- strumienia masy podawanego paliwa G_p.
- strumieni masy G_α oraz G_ω masy inertnej odpowiednio dostarczanej i odprowadzanej ze złoża fluidalnego w celu regulacji jego wysokości,
- położenia zaworu regulacyjnego na rurociągu obejściowym - z.

3. Podstawowe zależności modelu matematycznego instalacji

Sformułowanie modeli matematycznych elementów rozpatrywanych dynamicznie wymaga określenia, związanych z tymi elementami, współrzędnych stanu instalacji. Przeprowadzone analizy wykazały, że współrzędnymi tymi powinny być (oznaczenia zgodnie z rys.2):

- dla przestrzeni OB1: ciśnienie p_3 i temperatura T_3 powietrza;
- dla przestrzeni OB2: ciśnienie p_6 i temperatura T_6 spalin, udział w spalinach spalin stechiometrycznych u_6, temperatura złoża fluidalnego T_z, masa złoża m_z, masa paliwa w złożu m_p, objętość kotła nad złożem fluidalnym V_{6g};
- dla przestrzeni OB3: ciśnienie p_9 oraz temperatura T_9 spalin i udział w spalinach spalin stechiometrycznych u_9.
- dla modułu zespołu wirników prędkość obrotowa ω.

Modele matematyczne tych modułów są określone przez równania bilansowe. Dla przestrzeni OB1 są to:

- bilans masy powietrza

$$\frac{dm_3}{dt} = G_2 - G_4 - G_{10}; \tag{1}$$

- bilans energii powietrza

$$\frac{dH_3}{dt} = G_2\, h_2 - G_4\, h_3 - G_{10}\, h_3 + V_3 \frac{dp_3}{dt}, \tag{2}$$

gdzie H oznacza entalpię, h entalpię właściwą.

Model przestrzeni OB2 tworzą równania:

-bilansu masy spalin

$$\frac{dm_6}{dt} = G_5 + m_p\, k_s - G_7, \tag{3}$$

gdzie k_s jest stałą spalania węgla;

- bilansu energii spalin

$$\frac{dH_6}{dt} = (G_5 + m_p\, k)\, h_s - G_7\, h_6 - Q_{w1} + V_{6g} \frac{dp_6}{dt}, \tag{4}$$

gdzie h_s jest entalpią właściwą spalin opuszczających złoże, Q_{w1}

- przestrzeń akumulacyjną OB3, obejmującą rurociąg obejściowy od zaworu do turbiny oraz kolektor dolotowy turbiny;
- sprężarkę S;
- rozdzielacz powietrza w kotle RK;
- urządzenia oczyszczające spaliny VO,
- zawór Z,

- zespół wirników sprężarki, turbiny i generatora LW jako element akumulujący energię kinetyczną ruchu obrotowego.

Założono, że w przestrzeniach akumulacyjnych nie zachodzą straty ciśnienia. Przypisano je do elementów rozpatrywanych statycznie. Spaliny, będące czynnikiem roboczym, w większości elementów instalacji modelowano jako mieszaninę doskonałą powietrza i spalin stechiometrycznych.

Rozpatrywany model pozwala na badania wpływu na charakterystyki dynamiczne układu następujących wielkości wejściowych:

- ciśnienia p_1 i temperatury T_1 powietrza na ssaniu sprężarki,
- ciśnienia p_{13} spalin na wylocie z turbiny gazowej,

ciepłem przekazanym od spalin do części parowej instalacji, a V_{6g} objętością zajmowaną przez spaliny;

- bilansu masy spalin stechiometrycznych

$$\frac{d(m_6\, u_6)}{dt} = m_p\, k_s\, (1 + L_{tp}) - G_7\, u_6, \tag{5}$$

gdzie L_{tp} jest teoretycznym zapotrzebowaniem powietrza do spalania;

- bilansu masy paliwa

$$\frac{dm_p}{dt} = G_p\, u_p - m_p\, k, \tag{6}$$

gdzie u_p jest wynikającym z własności paliwa udziałem masy palnej;

- bilansu masy inertnej złoża

$$\frac{dm_z}{dt} = G_\alpha - G_\omega + G_p\, (1-u_p), \tag{7}$$

gdzie G_α oraz G_ω są strumieniami masy doprowadzanymi i odprowadzanymi ze złoża w celu zmiany jego wysokości;

- bilansu energii złoża

$$\frac{d(m_z\, T_z\, c_z)}{dt} = G_5\, h_5 + m_p\, k\, W_u + G_\alpha\, T_1\, c_z - G_\omega\, T_z\, c_z + \\ - (G_5 + m_p\, k)\, h_s - Q_{w2}, \tag{8}$$

gdzie c_z jest ciepłem właściwym złoża, a Q_{w2} ciepłem odprowadzanym od złoża do części parowej układu;

- bilansu objętości złoża i przestrzeni zajmowanej prez spaliny

$$m_z\, \rho_z + V_{6g} = V. \tag{9}$$

gdzie ρ_z jest gęstością właściwą złoża, a V objętością komory kotła.

W przypadku przestrzeni OB3 podstawą modelu są równania bilansu masy i energii spalin oraz bilansu masy spalin stechiometrycznych:

$$\frac{dm_9}{dt} = G_8 + G_{11} - G_{12}, \tag{10}$$

$$\frac{dH_9}{dt} = G_8\, h_8 + G_{11}\, h_{11} - G_{12}\, h_9 + V_9 \frac{dp_9}{dt}, \tag{11}$$

$$\frac{d(m_9\, u_9)}{dt} = G_8\, u_8 - G_{12}\, u_9. \tag{12}$$

Model matematyczny zespołu wirników określa równanie równowagi momentów , które przekształcone do postaci równania bilansu mocy ma znaną postać:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{N_t - N_s - N_g - \Delta N_m}{J\,\omega}, \tag{13}$$

gdzie N_t - moc turbiny, N_s - moc turbiny, N_g - moc obciążająca generator elektryczny, ΔN_m - straty mechaniczne, J - moment bezwładności wirników.

Równania (1)-(13) przekształcić można do postaci nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych o postaci normalnej względem współrzędnych stanu. Uzupełnieniem modeli matematycznych przestrzeni akumulacyjnych są równania algebraiczne wynikające z własności czynnika roboczego (przyjęto model gazu półdoskonałego), równanie określające ciepło przekazywane do obiegu parowego itp. Postać równań algebraicznych mają także modele matematyczne elementów rozpatrywanych statycznie. Modele te w zakresie charakterystyk przepływowych elementu można zapisać w ogólnej postaci:

$$G_i = G_{i+1} = f(p_i, T_i, p_{i+2}), \tag{14}$$

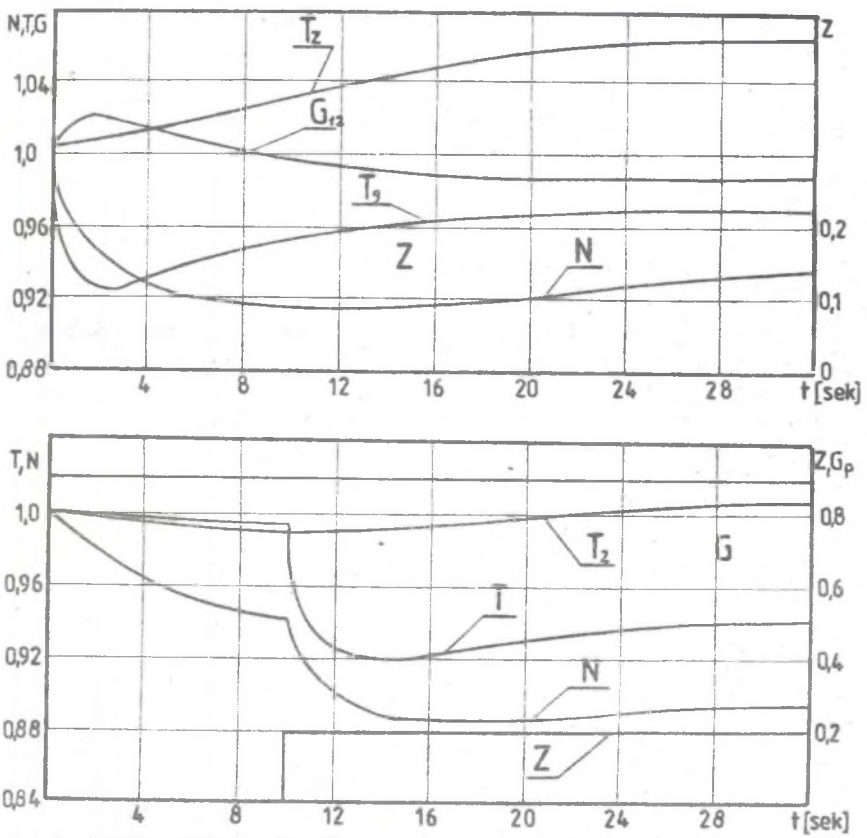
$$h_{i+1} = f(p_i, T_i, p_{i+2}). \tag{15}$$

W przypadku turbiny i sprężarki występują też równania pozwalające wyznaczyć moc maszyn.

Model matematyczny całej instalacji określony jest przez układ nieliniowych 13 równań różniczkowych zwyczajnych oraz kilkudziesięciu nieliniowych równań algebraicznych. Do jego rozwiązania w zakresie równań różniczkowych wykorzystano algorytm oparty na metodzie Rungego-Kutty, a w zakresie równań algebraicznych algorytm iteracyjny.

4. Przykładowe wyniki obliczeń

Wykorzystując omówiony model matematyczny wyznaczono charakterystyki układu parowo-gazowego z ciśnieniowym kotłem fluidalnym, którego szczegółowy opis przedstawiono w [1]. Jest to układ wykorzystujący w części parowej odpowiednio przystosowany krajowy turbozespół z turbiną 18K360. Moc części parowej układu wynosi 405 MW, a części gazowej 121 MW. Znamionowe parametry pracy kotła fluidalnego wynoszą: ciśnienie 1,3MPa, temperatura złoża 850 °C,



Rys.3. Wyniki obliczeń wybranych procesów nieustalonych. Wartości wszystkich wielkości odniesiono do ich wartości w stanie początkowym, równym stanowi znamionowemu. Zakłócenia: z - stopień otwarcia zaworu, G-strumień masy paliwa; Wielkości wyjściowe: T_z- temperatura złoża, N^p- moc elektryczna, G_{12}- strumień masy spalin przed turbiną, T_9- temperatura spalin przed turbiną

zużycie węgla 74 kg/s. Przykładowe wyniki obliczeń dwóch rozważanych procesów przejściowych przedstawiono na rys.3. Rys.3a dotyczy procesu przejściowego po skokowym otwarciu zaworu regulacyjnego na rurociągu obejściowym. Na rys.3b przedstawiono przebieg wybranych parametrów pracy instalacji po skokowej zmianie ilości dostarczanego paliwa, a następnie otwarciu zaworu.

LITERATURA

[1] J.Lewandowski, A.Miller, J.Plewa: Siłownia parowo-gazowa z ciśnieniowym kotłem fluidalnym i turbozespołem 18K360 - propozycja układu. Gospodarka Paliwami i Energią 4/1983.

МАТЕМАТУЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ С ПАРОГЕНЕРАТОРОМ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Резюме

Обговорено концепция математической модели для исследования переходных процессов в парогазовой установке с парогенератором с кипящим слоем под давлением, в диапазоне средних и больших нагрузок. Приводится базобые уравнения модели. Представляется примерные результаты симуляции избранных переходных процессов.

MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC OF COMBINED GAS-STEAM CYCLE POWER PLANT WITH PRESSURIZED FLUIDIZED BED BOILER

Summary

A concept of mathematical model of combined gas-steam cycle power plant with a pressurized fluidized bed boiler has been discused. The model allows to analyse power plant performances at transient processes in a range of middle and large loads. The bases formulas of model have been shown. Some resultes of transient processes simulation have been presented.