

Michał Ferenc, Józef Ober

STAN ROZWOJU MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO DYNAMIKI UKŁADU CIEPINEGO ELEKTROWNI PAROWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono główne kierunki badań nad opracowaniem modelu matematycznego urządzeń energetycznych w elektrowni parowej.

Poruszono problemy doboru zmiennych stanu, linearyzacji równań, a także metod obliczeniowych.

1. Wstęp

Współczesny blok energetyczny wraz z układami pomocniczymi stanowi duży zespół współpracujących ze sobą urządzeń. Obok kotła, turbiny i generatora niezbędne są urządzenia do przygotowania paliwa (transportery, młyny), wody (odgazowywacze, podgrzewacze regeneracyjne, pompy) itp.

W warunkach eksploatacyjnych wszystkie te urządzenia są ze sobą sprzężone wspólnym procesem produkcyjnym i wzajemnie na siebie oddziałują. Uwzględnienie tych oddziaływań w modelu matematycznym jest niezmiernie trudne z uwagi na dużą ilość zmiennych, dlatego opis matematyczny bloku ogranicza się zwykle do zespołu - kocioł - turbina, - generator.

Niniejsze opracowanie dotyczy zagadnień modelowania układów cieplnych bloku.

Model matematyczny, czyli układ równań różniczkowych opisujący zachowanie się obiektu umożliwia poznanie własności statycznych i dynamicznych obiektu, przeprowadzenie badań modelowych układów regulacji, wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w obiekcie w celu uzyskania pożądaných własności regulacyjnych.

W miarę rozwoju wiedzy o procesach zachodzących w poszczególnych urządzeniach, uwzględniając wyniki badań doświadczalnych oraz wymagania stawiane układom regulacji różni badacze starali się rozwijać i udoskonalać opis matematyczny bloku lub jego części składowych. Kierunek ewolucji w dziedzinie tworzenia modeli matematycznych określa z jednej strony dążenie do uzyskania jak najlepszej zgodności modelu z obiektem rzeczywistym (zwiększenie dokładności), z drugiej strony ograniczone możliwości techniki obliczeniowej zmuszały do uproszczenia modeli.

2. Przegląd istniejących prac z zakresu modelowania

Z uwagi na dużą ilość i różnorodność pozycji literaturowych przegląd istniejących prac nie będzie dotyczył pojedynczych opracowań lub urządzeń technologicznych lecz kompleksów zagadnień związanych z kolejnymi fazami matematycznego modelowania dynamiki układów cieplnych.

2.1. Metody modelowania elementów o charakterze przepływowym

Do elementów o charakterze przepływowym zalicza się wszystkie rurociągi z przepływającym czynnikiem: podgrzewacze wody, przegrzewacze pary, ekrany itp. Ogólnie element przepływowy może być opisany równaniem bilansu wg Haase [4]

$$\frac{\partial Z_v}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}_z + g(Z) \quad (1)$$

$$Z_v = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{Z}{V}$$

gdzie

Z - dowolna zmiennej,

Z_v - gęstość dowolnej zmiennej,

V - objętość,

\vec{I}_z - wektor strumienia zmiennej, na jednostkę powierzchni,

$g(z)$ - funkcja określająca ilość wytworzonej lub unicestwionej zmiennej,
 oraz równaniem sił działających na strumień

$$\dot{m} \frac{\partial u}{\partial x} = \sum F \quad (2)$$

gdzie

u - prędkość przepływu w kierunku osi x

\dot{m} - strumień masy

F - siły działające na strumień na jednostkę długości.

Równanie (1) i (2) prowadzi dla czynnika jednofazowego do układu trzech równań cząstkowych, równania zachowania masy, równania równowagi sił oraz równania zachowania energii. Układ równań zostaje następnie poszerzony o równanie wymiany ciepła oraz o równania termodynamiczne stanu strumienia. Tak rozbudowany układ równań dla opisu elementów przepływowych znajduje zastosowanie tylko w niewielu pracach [1] [2], [5], [6], [7].

W większości prac stosuje się daleko idące uproszczenia łącznie z zastąpieniem elementu przepływowego elementem czasu martwego. Rury opadowe i ekrany opisywane są najczęściej razem z walczakiem [8][9] w postaci stałych skupionych i nie występują w postaci jawnej w modelu. Tylko w nielicznych pracach [7], [10] rury opadowe i wznoszące zostały wydzielone jako oddzielne układy. W pracy autorów japońskich [6] wprowadzony został podział rur opadowych i wznoszących na poszczególne odcinki.

Przy opisie rur wznoszących autorzy zakładają stan równowagi termodynamicznej i przyjmują w opisie stały stosunek prędkości przepływu pary do wody. Interesujący opis dwufazowego czynnika posiada praca [11] przedstawiając porównawczo wyniki przyjętych modeli wytwornicy pary w elektrowni atomowej na neutronach prędkich. Przegrzewacze pary opisywane są znanymi równaniami cząstkowymi wynikającymi z bilansu energetycznego.

Bilans energetyczny odcinka rury o długości dx , z uwzględnieniem akumulacji ciepła w metalu rury przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + W \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha U}{A \rho c} (T_M - T)$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial t} - \frac{\alpha U}{A_M \rho_M c_M} (T_M - T) = \frac{\alpha_G U_G}{A_M \rho_M c_M} (T_G - T_M)$$

gdzie

- T, T_M, T_G - temperatura pary metalu, spalin,
- W - prędkość pary,
- α, α_G - współczynnik wnikania ciepła, od rury do pary i od spalin do rury,
- C, C_M - ciepło właściwe pary przy stałym ciśnieniu i ciepłownościowe metalu rury,
- U, U_G - obwód rury: od strony pary i od strony gazu (zewnątrzny),
- A, A_M - pole powierzchni przekroju rury, którym przepływa para i pole powierzchni przekroju metalu rury,
- ρ, ρ_M - gęstość pary i metalu rury.

Traktowanie przegrzewacza pary jako obiektu o stałych skupionych jest dużym uproszczeniem niechętnie stosowanym przez wielu badaczy, niemniej na podstawie badań przeprowadzonych przez Ennsa [12] uważa się, że dokładność takiego przybliżenia jest zadowalająca przy modelowaniu całości bloku.

2.2. Metody modelowania elementów pojemnościowych

Najważniejszym elementem pojemnościowym w układzie cieplnym kotła jest walczak, którego model matematyczny został sformułowany przez Szumską [8]. Ze względu na swą prostotę model ten stosowany jest w większości znanych pracach. Model opiera się na równaniach bilansu masyowego i energetycznego wytwornicy pary, złożonej z walczaka, rur opadowych i rur wznoszących, traktowanej jako obiekt o stałych skupionych.

Równanie bilansu masowego walczaka:

$$\dot{m}_W - \dot{m}_D = \frac{d}{dt} (V' \rho' + V'' \rho'')$$

Równanie bilansu cieplnego wytwornicy pary

$$\dot{m}_W h_W + \dot{Q}_W - \dot{m}_D h'' = \frac{d}{dt} (V' \rho' h' + V'' \rho'' h'' + C_{M,M,T,M})$$

gdzie

\dot{m}_W, \dot{m}_D - strumień wody zasilającej i strumień pary z kotła,

V', V'' - objętość wody i pary w wytwornicy w stanie nasycenia,

ρ', ρ'' - gęstość wody i pary w stanie nasycenia,

h_W, h', h'' - entalpia wody i pary w stanie nasycenia,

$C_{M,M,T,M}$ - ciepło właściwe, masa metalu i temperatura metalu w wytwornicy pary.

Niektórzy autorzy np. Chorowski [13] uzupełniają równania Szumskiej wzorami uwzględniającymi zawartość pęcherzyków pary w wodzie i w ten sposób uzyskują większość zgodność modelu matematycznego.

Z dużej ilości stosowanych założeń upraszczających najistotniejsze jest przyjęcie stanu równowagi termodynamicznej w włączaku między wodą a parą. Założenie takie w istotnym stopniu upraszcza opis, lecz jest ono niesłuszne szczególnie podczas zmian ciśnienia w walczaku. W pracy [1] podano, że przy zmianach ciśnienia, zależnie od przyjętego stanu termodynamicznego wody i pary, szybkość wypływu pary może się różnić prawie pięciokrotnie. Nie podano jednak żadnych wytycznych odnośnie rozwiązania tego zagadnienia. Zagadnienie to zostało matematycznie opracowane dla stabilizatora ciśnienia w elektrowniach atomowych przez Nahavandiego [14].

2.3. Zagadnienia wymiany ciepła

Proces wymiany ciepła zarówno w komorze paleniskowej jak i w części konwekcyjnej kotła dla stanu ustalonego opisany jest z zadowalającą dla praktyki projektowej dokładnością. Ponieważ pojemność cieplna

spalin jest znacznie mniejsza od pojemności cieplnych powierzchni ogrzewalnych, przez które przepływa woda lub para, uzasadnione jest więc pominięcie akumulacji ciepła w spalinach. W większości prac dotyczących dynamiki kotła proces wymiany ciepła w komorze paleniskowej opisywany jest równaniami opartymi na prostej i łatwej w stosowaniu metodzie Wohlenberga. Ponieważ w kraju obliczenia cieplne kotłów przeprowadzane są według metody Gurwicza [9], więc wskazane jest przystosowanie tej metody do obliczeń dynamicznych. Próbę takiego przystosowania metody Gurwicza do obliczeń dynamicznych podano w opracowaniu Chorowskiego [13]. Stosowanie różnych wzorów do obliczeń wymiany ciepła w stanie ustalonym i stanie nieustalonym prowadzi do rozbieżności charakterystyk statycznych komory paleniskowej. Dla uniknięcia tej rozbieżności, proponuje się wielokrotne liczenie wymiany ciepła w komorze paleniskowej według powszechnie stosowanych wzorów, np. metodą Gurwicza przy różnych wartościach wielkości wejściowych. Wielkościami wyjściowymi są: strumień ciepła oddany przez promieniowanie \dot{Q}_{pr} i temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej v'' . Wielkości te zależą od strumienia paliwa \dot{B} , powietrza \dot{V}_L , wartości opałowej paliwa W_d , temperatury powietrza v_L

$$\dot{Q}_{pr} = \dot{Q}_{pr}(\dot{B}, W_d, \dot{V}_L, v_L)$$

$$v'' = v''(\dot{B}, W_d, \dot{V}_L, v_L)$$

Dla przyrostów w otoczeniu punktu pracy otrzymamy:

$$\Delta \dot{Q}_{pr} = \frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial \dot{B}} \Delta \dot{B} + \frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial W_d} \Delta W_d + \frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial \dot{V}_L} \Delta \dot{V}_L + \frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial v_L} \Delta v_L$$

pochodne: $\frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial \dot{B}}, \dots, \frac{\partial \dot{Q}_{pr}}{\partial v_L}$ można będzie obliczyć numerycznie na podstawie obliczeń statycznych jako stosunek odpowiednich przyrostów. Wymiana ciepła między spalinami i rurami przegrzewaczy lub podgrzewaczy wody opisywana jest [7] przeważnie wzorami o postaci

$$\dot{Q}_g = \text{stała} \cdot \dot{m}_g^{0,6} (v_g'' - v_m'')$$

gdzie

\dot{m}_g - przepływ masowy strumienia gazu,
 $t_g^* - t_m^*$ - różnica temperatur między gazem a ścianką rury metalowej

Wymianę ciepła między strumieniem pary i metalem rury opisuje wzór

$$\dot{Q}_p = \text{stała} \cdot \dot{m}_p^{0,8} (t_m^* - t_p^*)$$

gdzie

\dot{m}_p - strumień pary,
 t_p^* - temperatura pary.

Wzory te mające jednakową budowę, różnią się jedynie wykładnikiem potęgowym.

3. Metody obliczeniowe

Zadaniem metod obliczeniowych jest rozwiązanie układów równań różniczkowych zwykłych i cząstkowych w celu uzyskania odpowiednich informacji o własnościach statycznych i dynamicznych modelowanego układu cieplnego. Dzięki swojej przejrzystości i łatwości interpretacji metody obliczeniowe charakterystyk czasowych znalazły szczególnie szerokie zastosowanie.

3.1. Metody obliczeniowe charakterystyk czasowych

Do obliczania charakterystyk czasowych można stosować maszyny analogowe lub cyfrowe. Technika analogowa ma wiele zalet. Pczwala w krótkim czasie uzyskać przebiegi czasowe wszystkich interesujących sygnałów. Istnieją możliwości modelowania pewnych elementów nieliniowych. Można badać nie tylko sam obiekt, lecz sprzężone z nim układy regulacji, tworzyć układy mieszane złożone z modelu analogowego obiektu i rzeczywistych regulatorów. Istnieją możliwości sprzężenia modelu obiektu z obiektem rzeczywistym i porównania odpowiadających sobie sygnałów. Zasadniczą wadą techniki analogowej jest ograniczenie rzędu równań dających się modelować wynikające z niestabilności zbyt rozbudowa-

nych układów oraz trudności technicznych związanych z możliwością zamodelowania tak dużych układów jak np. blok energetyczny.

Obliczanie charakterystyk czasowych na maszynie cyfrowej wymaga dyskretyzacji czasu oraz miejsca w wypadku rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych.

Technika cyfrowa jest elastyczniejsza pod względem możliwości wykonania różnorodnych obliczeń przy czym dokładność obliczeń w zasadzie może być dowolnie wysoka. Pewnym ograniczeniem współczesnej techniki cyfrowej dla modelowania dużych układów jest w niektórych przypadkach niemożliwość otrzymania wyników obliczeń w czasie rzeczywistym. Większość powszechnie dostępnych maszyn cyfrowych to maszyny o małej pamięci, skąd może wynikać również pewne ograniczenie rzędu rozwiązywanych układów równań modelu matematycznego bloku.

Maszyny cyfrowe mogą być wykorzystane zarówno do wstępnego opracowania danych i przedstawienia ich w dogodnej formie do dalszego wykorzystania, jak również do modelowania układów w zapisie równań stanu przedstawionych w formie macierzowej [7]. Dalsze możliwości w zakresie modelowania otwierają maszyny hybrydowe. Od strony czysto matematycznej ułatwiają one rozwiązywanie układów równań różniczkowych cząstkowych, przy modelowaniu zapewniają możliwość badania stanów nieustalonych łącząc zalety maszyn analogowych i cyfrowych [15].

3.2. Obliczanie charakterystyk częstotliwościowych

W wielu pracach [2],[6] można zaobserwować przejście w badaniach modelowych na zastosowanie metod częstotliwościowych. Obliczanie przeprowadzane na maszynie cyfrowej przy dyskretyzacji wartości częstotliwości są łatwiejsze i nie prowadzą do niestabilności obliczeniowej, ponieważ podczas obliczania nie występuje zjawisko akumulowania się błędów obliczeniowych. Każda wartość amplitudy i fazy dla danej częstotliwości obliczana jest oddzielnie. Natomiast podczas obliczania kolejnych wartości charakterystyk czasowych korzystamy z wartości zmienionych w poprzedzającym punkcie czasu. Najczęściej prowadzi to, szczególnie przy obliczaniu zamkniętych w sobie układów technologicznych, do niestabilności obliczeniowych lub zmusza do przyjęcia bardzo małych przyrostów czasu, zwiększając czas i koszt liczenia.

Na zakończenie należy podkreślić, iż charakterystyki częstotliwościowe są wygodniejsze do przeprowadzenia analizy obiektu, szczególnie w sprawach dotyczących stabilności układu. Z charakterystyki częstotliwościowej można obliczyć charakterystykę czasową.

4. Wnioski

Mimo ukazania się wielu prac dotyczących modelu układu cieplnego bloku istnieje wiele zagadnień wymagających rozwiązania bądź bardziej wnikliwego i wszechstronnego opracowania.

- W opublikowanych pracach istnieje duża dowolność w wyborze wektora stanu i związanego z nim układu równań różniczkowych oraz przyjmowanych założeń upraszczających, zachodzi więc potrzeba opracowania kryterium wyboru wektora stanu, postaci przyjętych równań różniczkowych i założeń upraszczających.
- Większość prac poświęcona jest modelowaniu poszczególnych fragmentów układów cieplnych. Potrzebne są badania nad opracowaniem jednolitego i uniwersalnego modelu bloku przydatnego do opracowywania różnorodnych zagadnień.
- Wcześniejsze prace nad modelem matematycznym bloku nastawione były na posługiwanie się techniką analogową, nowsze prace opierają się na technice cyfrowej. W dalszej perspektywie planuje się stosowanie maszyn hybrydowych, należy więc prowadzić badania nad przystosowaniem struktury układu równań modelu bloku do korzystania z najnowszych środków techniki obliczeniowej jak również nad opracowaniem optymalnych algorytmów liczenia.
- Prace teoretyczne nad modelem matematycznym bloku mogą przyczynić się do postępu technicznego w energetyce i przynieść konkretne korzyści ekonomiczne tylko wówczas, gdy będą opierać się na wykorzystaniu najnowszych osiągnięć współczesnej techniki obliczeniowej.

LITERATURA

- [1] Electricité de France - Service des Études et Recherches Nucleaires, Thermiques et Hydrauliques: Deportement Mecanique Theorique. Mai 1967.
- [2] Ober J. - Beitrag zur Systembeschreibung von Kreislaufen in Kernkraftwerken. Dissertation TH Magdeburg 1971.
- [3] Ober J. - Entropie als Zustandsvariable bei der Beschreibung von Kraftwerksprozessen. IFK-Information Vetschau H.58/1972.
- [4] Haase R. - Thermodynamik der irreversiblen Prozesse. Dr Dietrich Steinkopf Verlag Darmstadt 1963 r.
- [5] Nahavandi A.N., van Hallen R. - A Space - Dependent Dynamic Analysis of Boiling Water Reactor Systems, Nuclear Science and Engineering 20. 1964.
- [6] Itoh K, Fujii M., Ohno H, Sagora K. - Comparison of Dynamics Between Natural Circulation Boiler and Forced Circulation Boiler. IV Kongres IFAC Warszawa 1969.
- [7] Kwan H.W., Anderson J.M. - A mathematical model of a 200 MW boiler. J. Control 1970 r. vol. 12 N^o 6 s. 977-998.
- [8] Szmuskaja L.S. - Osnownyje regulirujemyje parametry barabannykh kotłków pri niestacjonarnych režimach. Zbiór artykułów - Gosenergoizdat 1961 r.
- [9] Rakowski J., Wąglowski S., Duda M. - Opracowanie modelu matematycznego kotła OP-230. Opracowanie Instytutu Energetyki Nr 5004 Warszawa 1965 r.
- [10] Berlemont V., Debelle J., Fourcau A., Vazquez R., Waba J. - Modele mathematique d'une chaudière a ballon.
- [11] Mason Peter, B.S.C., and Philip H. Price, B.Sc, Ph. D. - THE DESIGN OF AN ECONOMICAL REAL TIME SIMULATOR OF A TWO PHASE HEAT EXCHANGER" 5th International analogue computation mesings.
- [12] Enns M. - Comparison of Dynamic Models of a Superheater. Transactions of ASME - Journal of Heat Transfer - November 1962.str.375-385.
- [13] Chorowski B., Piksa A. - Opracowanie teoretyczne z podaniem jednolitych metod obliczeń dynamiki kotłków. Protokół Nr 12/68. Maszynopis opracowany na zlecenie CBKK Tarnowskie Góry.
- [14] Amir N. Nahavandi and Surech Makkenchery: "AN IMPROVED PRESSURIZER MODEL WITH BUBBLE RISE AND CONDENSATE DROP DYNAMICS" Nuclear Engineering and Design 12 (1970) 135-147. North-Holand Publishing Company.

- [15] Albrecht P. - Zur Lösung Linearer partieller Differential- gleichungen mittels moderner Rechenanlagen Elektron. Rechenanlagen 10 (1968) H.G.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 roku.

СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВОЙ СИСТЕМЫ ПАРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Р е з ю м е

В статье представляются главные направления исследований при составлении математической модели энергетического оборудования в паровой электростанции. Рассматриваются вопросы выбора переменных состояния, линеаризации уравнений и методов расчёта.

STATE OF DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODELLING DYNAMIC BEHAVIOUR OF THE HEAT TRANSFER SYSTEMS IN CONVENTIONAL ELECTRICAL PLANTS

S u m m a r y

The article presents the main directions of elaboration of a mathematical model of the heat dynamis systems in conventional electrical plants.

The problems of state variables, linearisation of equations and methods of calculations have been discussed.