

Weryfikacja modelu matematycznego parownika kotła BP-1150, do celów sterowania

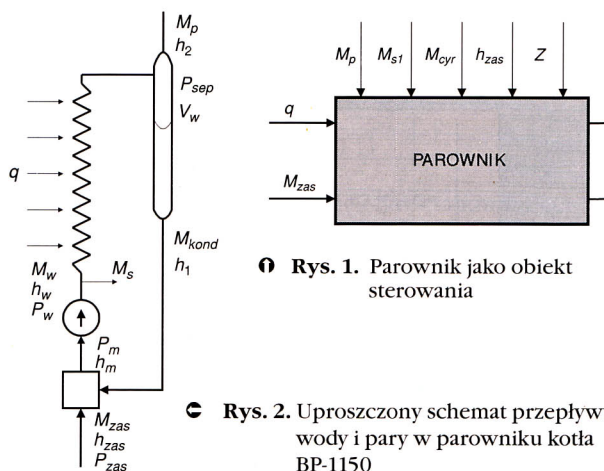
Waldemar Minkina
Włodzimierz Stanisławski

W 1995 r. Polski System Energetyczny został przyłączony do systemów zachodnioeuropejskich, zjednoczonych w UCPE (Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité). Uzyskanie zalecanych przez UCPE szybkości zmian mocy, rozruchów, zrzutów w obecnym stanie krajowych bloków jest raczej nieosiągalne ze względu na ograniczenia po stronie kotła. Aby osiągnąć zalecane szybkości, należy wykorzystać do maksimum możliwości dynamiczne i technologiczne kotła za pomocą odpowiednio zaprojektowanych układów regulacji, organów regulacyjnych i nastawczych. Rozwiązanie tego problemu jest możliwe w oparciu o komputerowe modele symulujące pracę kotłów parowych w stanach nieustalonych. Modele te muszą być adekwatne w szerokim zakresie obciążeń (40-100 % Pzn) [1, 2].

Poddano analizie możliwości weryfikacji pomiarowej nieliniowego modelu matematycznego parownika przepływowego kotła BP-1150 na podstawie danych pomiarowych, uzyskanych w trakcie normalnej eksploatacji bloku energetycznego nr 1 w Elektrowni OPOLE. W artykule przedstawiono jedynie wyniki końcowe.

Parownik kotła BP-1150

Rys. 1 przedstawia uproszczony schemat przepływu wody i pary w parowniku kotła BP-1150. W kotle zastosowano pompę cyrkulacyjną zapewniającą stały przepływ wody i mieszaniny parowo-wodnej przez parownik. Pionowe rury parownika mają długość około 60 m i są zasilane z kolektora pierścieniowego, natomiast mieszanina parowo-wodna wypływa do wodooddzielacza z kolektora górnego. Wodooddzielacz jest pionowym cylindrycznym zbiornikiem o średnicy ok. 0,8 m i długości ok. 34 m. Przez parownik przepływa czynnik roboczy przepływa w wielu równoległych rurach (1344 rury pionowe) połączonych kolektorami dolnym i górnym.



⊙ Rys. 1. Parownik jako obiekt sterowania

⊙ Rys. 2. Uproszczony schemat przepływu wody i pary w parowniku kotła BP-1150

Przyjęto następujące oznaczenia podstawowych wielkości w parowniku:

M_{zas} , h_{zas} , P_{zas} – strumień masy, entalpia, ciśnienie wody zasilającej parownik,

M_w , h_w , P_w – strumień masy, entalpia, ciśnienie wody na wlocie do rur parownika,

P_m , h_m – ciśnienie, entalpia wody w mieszalniku,

M_p , h_2 – strumień masy, entalpia pary na wylocie z separatora,

M_{kond} , h_1 – strumień masy, entalpia kondensatu na wylocie z separatora,

P_{sep} , V_w – ciśnienie pary, objętość wody w separatorze,

M_{s1} – strumień masy wody przepływającej do schładzaczy pary świeżej,

M_{cyr} – strumień masy wody przepływającej przez pompę cyrkulacyjną,

H_{sep} – poziom wody w separatorze,

q – strumień ciepły dopływający do rur parownika.

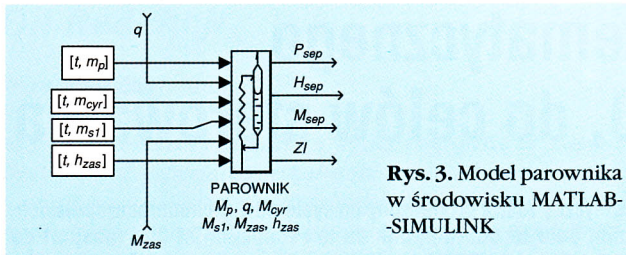
Na rys. 2 przedstawiono parownik jako obiekt sterowania z dwoma wielkościami wyjściowymi: P_{sep} oraz H_{sep} , dwoma wielkościami wejściowymi: q i M_{zas} , oraz wielkościami zakłócającymi: M_p , M_{s1} , M_{cyr} , h_{zas} , Z (inne zakłócenia).

Model matematyczny i symulacyjny kotła BP-1150

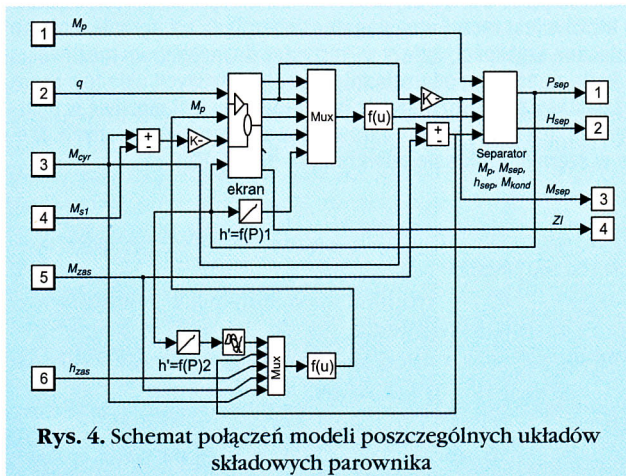
Parownik przepływowy jest układem o parametrach rozłożonych, opisanym układem równań różniczkowych cząstkowych. W celu umożliwienia symulacji parownika przy użyciu pakietu MATLAB-SIMULINK zastosowano dyskretyzację zmiennej przestrzennej, przez podział rury parownika wzdłuż jej długości na znaczną liczbę sekcji. Długość każdej sekcji jest na tyle mała, aby można było założyć, że każda z nich jest układem dynamicznym o parametrach skupionych, opisanym układem równań różniczkowych zwyczajnych [1].

Dr hab. inż. Waldemar Minkina – profesor nadzwyczajny Politechniki Częstochowskiej; kierownik Zakładu Technik Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej, autor i współautor ok. 50 publikacji i kilku patentów. Jest członkiem Komisji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej oraz Stowarzyszenia Elektryków Polskich, gdzie jest rzeczoznawcą w trzech grupach.

Dr inż. Włodzimierz Stanisławski jest pracownikiem Katedry Automatyki, Elektroniki i Informatyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Jest autorem i współautorem 33 publikacji (w tym 5 zagranicznych).



Rys. 3. Model parownika w środowisku MATLAB-SIMULINK

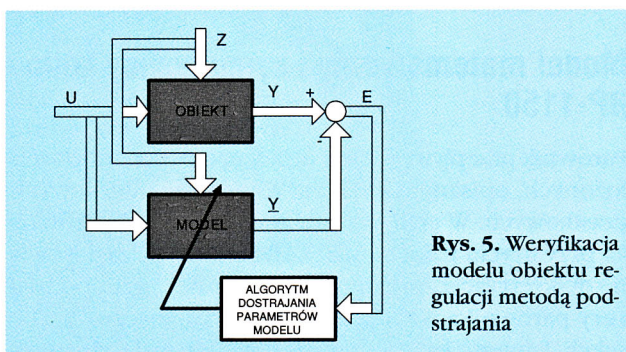


Rys. 4. Schemat połączeń modeli poszczególnych układów składowych parownika

Model skonstruowany jest hierarchicznie [3]. Na rys. 3 przedstawiono schemat modelu całego parownika. Po rozwinięciu bloku o nazwie PAROWNIK uzyskuje się schemat połączeń modeli poszczególnych układów składowych (rys. 4). Postępując w ten sposób dochodzi się do modeli opisujących podstawowe zjawiska w rurach parownika, separatorze itd.

Weryfikacja modelu

Ogólna idea weryfikacji nieliniowych modeli obiektów metodą podstrajania oparta jest na następującym sposobie postępowania [4, 5] (rys. 5):



Rys. 5. Weryfikacja modelu obiektu regulacji metodą podstrajania

- podanie na wejście modelu symulacyjnego sygnałów zarejestrowanych w rzeczywistym obiekcie;
- na podstawie różnic sygnałów wyjściowych obiektu i modelu dostrajanie parametrów modelu tak, aby różnice były możliwie najmniejsze.

Tej ogólnej idei nie można jednak bezpośrednio zastosować do parownika, ponieważ parownik objęty jest sprzężeniami zwrotnymi przez układy regulacji (układ regulacji zasilania oraz układ regulacji ciśnienia pary wchodzący w skład znacznie bardziej rozbudowanego

układu regulacji obciążenia bloku). Strukturę układów regulacji przedstawiono na rys. 7. Funkcjonowanie układów regulacji podczas rejestracji danych pomiarowych w istotny sposób utrudnia weryfikację modelu.

Dane pomiarowe niezbędne do weryfikacji modelu symulacyjnego parownika kotła BP-1150 uzyskano z systemu cyfrowej, centralnej rejestracji danych, funkcjonującego w bloku nr 1 Elektrowni Opole. Błędy pomiarowe poszczególnych wielkości nie przekraczają 2%. Minimalny okres próbkowania w systemie rejestracji wynosi 1 s. Okres próbkowania przyjęto na podstawie analizy gęstości widmowej mocy sygnałów zarejestrowanych przy okresie próbkowania 1 s (rys. 6).

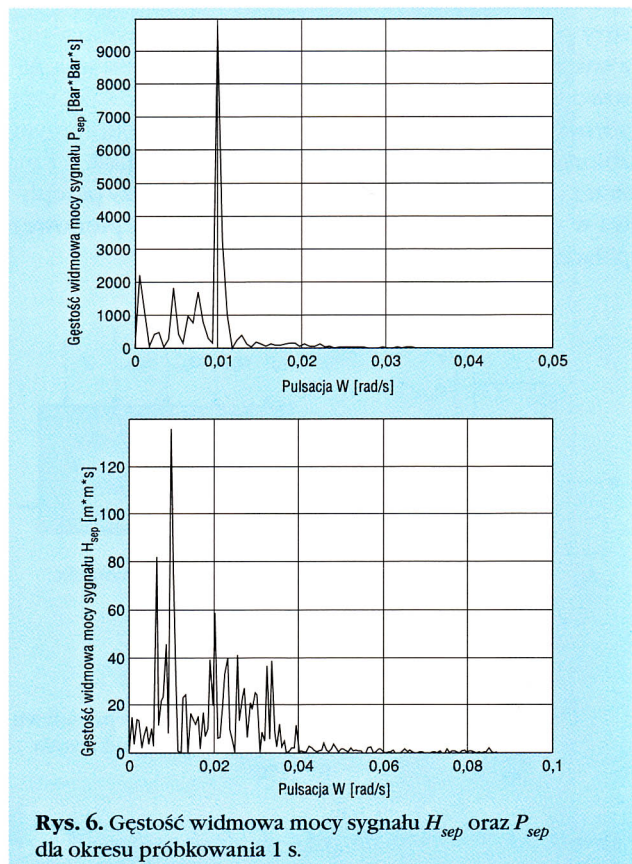
W oparciu o uzyskane gęstości widmowe mocy przyjęto okres próbkowania $\Delta\tau = 3$ s, co daje częstotliwość Nyquista:

$$\omega = \frac{\pi}{\Delta\tau} \cong 1 \text{ [1/s]}$$

Częstotliwość ta jest o rząd większa od maksymalnej częstotliwości w widmach zarejestrowanych sygnałów.

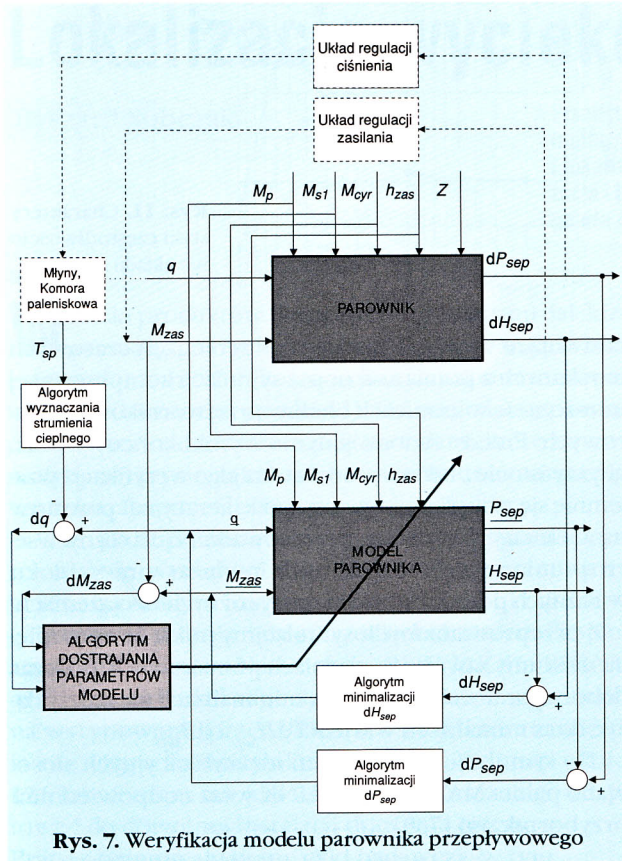
Ze względu na trudności związane z weryfikacją modelu symulacyjnego parownika według rys. 5, zaproponowano następującą metodę weryfikacji.

Do modelu parownika doprowadza się zarejestrowane zakłócenia z obiektu ($M_p, M_{s1}, M_{cyr}, h_{zas}$), oraz na podstawie różnic $dP_{sep} = P_{sep} - \underline{P}_{sep}$ i $dH_{sep} = H_{sep} - \underline{H}_{sep}$ wyznacza się symulacyjnie (na podstawie modelu) strumień



Rys. 6. Gęstość widmowa mocy sygnału H_{sep} oraz P_{sep} dla okresu próbkowania 1 s.

ciepła q oraz strumień masy wody zasilającej M_{zas} , dla których dP_{sep} i dH_{sep} są możliwie najmniejsze. Uzyskuje się w ten sposób informację o tym, jakie powinny być q oraz M_{zas} , aby przebiegi \underline{P}_{sep} i \underline{H}_{sep} były takie same jak



Rys. 7. Weryfikacja modelu parownika przepływowego

w obiekcie rzeczywistym. W następnej kolejności porównuje się przebiegi M_{zas} i $\overline{M_{zas}}$ oraz q i \overline{q} (rys. 7). Układ weryfikacji z rys. 7 można także rozpatrywać jako układ nadążny, w którym sygnały wyjściowe modelu P_{sep} oraz H_{sep} nadążają za sygnałami wyjściowymi obiektu. Błędy średniokwadratowe dla poszczególnych wielkości wyjściowych mają następujące wartości:

$$\Delta H_{sep} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (H_{sep} - \overline{H_{sep}})^2} \cong 0,2 \text{ m},$$

$$\delta H_{sep} \cong 1,5 \%,$$

$$\Delta P_{sep} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (P_{sep} - \overline{P_{sep}})^2} \cong 20 \text{ kPa}$$

$$\delta P_{sep} \cong 0,1 \%$$

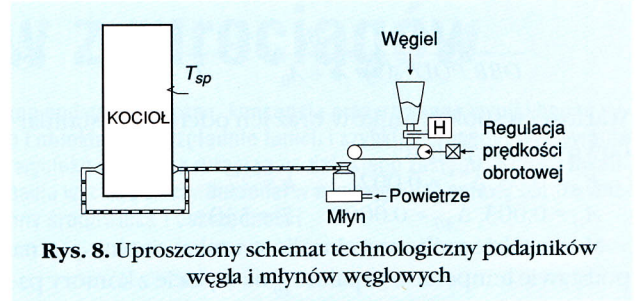
Strumień cieplny $q_w(z, t)$ jest wielkością niemierzalną, a jego wartość można określić jedynie w sposób pośredni. Przyjęto, że strumień cieplny dopływający do rur parownika określony jest następująco:

$$q_w(z, t) = q(t) * q_z(z) \quad (2)$$

gdzie: $q_z(z)$ – rozkład strumienia cieplnego wzdłuż rur parownika w stanie ustalonym [kW/m], przyjęty na podstawie projektu technicznego kotła, $q(t)$ – względna wartość strumienia cieplnego. Wartość $q(t)$ można wyznaczyć w dwojaki sposób:

- na podstawie czasowego przebiegu prędkości podajników węgla OBR. POD. %,
- na podstawie czasowego przebiegu temperatury spalin na wylocie z komory paleniskowej T_{sp} .

Uproszczony schemat technologiczny podajników węgla oraz młynów węglowych przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Uproszczony schemat technologiczny podajników węgla i młynów węglowych

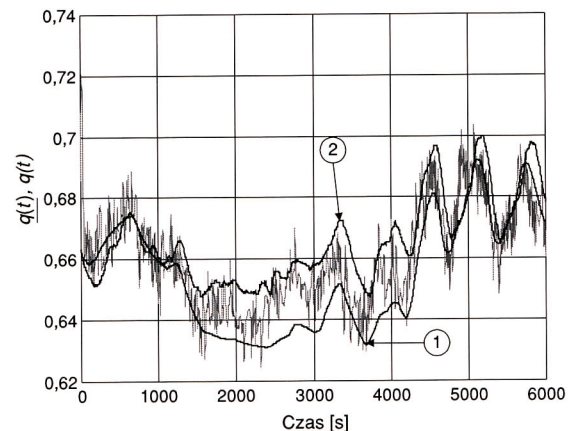
Przyjęto następujące właściwości dynamiczne układu:

$$OBR. POD. \% \Rightarrow q(t): \frac{q(s)}{OBR.POD\%(s)} = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (3)$$

Parametry powyższej transmitancji – k , T , oraz τ wyznaczono w drodze minimalizacji następującego wyrażenia:

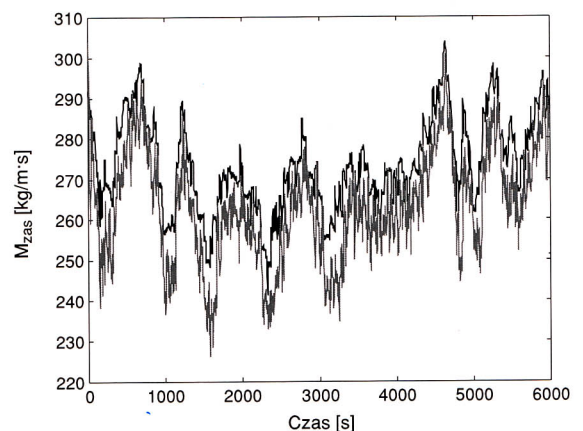
$$W = \sum_{i=1}^N [q(i) - \underline{q}(i)]^2 \quad (4)$$

$W_{min} = 0,17$ uzyskano dla $k = 1/47$, $T = 310 \text{ s}$, $\tau = 50 \text{ s}$. Średni błąd kwadratowy wynosi w tym przypadku $\Delta = 0,009$ ($\delta \cong 1,3 \%$). Na rys. 9 porównano przebiegi $q(t)$ oraz $\underline{q}(t)$ (linia ciemna nr 1).



Rys. 9. Porównanie przebiegów $q(t)$ (linia jasna), oraz przebiegów $q(t)$ wyznaczonych na podstawie: (1) - prędkości obrotowej podajników węgla, (2) - temperatury spalin

Nieco różniące się wartości uzyskano, stosując metody identyfikacyjne dla układu $OBR. POD. \% \Rightarrow T_{sp}$, przy założeniu modelu ARX [4, 5, 6]:



Rys.10. Porównanie przebiegów M_{zas} oraz $\overline{M_{zas}}$ (linia ciemna) uzyskanych z pomiarów oraz symulacji

$$\frac{T_{sp}(s)}{OBR.POD\%(s)} = \frac{B_0}{s + A_0} e^{-79s} = \frac{k}{Ts + 1} e^{-79s} \quad (5)$$

Wartości współczynników oraz ich odchylenia standardowe są następujące:

$$B_0 = 0,08, \Delta_{B_0} = 0,002, \quad k = 27$$

$$A_0 = 0,003, \Delta_{A_0} = 0,0002 \quad T = 330 \text{ s}$$

Można także próbować określić strumień ciepły $q(t)$ na podstawie temperatury spalin T_{sp} na wylocie z komory paleniskowej. Przy najprostszym założeniu, że strumień ciepły jest proporcjonalny do T_{sp} , $q(t) = k \cdot T_{sp}$, można wyznaczyć współczynnik k , minimalizując wyrażenie (4). Uzyskano na tej podstawie $k = 1/1200 [1/K]$ oraz $W_{min} = 0,21$.

Na rys. 9 porównano przebiegi $q(t)$ oraz $q(t)$ uzyskane tą metodą (linia ciemna nr 2).

Na rys. 10 podano przebieg różnicy $dM_{zas} = M_{zas} - \underline{M}_{zas}$ strumieni masy wody zasilającej wyznaczonego z pomiarów M_{zas} [kg/s] oraz wyznaczonego na podstawie modelu \underline{M}_{zas} . Widoczna jest znaczna (ok. 10 kg/s – 4 %) różnica wartości średnich obydwu przebiegów. Z danych pomiarowych wynika, że przepływy nie bilansują się w okresie rejestracji. Może to mieć związek z błędami systematycznymi przetworników pomiarowych oraz ubytkami wody w obiegu wodnym parownika. Po usunięciu różnicy wartości średnich w przebiegach M_{zas} oraz \underline{M}_{zas} , uzyskano błąd średniokwadratowy:

$$\Delta M_{zas} = \sqrt{\sum \frac{1}{N} (M_{zas} - \underline{M}_{zas})^2} = 5,6 \text{ kg/s}, \delta M_{zas} \cong 2 \% \quad (6)$$

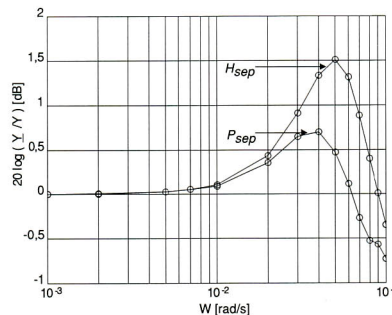
Bardzo istotna dla właściwej weryfikacji modelu parownika jest dokładność działania algorytmów minimalizacji dH_{sep} oraz dP_{sep} . W celu wyznaczenia błędów dynamicznych, wprowadzanych przez „układ nadążny” – model parownika, algorytmy minimalizacji dH_{sep} i dP_{sep} – wyznaczono na drodze eksperymentu symulacyjnego następujące charakterystyki częstotliwościowe, określające „błąd nadążania” w funkcji pulsacji:

$$G_H(j\omega) = \frac{\Delta H_{sep}(j\omega)}{\Delta H_{sep}(j\omega)}, \quad G_P(j\omega) = \frac{\Delta P_{sep}(j\omega)}{\Delta P_{sep}(j\omega)} \quad (7)$$

Charakterystyki te przedstawiono na rys. 11. Wynika z nich, że dla małych częstotliwości sygnały H_{sep} oraz P_{sep} są równe odpowiednio H_{sep} i P_{sep} , a błędy dynamiczne weryfikacji dla tych częstotliwości są zerowe. Porównanie widm sygnałów H_{sep} i P_{sep} (rys. 6) oraz charakterystyk częstotliwościowych z rys. 11 wskazuje, że błędy dynamiczne weryfikacji modelu parownika są pomijalne. Na dowód tego na rys. 12 porównano gęstości widmowe mocy sygnałów H_{sep} oraz \underline{H}_{sep} .

Wnioski

Zaproponowano metodę weryfikacji nieliniowego modelu matematycznego parownika kotła BP-1150, która może być zastosowana do obiektu, w którym funkcjonują układy regulacji, tworzące pętle sprzężeń zwrotnych wokół obiektu. Do weryfikacji modelu nie jest potrzebna znajomość charakterystyk układów sprzężeń zwrotnych, które w przypadku kotła są bardzo skomplikowane. Przedstawioną metodę zastosowano praktycznie, uzyskując za-

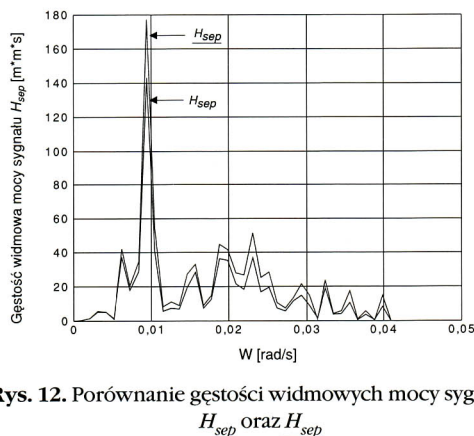


Rys. 11. Charakterystyki częstotliwościowe układu $H_{sep} \Rightarrow H_{sep}$

dowalające wyniki. Różnice w przebiegach czasowych uzyskanych z pomiarów oraz z symulacji komputerowej mieszczą się w granicach błędów przetworników pomiarowych. Przedstawiono jedynie wyniki końcowe prac, gdyż w istocie budowa modelu oraz jego weryfikacja wzajemnie się przeplatają tworząc „pętlę iteracyjną” powtarzaną wiele razy. Weryfikację przeprowadzano dla różnych serii pomiarowych, uzyskanych podczas pracy bloku w różnych porach doby, oraz przy różnych obciążeniach.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że ze względu na szumy zawarte w sygnałach pomiarowych, podczas doboru parametrów układów minimalizacji nie należy dążyć do minimalnych wartości dH_{sep} i dP_{sep} .

Do symulacji oraz obliczeń identyfikacyjnych stosowano pakiet MATALB-SIMULINK wraz z odpowiednimi przyborkami [7, 8].



Rys. 12. Porównanie gęstości widmowych mocy sygnałów H_{sep} oraz \underline{H}_{sep}

Bibliografia

- [1] Stanisławski W.: Modelowanie i symulacja parownika przepływowego dla celów sterowania z zastosowaniem pakietu MATALB-SIMULINK. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Elektryka z. 45, 1997.
- [2] Stanisławski W.: Modelling and Simulation of a Once-Through Steam Generator of the BP-1150 Boiler for Control Purposes Using MATALB-SIMULINK. Aktualne Problemy w Energetyce, Gdańsk-Jurata, 11-13 czerwca 1997.
- [3] Stanisławski W., Imaev D.: Hierarchical Approach to the Steam Boiler Modelling and Simulation. 12th European Simulation Multiconference. Simulation: Past, Present, and Future. 16-19 czerwca 1998.
- [4] Janiszowski K.: Podstawy wyznaczania opisu i sterowania obiektów dynamicznych. Warszawa 1991 Wyd. Politechniki Warszawskiej.
- [5] Soderstrom T., Stoica P.: Identyfikacja systemów. Warszawa 1997 PWN.
- [6] Bielińska E. i in.: Identyfikacja procesów. Gliwice 1997 Wyd. Politechniki Śląskiej.
- [7] L. Ljung : System Identification Toolbox for Use with MATALB; The MathWorks, Inc. 1991.
- [8] J.N. Little, L. Shure: Signal Processing Toolbox for Use with MATALB; The MathWorks Inc. 1992.

ABSTRACTS

Verification of steam boiler BP-1150 mathematical model for control purposes.

Waldemar Minkina, Włodzimierz Stanisławski – p. 7

Analysis of non-linear mathematical model of steam boiler BP-1150 is presented. The results of verification based on data taken during ordinary exploitation of steam boiler at electric power plant OPOLE is shown.