

**Mariusz PAWLAK**

INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ W ŁODZI

## Diagnostyka torów pomiarowych i urządzenia wykonawczego w układzie regulacji turbiny kondensacyjnej

Dr inż. Mariusz PAWLAK

adiunkt w Zakładzie Automatyki Instytutu Techniki Ciepłej w Łodzi. W 1993 ukończył studia o kierunku Energetycznym na Politechnice Łódzkiej. Tytuł doktora uzyskał w 2002 r. na Politechnice Warszawskiej. Zainteresowania: układy sterowania, zastosowania technik sztucznej inteligencji do modelowania, diagnostyka układów sterowania.



e-mail: mar001@o2.pl

### Streszczenie

Przedstawiono układ regulacji turbiny kondensacyjnej odporny na uszkodzenia torów pomiarowych. Opisano działania układu regulacji turbiny kondensacyjnej pracującej w układzie blokowym. Zaprezentowano charakterystykę sygnałów wchodzących do regulatora i metody wykrywania uszkodzeń dla danego toru pomiarowego. Opisano zasadę działania i system diagnostyki dla urządzenia wykonawczego

**Słowa kluczowe:** układ regulacji, modelowanie rozmyte, sieci neuronowe, diagnostyka, tory pomiarowe, elementy wykonawcze.

### Diagnostic of measuring tracks and executive device in control system for condensing turbine

#### Abstract

In this paper described fault tolerant system of regulation of condensing turbine on damages of measuring - tracks. One presented characterization of signals entering to controller and methods of detecting of damages measuring - track and executive device.

**Keywords:** fault diagnosis, power control, power generation, turbines, fuzzy modeling, fault tolerant systems.

## 1. Wstęp

Układy regulacji turbin kondensacyjnych pełnią bardzo odpowiedzialne zadania sterownicze, ponieważ są zainstalowane na blokach energetycznych o dużych mocach znamionowych. Bloki te biorą udział w regulacji całego systemu elektroenergetycznego. Niepoprawna praca tak dużych jednostek odbija się na jakości pracy całego systemu elektroenergetycznego. Stany awaryjne układów regulacji turbin spowodowane są uszkodzeniami: regulatora, urządzeń wykonawczych regulatora oraz torów pomiarowych wykorzystywanych w układzie sterowania. Uszkodzenia tych torów powodują nieprawidłowe wartości sygnału sterującego a w efekcie gwałtowne zmiany mocy bloku energetycznego. Może to spowodować odstawienie awaryjne tego obiektu i znaczne straty ekonomiczne oraz zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi.

## 2. Układ regulacji turbiny kondensacyjnej

Turbiny kondensacyjne są konstruowane w celu uzyskania maksymalnej mocy elektrycznej z generatora współpracującego z turbiną w układzie blokowym (kocioł  $\Rightarrow$  turbina  $\Rightarrow$  generator). Regulator turbiny kondensacyjnej steruje zaworami turbiny podczas jej rozruchu oraz normalnej pracy bloku przy stałym i zmiennym obciążeniu. Regulacja mocy i prędkości obrotowej dokonywana jest przez oddziaływanie układu regulacji na zawory regulacyjne WP turbiny. W układzie regulacji wypracowywany jest sygnał nastawczy, który przez urządzenie wykonawcze (przetwor-

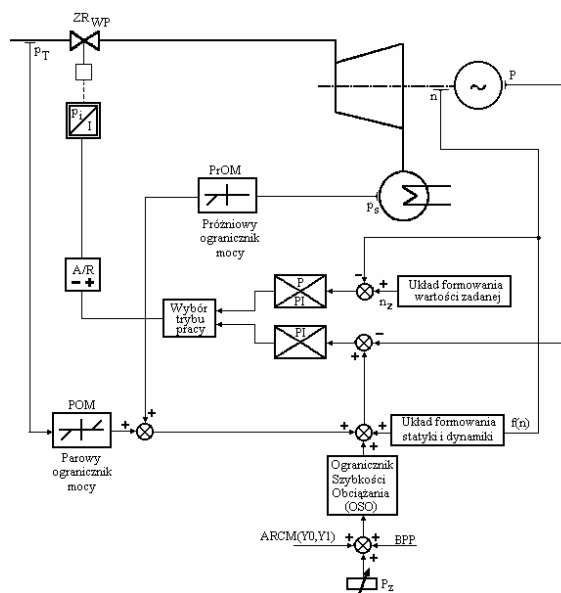
nik elektrohydrauliczny) steruje pracą zaworów. W układzie wyodrębnione są dwa tory regulacji:

- układ regulacji prędkości obrotowej,
- układ regulacji mocy.

Układ regulacji prędkości obrotowej umożliwia nabór obrotów zgodnie z zaprogramowanym gradientem wzrostu prędkości obrotowej przy uwzględnieniu pasma obrotów krytycznych oraz utrzymania obrotów zgodnie z wartością zadaną. Układ regulacji mocy po stronie wejściowej składa się z czterech torów[2, 3]:

1. Tor zadawania mocy bazowej  $P_z$ . Moc ta wprowadzana jest do układu z trzema prędkościami formowanymi przez ogranicznik szybkości obciążania OSO.
2. Tor zadawania sygnałów  $Y1$  i  $Y0$  (regulacja ARCM) oraz BPP (Bieżyący Punkt Pracy).
3. Tor odchyłek ciśnienia (POM-parowy ogranicznik mocy, PrOM - próżniowy ogranicznik mocy).
4. Tor korekcji częstotliwości, w którym kształtuje się charakterystyki: statyczną i dynamiczną regulacji pierwotnej.

Odchyłka mocy wynikająca z sumowania mocy rzeczywistej bloku P z czterema w/w sygnałami jest podawana na wejście regulatora PI, którego sygnał wyjściowy poprzez stacyjkę A/R (automatyka/sterowanie ręczne) i przetwornik elektrohydrauliczny steruje położeniem zaworów regulacyjnych turbiny. Schemat regulatora turbiny kondensacyjnej jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy układu regulacji turbiny kondensacyjnej  
Fig. 1. Diagram of condensation turbine control system

Przejmowany z regulatora centralnego sygnał BPP (Bieżyący Punkt Pracy), zastępuje sygnał mocy bazowej ustawianej przez operatora bloku zadajnikiem  $P_z$ . Praca w systemie ARCM polega na tym, że sygnał  $Y1$  zmienia moc wokół sygnału BPP.

## 3. Diagnostyka torów pomiarowych

Lista sygnałów analogowych dochodzących do układu regulacji turbiny kondensacyjnej jest przedstawiona w tabeli 1 [3]. Sygnały należy podzielić na dwie zasadnicze grupy ze względu na ich rodzaj. Takie wielkości jak sygnał BPP i sygnał mocy szybkozmiennej ( $Y1$ ) są przesyłane do układu łączami telemetrycznymi z Krajowej Dyspozycji Mocy. Wielkościami tymi jest sterowany blok w zależności od zapotrzebowania na moc systemu elektro-

energetycznego. Częstotliwość napięcia sieci elektroenergetycznej (f) wynika z aktualnego bilansu mocy w całym systemie elektroenergetycznym. Specyfika zmian i rodzaj przedstawionych wielkości wymusza stosowanie określonych metod wykrywania uszkodzeń torów pomiarowych. Należy tu wykorzystać metody detekcji oceniające poprawność odbieranego sygnału wyłącznie na podstawie analizy parametrów jednej zmiennej. Druga grupa zmiennych obiektowych, takich jak: moc bloku, ciśnienie pary, ciśnienie w skraplaczu, itp. jest odbierana bezpośrednio z obiektu, dlatego można zastosować metody kontroli związków między zmiennymi obiektowymi. Wyznaczanie residuów na bazie modeli jest najbardziej odporną na zakłócenia i wiarygodną metodą detekcji pod warunkiem, że model jest odpowiednio dokładny.

Tab. 1. Zestawienie analogowych sygnałów wejściowych dla regulatora turbiny kondensacyjnej

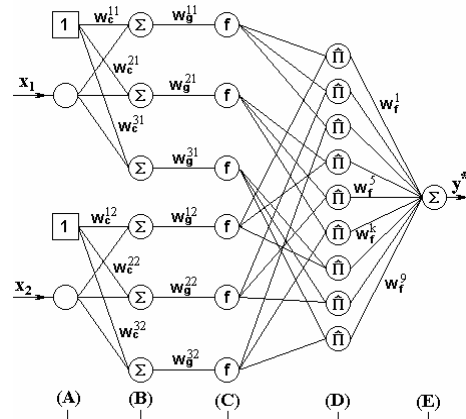
Tab. 1. Set of inputs signals for condensation power turbine

Lp.	Sygnały analogowe	Sym.	Jednostka
1	Moc bloku brutto	P	MW
2	Ciśnienie pary świeżej	$p_T$	MPa
3	Ciśnienie absolutne w skraplaczu	$p_S$	kPa (%)
4	Strumień masy pary świeżej	$m_{DT}$	t/h
5	Położenie zaworów	Y	%
6	Ciśnienie oleju impulsowego	$p_i$	MPa
7	Prędkość obrotowa turbiny	n	obr/min
8	Częstotliwość sieci el-en	f	Hz
9	Sygnał mocy wolnozmiennnej	Y0	MW
10	Sygnał mocy szybkozmiennnej	Y1	MW
11	Bieżący Punkt Pracy	BPP	MW
12	Prąd sterujący	I	mA

Redundancja informacyjna zawarta jest w związkach istniejących między zmiennymi procesowymi. Jest to zatem pewna nadmiarowość informacyjna, która może być wykorzystana w algorytmie sterowania turbiny. Współczesna technika mikroprocesorowa umożliwia budowę regulatorów turbin wyposażonych w zaawansowane algorytmy sterowania i diagnostyki. W algorytmach detekcji uszkodzeń można wykorzystać związki między zmiennymi procesowymi wprowadzanymi do regulatora turbiny [1].

Zastosowanie modeli analitycznych jest ograniczone z uwagi na trudności w uzyskaniu dokładnych stałych do równań opisujących obiekt. Dlatego alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie modeli opartych na technikach i metodach sztucznej inteligencji, szczególnie na sztucznych sieciach neuronowych oraz logice rozmytej [1] (rys. 2).

Metody wykrywania uszkodzeń torów pomiarowych dla sygnałów zewnętrznych sprowadzają się do kontroli wartości granicznych, gdyż tylko takie mogą być zastosowane do sprawdzania poprawności odczytywanych wielkości. Kontrola przekroczeń granicznych wartości zmiennych analogowych jest najprostszym sposobem wykrywania uszkodzeń, stosowanym od dawna, w mikroprocesorowych układach sterowania. W ostatnim czasie intensywnie rozwijane są metody wykorzystujące logikę rozmytą i sztuczne sieci neuronowe. W Instytucie Techniki Ciepłej w Łodzi podjęto prace zmierzające do zastosowania tych technik do wykrywania uszkodzeń torów pomiarowych w cyfrowych układach regulacji turbin. Zasada działania układu wykorzystującego model do detekcji uszkodzenia polega na uzyskiwaniu residuum w efekcie porównania wyniku sygnału modelowego z sygnałem rzeczywistym. W stanie normalnej pracy wartość tego residuum jest bliska zera. Wzrost wartości bezwzględnej residuum ponad określone granice świadczy o wystąpieniu uszkodzenia w kontrolowanym torze pomiarowym [1]. Do modelowania zmian parametrów bloku energetycznego takich jak: moc turbosespołu (P), ciśnienie pary świeżej ( $p_T$ ), ciśnienie w skraplaczu ( $p_S$ ), strumień pary świeżej ( $m_{DT}$ ), położenie zaworów (Y) i ciśnienie oleju impulsowego ( $p_i$ ), prąd sterujący (I) można wykorzystać rozmyte sieci neuronowe. Projektując model rozmyto-neuronowy wykorzystujemy wiedzę eksperta do określenia liczby reguł i rozmieszczenia funkcji przynależności poszczególnych reguł. Po zbudowaniu struktury modelu możemy przystąpić do procesu uczenia wykorzystując np. metodę wstecznej propagacji błędów.



Rys. 2. Przykład rozmytej sieci neuronowej  
Fig. 2. An example of fuzzy neural networks

Aby była możliwa generacja odpowiednich residuów w celu detekcji uszkodzenia w układzie regulacji należy znaleźć odpowiednie związki. Związki takie przedstawiono poniżej.

Generacja residuów:

$$\hat{p}_i = f(I) \rightarrow r_1 = p_i - \hat{p}_i \quad (1)$$

$$\hat{I} = f(P, p_T) \rightarrow r_2 = I - \hat{I} \quad (2)$$

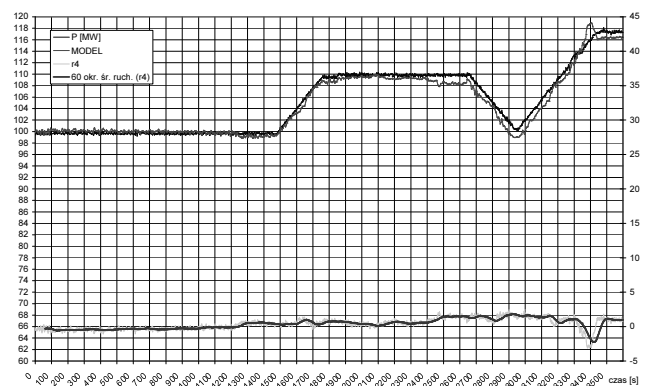
$$\hat{m}_{DT} = f(Y, p_T) \rightarrow r_3 = m_{DT} - \hat{m}_{DT} \quad (3)$$

$$\hat{P} = f(I, p_{i-1}) \rightarrow r_4 = P - \hat{P} \quad (4)$$

$$\hat{P} = f(I, p_s, p_T) \rightarrow r_5 = P - \hat{P} \quad (5)$$

$$\hat{Y} = f(p_i) \rightarrow r_6 = Y - \hat{Y} \quad (6)$$

W dalszej części artykułu zostały przedstawiono przykładowy wykresy obrazujący efekty modelowania dla opracowanych sieci. Podczas testów badano wpływ wybranych elementów na jakość uzyskanych modeli. Pod uwagę brane były różne rodzaje sygnałów wejściowych oraz różne kształty funkcji przynależności.



Rys. 3. Efekt modelowania zależności  $P=f(I, p_s, p_T)$ , gdzie: P - moc czynna, I - sygnał sterujący,  $p_s$  - ciśnienie w skraplaczu,  $p_T$  - ciśnienie pary świeżej. Funkcjami przynależności były krzywe Gaussa

Fig. 3. An example of modeling the turbine power

Na podstawie generacji zbioru residuów (1), (2), (3), (4), (5), (6) formułowana jest macierz diagnostyczna (tabela 2). Umożliwia ona lokalizację uszkodzenia i rekonfigurację struktury układu regulacji w stanach z uszkodzeniami urządzeń pomiarowych. Struktury rezerwowe dla poszczególnych uszkodzeń w miarę

możliwości powinny zapewnić zadowalającą jakość i bezpieczeństwo regulacji.

Tab. 2. Macierz diagnostyczna  
Tab. 2. Diagnostic matrix

	P	p <sub>T</sub>	p <sub>i</sub>	p <sub>s</sub>	m <sub>DT</sub>	I	Y
r <sub>1</sub>	0	0	1	0	0	1	0
r <sub>2</sub>	1	1	0	0	0	1	0
r <sub>3</sub>	0	1	0	0	1	0	1
r <sub>4</sub>	1	0	0	0	0	1	0
r <sub>5</sub>	1	1	0	1	0	1	0
r <sub>6</sub>	0	0	1	0	0	0	1

Przystępując do budowy układu regulacji dla turbiny kondensacyjnej odpornego na uszkodzenia torów pomiarowych należy określić zbiór {F} możliwych stanów funkcjonowania w przypadku uszkodzenia. Tabela 3 w sposób opisowy podaje możliwości zmiany działania układu w stanach z uszkodzeniami [4].

Tab. 3. Rekonfiguracja układu regulacji  
Tab. 3. The protection actions

Lp	Tory	Opis zmiany działania układu w stanach z uszkodzeniami
F1	p	Sterowanie bezpośrednie zaworami turbiny z pulpitu operatora
F2	p <sub>T</sub>	Wyłączenie tzw. szybkich regulacji: reg. pierwotnej i mocy interwencyjnej Ustawienie w OSO prędkości minimalnej
F3	m <sub>DT</sub>	Odlączenie sygnału $Y_m = k \cdot m_{DT}$ sprzęgającego UAR kotła z UAR turbiny
F4	p <sub>s</sub>	Wyłączenie próżniowego ogranicznika mocy. Blokada mocy interwencyjnej
F5	Y	Rekonfiguracja układu diagnostyki urządzenia wykonawczego
F6	p <sub>i</sub>	
F7	I	
F8	Y0	Zmiana sygnału zadawanego z Y0 na P <sub>B</sub> (Moc bazowa na pulpicie operatora)
F9	Y1	Odlączenie sygnału regulacji wtórnej Y1
F10	BPP	Zmiana sygnału zadawanego z BPP na P <sub>B</sub> (P <sub>B</sub> - Moc bazowa na pulpicie operatora)
F11	f	Przełączenie układu regulacji z pomiaru częstotliwości na układ pomiaru prędkości obrotowej
F12	n	Odrzucenie uszkodzonego toru i praca na dwóch pozostałych sprawnych

Wykrycie uszkodzenia toru pomiarowego musi skutkować rekonfiguracją układu sterowania lub zmianą algorytmu działania systemu sterowania. Ponieważ układ regulacji turbiny kondensacyjnej pełni bardzo odpowiedzialną funkcję regulacyjną odstawienie turbiny z powodu uszkodzenia układu sterowania powoduje duże straty ekonomiczne.

#### 4. Diagnostyka urządzenia wykonawczego

Podstawowym sygnałem wyjściowym z regulatora jest sygnał nastawczy  $Y_H$  sterujący pracą zaworów regulacyjnych turbiny. Wartość tego sygnału zmienia się w zakresie 0÷20mA. Poprzez urządzenie wykonawcze (UW) następuje zamiana sygnału elektrycznego na ciśnienie oleju, które steruje położeniem serwowatorów zaworów wysokoprężnych turbiny.

W zależności od sposobu realizacji technicznej urządzenia wykonawczego i układów współpracujących (stacja olejowa, układ zasilania stacji olejowej, zespół filtrów olejowych) do regulatora turbiny mogą być wprowadzone dodatkowe sygnały stosowane w diagnostyce urządzenia wykonawczego.

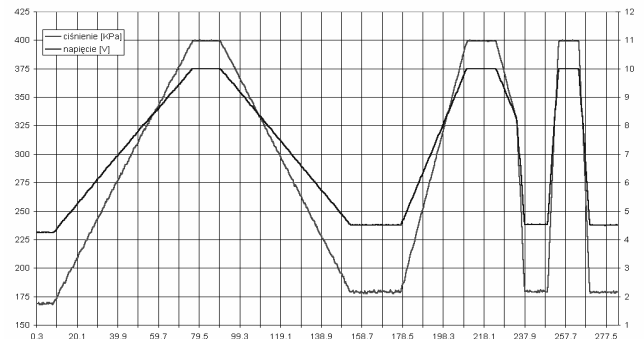
Podstawowe pomiary do diagnostyki UW to: ciśnienie oleju impulsowe, położenie zaworów regulacyjnych, prąd sterujący.

Pomiary pomocnicze: temperatura oleju w UW, różnica ciśnienia na filtrach czyszczących, ciśnienie oleju na zasilaniu

Ponadto w przypadku zastosowania oddzielnej stacji olejowej: temperatura silnika pompy olejowej, ciśnienie gazu w komorze akumulatora.

Diagnostyka i wykrywanie uszkodzeń UW realizowane jest na trzech poziomach: badania laboratoryjne, badania obiektowe, wprowadzenie funkcji diagnostycznych do układu sterowania [2]. Dla badań laboratoryjnych w laboratorium ITC i obiekto-

wych w elektrowni opracowano specjalistyczne programy diagnostyczne. W laboratorium ITC UW przechodzi testy i jest strojona charakterystyka czyli odpowiedź układu olejowego na zmiany napięcia sterującego. Przebiegi tego rodzaju przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi zarejestrowane podczas testów i strojenia urządzenia wykonawczego

Fig. 4. Diagram of executive device

Do sterownika PLC wprowadzono program sterujący pracą turbiny wyposażony w procedury diagnostyczne. Diagnostyka jest prowadzona na podstawie informacji uzyskiwanych z dodatkowych sygnałów podłączonych do regulatora. Na podstawie w/wym. sygnałów wypracowane zostały informacje diagnostyczne informujące obsługę o stanie pracy układu w trybie on-line.

W procedurach diagnostycznych programu sterującego następuje porównywanie bieżącego punktu pracy UW z charakterystyką wzorcową. Prowadzona jest również kontrola zanieczyszczenia filtrów oleju roboczego [2].

#### 5. Podsumowanie

Przedstawione układy diagnostyki zapewniają szybką lokalizację uszkodzenia zanim wpłynie ono niekorzystnie na przebieg procesu regulacji. Obecnie większość regulatorów turbin wykorzystujących sterowniki mikroprocesorowe stosuje kosztowną redundancję sprzętową czujników pomiarowych. Wprowadzenie informacyjnych metod redundancji torów pomiarowych zwiększa niezawodność pracy tych układów. Przedstawione w referacie procedury diagnostyczne zostały wdrożone na układach regulacji bloków 120 MW. Obecnie trwa testowanie i weryfikacja metod diagnostycznych na wdrożonych układach.

W ten sposób następuje poprawa funkcjonalności całego układu regulacji przy mniejszych kosztach realizacji układu regulacji turbiny.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Informatyzacji, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004-2008.

#### 6. Literatura

- [1] Kościelny J.M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, AOW EXIT Warszawa 2001.
- [2] Pawlak M.: Opracowanie mikroprocesorowego układu regulacji turbiny kondensacyjnej tolerującego uszkodzenia torów pomiarowych i diagnozującego pracę urządzenia wykonawczego, Etap I, Etap II, Sprawozdanie ITC-7844, Łódź 2006 r.
- [3] Pawlak M.: Detekcja i lokalizacja uszkodzeń torów pomiarowych w układzie regulacji turbiny kondensacyjnej VII Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej Warszawa, 6-9 grudnia 2005.
- [4] Pawlak M., Karczewski J.: Rekonfigurowalny układ regulacji turbiny kondensacyjnej, Problemy Eksploatacji 1/2005.