

**Jacek KARCZEWSKI, Mariusz PAWLAK**  
Instytut Techniki Ciepłej, Łódź

## **REKONFIGUROWALNY UKŁAD REGULACJI TURBINY KONDENSACYJNEJ**

### **Słowa kluczowe**

Turbina kondensacyjna, tory pomiarowe, układ regulacji, rekonfiguracja, system elektroenergetyczny.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiony został opis układu regulacji turbiny kondensacyjnej oraz schematy konfiguracyjne typowego regulatora, wykorzystujące algorytmy sterowania dla różnych stanów pracy (regulacja mocy i prędkości obrotowej, praca w regulacji Krajowego Systemu Elektroenergetycznego itp.) Omówiono rekonfigurację układu regulacji w stanach z uszkodzeniami, przedstawiając przykładową strukturę rezerwową.

### **Wprowadzenie**

Turbiny kondensacyjne w większości przypadków biorą udział w regulacji Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Są to jednostki o dużych mocach (np.: 360 MW, 200 MW, 120 MW). Niepoprawna praca tak dużych jednostek rzutuje na jakość pracy całego systemu elektroenergetycznego, co pociąga za sobą duże straty ekonomiczne. Niezawodność pracy całego bloku, w tym także układów regulacji, nabiera szczególnego znaczenia w momencie przystosowywania polskiego systemu elektroenergetycznego do współpracy z systemem europejskim. W artykule przedstawiono rekonfigurowalny układ

regulacji turbiny kondensacyjnej, zwiększający niezawodność pracy bloku biorącego udział w regulacji KSE.

## 1. Turbina kondensacyjna jako obiekt regulacji prędkości obrotowej i mocy

Turbiny kondensacyjne są konstruowane w celu uzyskania maksymalnej mocy elektrycznej z generatora pracującego z turbiną, zazwyczaj w układzie blokowym (kocioł  $\Rightarrow$  turbina  $\Rightarrow$  generator).

Wartościami zadanymi w układzie regulacji turbiny kondensacyjnej z międzystopniowym przegrzewaczem pary, współpracującej z generatorem synchronicznym są:

- prędkość obrotowa turbogeneratora:
  - przed synchronizacją,
  - podczas pracy na potrzeby własne,
  - podczas trybu „praca wyspowa”,
- obciążenie mocą czynną.

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.

W układzie wyodrębnione są dwa podstawowe tory regulacji:

- układ regulacji prędkości obrotowej,
- układ regulacji mocy.

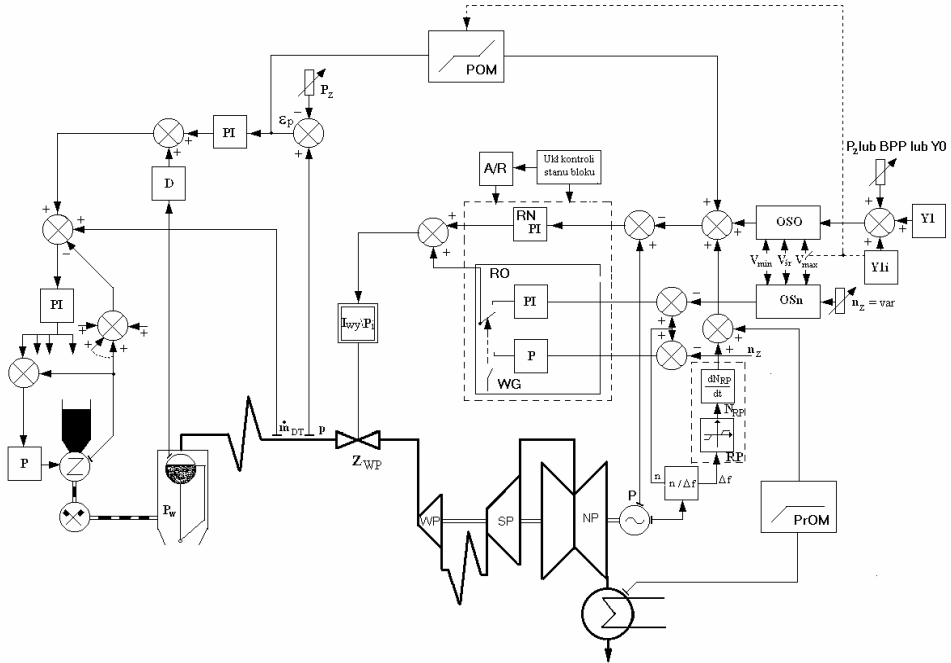
Układ regulacji prędkości obrotowej umożliwia: nabór prędkości obrotowej zgodnie z zaprogramowanym gradientem (przy uwzględnieniu obszaru prędkości obrotowej krytycznej) oraz regulację prędkości obrotowej przy pracy na potrzeby własne i pracę wyspową.

Układ regulacji mocy po stronie wejściowej składa się z czterech torów:

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 w ramach Automatycznej Regulacji Częstotliwości i Mocy oraz w ramach BPP (Bieżącego Punktu Pracy).
3. Tor odchyłek ciśnienia pary świeżej (POM – parowy ogranicznik mocy) i ciśnienia absolutnego w skraplaczu (PrOM – próżniowy ogranicznik mocy).
4. Tor korekcji częstotliwości, w którym kształtuje się charakterystyki: statyczną i dynamiczną regulacji pierwotnej.

Odchyłka mocy wynikająca z porównania mocy rzeczywistej bloku P z czterema ww. sygnałami jest podawana na wejście regulatora PI, którego sygnał wyjściowy poprzez stacyjkę A/R (automatyka/sterowanie ręczne) i prze-

twornik elektrohydrauliczny steruje położeniem zaworów regulacyjnych turbin. Schemat regulatora turbiny kondensacyjnej jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy układu regulacji turbiny [1]

## 2. Funkcje regulatora turbiny kondensacyjnej

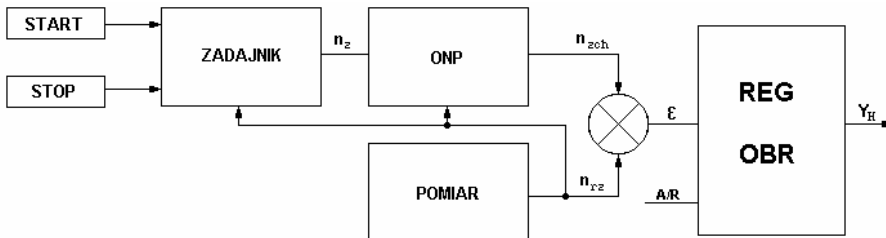
Najważniejsze funkcje opracowanego w Instytucie Techniki Ciepłej (ITC) regulatora turbiny kondensacyjnej to [2, 4]:

- Regulacja prędkości obrotowej (RO),
  - nabór prędkości obrotowej przed synchronizacją,
  - ułatwienie synchronizacji,
  - regulacja prędkości obrotowej przy pracy na potrzeby własne i podczas pracy wyspowej,
- Regulacja obciążenia mocą czynną w układzie z wiodącą turbiną,
- Regulacja pierwotna (RP) – utrzymywanie odpowiedniej częstotliwości w systemie,
- Regulacja mocy w systemie ARCM (regulacja wtórna),
- Regulacja mocy w systemie Y0 (regulacja trójna),
- Regulacja mocy w systemie BPP (Bieżący Punkt Pracy),

- Udostępnienie danych do systemu SMPP-JWCD (System Monitorowania Parametrów Pracy Jednostek Wytwórczych Centralnie Dysponowanych),
- Parowy Ogranicznik Mocy (POM – zabezpieczenie),
- Próżniowy Ogranicznik Mocy (PrOM – zabezpieczenie)
- Ręczne sterowanie położeniem zaworów turbiny (stacyjka sterowania ręcznego A/R – „bezuderzeniowe” przejścia z trybów pracy  $A \rightarrow R$  i  $R \rightarrow A$ ),
- Ograniczniki technologiczne (BOT – Blok Ograniczeń Termicznych),
- Układy do sprawdzania zabezpieczeń turbiny,
- Układ diagnostyczny dla przetwornika elektrohydraulicznego i jego urządzeń pomocniczych (filtry i pompy olejowe),
- Diagnostyka układu regulacji w trybie On-Line i Off-Line,
- Możliwości komunikacyjne z centralnymi systemami wizualizacji.

### 3. Struktura regulatora prędkości obrotowej i mocy turbozespołu

Regulator turbiny daje możliwość wykonania rozruchu turbozespołu. Struktura UAR prędkości obrotowej przedstawiona jest na rys. 2.



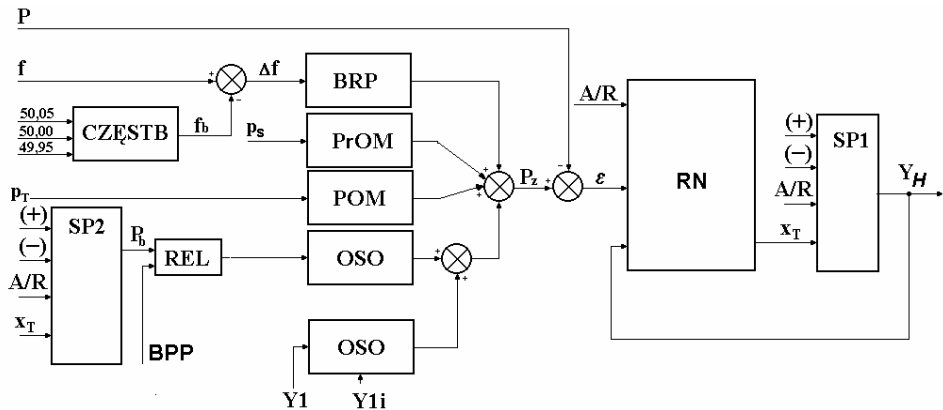
Rys. 2. Struktura układu regulacji prędkości obrotowej: START – przycisk „start”, STOP – przycisk „stop”, ZADAJNIK – układ zadawania prędkości, ONP – ogranicznik naboru prędkości, POMIAR – układ pomiaru prędkości obrotowej, REG/OBR – regulator prędkości obrotowej turbiny, A/R – rodzaj pracy (sygnał binarny),  $n_z$  – prędkość obrotowa zadana,  $n_{zch}$  – prędkość obrotowa zadana chwilowa,  $n_{rz}$  – prędkość obrotowa rzeczywista,  $\epsilon$  – odchyłka regulacji,  $Y_H$  – sygnał nastawczy regulatora

Podczas naboru prędkości obrotowej regulator ma strukturę typu PI. Po uaktywnieniu odpowiednich procedur następuje automatyczne dochodzenie do wyznaczonych poziomów prędkości obrotowej. Dokonywane jest to z prędkościami uzależnionymi od fazy naboru prędkości obrotowej turbozespołu (np. szybkie przechodzenie przez pasmo obrotów krytycznych).

Gdy prędkość obrotowa turbiny osiągnie bądź przekroczy wartość 2100 obr/min, przyjmowana jest wartość zadana równa prędkości synchronicznej. Pozwala to na dokładne zrównanie prędkości obrotowej turbiny z prędkością obrotową synchroniczną. Bezpośrednio przed synchronizacją istnieje możliwość precy-

zyjnej zmiany prędkości obrotowej w celu zoptymalizowania warunków synchronizacji. Układ regulatora umożliwi także nabór prędkości obrotowej do wartości 3200 obr/min w celu sprawdzenia regulatorów bezpieczeństwa. Po synchronizacji z siecią nastąpi samoczynne przełączenie regulatora do regulacji mocy i wstępne obciążenie generatora.

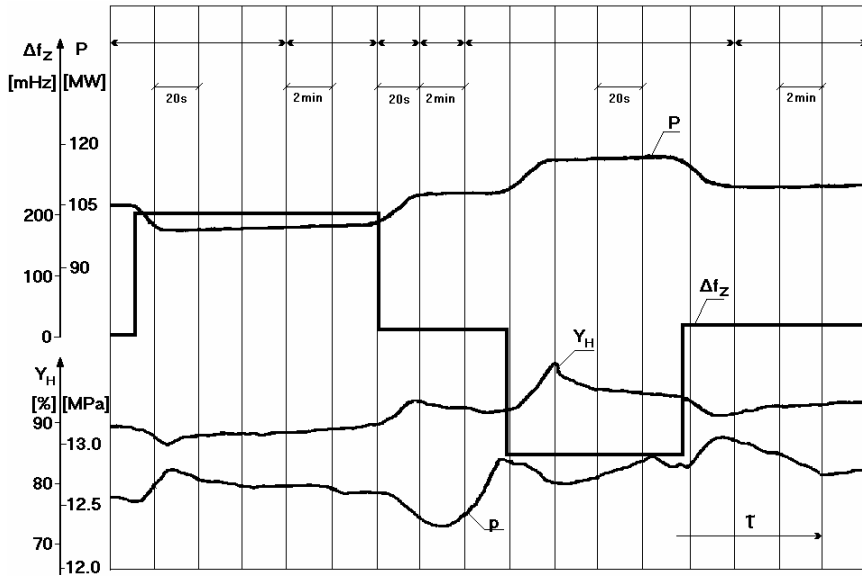
Struktura regulatora mocy turbiny kondensacyjnej przedstawiona jest na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy regulatora mocy turbiny kondensacyjnej: BRP – blok formowania sygnału regulacji pierwotnej, CZĘSTB – blok zadawania częstotliwości bazowej, POM – parowy ogranicznik mocy, PrOM – próżniowy ogranicznik mocy, OSO – ogranicznik szybkości obciążania, SP2 – zadajnik mocy bazowej, SP1 – zadajnik sterowania ręcznego, REL – wybór trybu sterowania (zdalne lub miejscowe), REG – blok regulatora PI, P – moc generatora,  $P_b$  – moc zadana bazowa,  $P_z$  – sumaryczna moc zadana dla turbiny,  $Y_{1i}, Y_1$  – sygnały z regulatora centralnego (regulacja wtórna systemu), BPP – bieżący punkt pracy,  $f$  – częstotliwość sieci,  $f_b$  – częstotliwość bazowa,  $\Delta f$  – odchyłka częstotliwości,  $p_T$  – ciśnienie pary świeżej,  $Y_H$  – sygnał sterujący,  $x_T$  – sygnały do śledzenia, (+), (-) – sygnał binarny zadawanie w górę (w dół), A/R – sygnał binarny (sterowanie ręczne lub automatyczne).

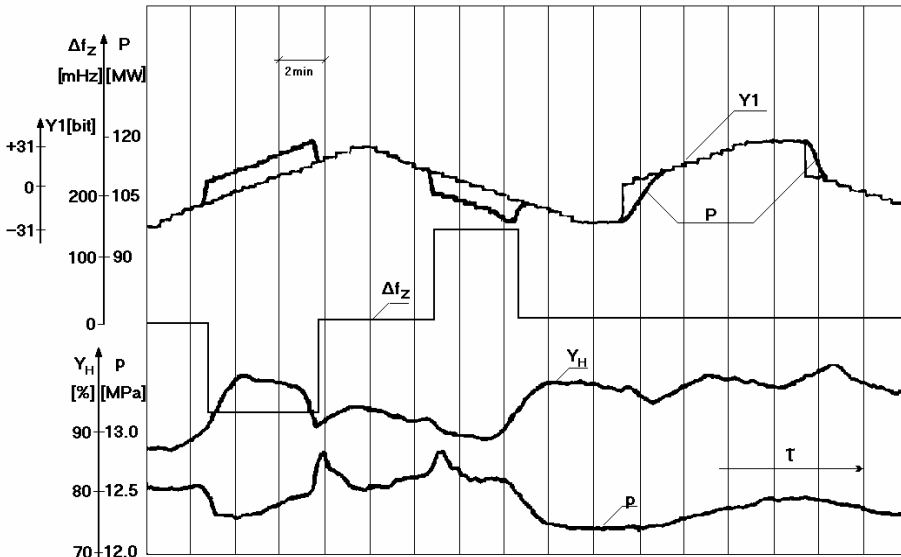
Struktura ta realizuje funkcje regulatora przedstawione w rozdziale 2. Przykładowo – na rys. 4 przedstawiono wybrane przebiegi zarejestrowane na rzeczywistym obiekcie (blok 120 MW) w trakcie sprawdzania działania regulacji pierwotnej. W czasie badań wartość ustawionej strefy martwej  $\Delta f$  wynosiła 20 mHz. Przy założonym statyzmie  $s = 5\%$  zmiana częstotliwości  $\Delta f_z = 125$  mHz wymusza zmianę mocy 6 MW. Wynika to z definicji statyzmu:

$$s = (\Delta f / f_n P_N / \Delta P_0) 100\% = (0.125 / 50 \cdot 120 / 6) = 5\%$$



Rys. 4. Wybrane przebiegi zarejestrowane podczas prób odbiorczych regulacji pierwotnej

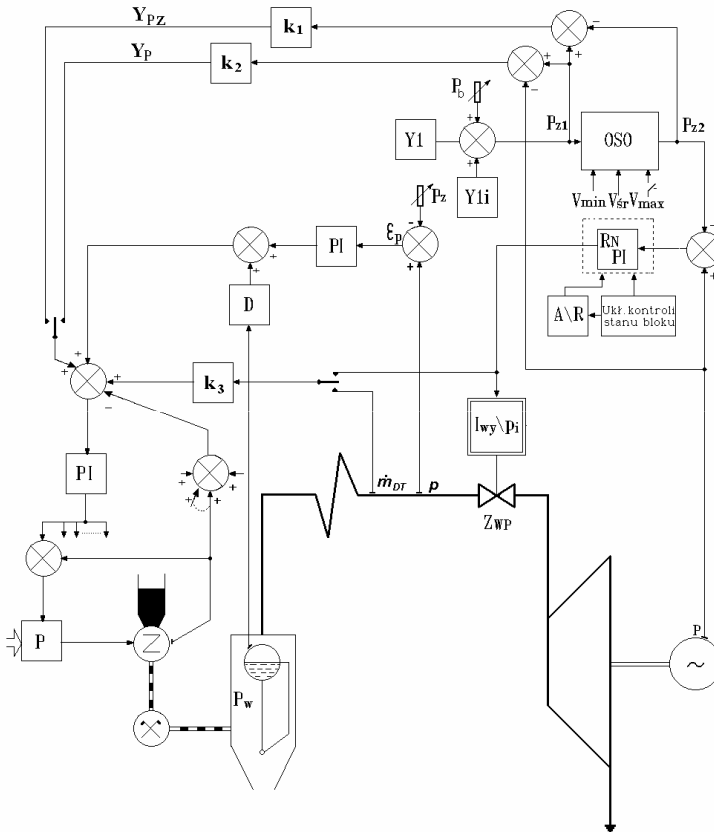
Na rys. 5 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas sprawdzania regulacji pierwotnej i wtórnej.



Rys. 5. Wybrane przebiegi zarejestrowane podczas sprawdzania współdziałania regulacji pierwotnej i wtórnej

#### 4. Koordynacja obciążenia kocioł–turbina

Układ regulacji ciśnienia pary w kotle, jako znacznie wolniejszy od układu regulacji mocy turbiny, decyduje o czasie trwania procesu przejściowego regulacji bloku. Poprawa tego procesu jest możliwa poprzez włączenie sygnałów wyprzedzających od zakłóceń mocy w tor regulatora ciśnienia. Sygnały te informują układ regulacji ciśnienia pary w kotle o zamierzonej zmianie mocy turbiny. W celu osiągnięcia wymaganej stabilizacji ciśnienia pary należy więc do UAR ciśnienia wprowadzić dodatkowe sygnały z regulatora mocy turbiny. Na rys. 6. przedstawiono sposób wyprowadzenia z regulatora REH sygnałów sprzęgających UAR kotła i turbiny. Generowanymi w regulatorze turbiny, sygnałami pomocniczymi są: strumień masy pary ( $m_{DT}$ ) części WP turbiny, sygnał nastawczy regulatora mocy ( $Y_H$ ), sygnał odchyłki mocy zadanej ( $Y_P$ ), sygnał odchyłki mocy zadanej i sygnału przetworzonego w OSO ( $Y_{PZ}$ ).



Rys. 6. Schemat wyprowadzenia sygnałów pomocniczych z regulatora turbiny do układu regulacji ciśnienia pary w kotle

Przykładowo omówiono sygnał  $Y_{PZ}$  formowany zgodnie z wzorem:

$$Y_{PZ} = k_1(P_{Z1} - P_{Z2})$$

gdzie:  $k_1$  – wzmacnienie,  $P_{Z1}$  – moc zadana (mierzona przed ogranicznikiem szybkości obciążania OSO),  $P_{Z2}$  – sygnał mocy zadanej mierzonej za OSO.

Sygnał powyższy w stanach ustalonych ma charakter zanikający i dlatego po wyłączeniu regulatora nie ma potrzeby zastępowania go innym sygnałem. Sygnał  $Y_{PZ}$  wyprzedza sygnał od strumienia masy pary i przy odpowiednim doborze współczynnika  $k$  może zastąpić pochodną ciśnienia w walczaku. Badania wykazały, że sprzęgnięcie UAR: kotła i turbiny zaproponowanym sygnałem poprawia przebiegi dynamiczne ciśnienia w stosunku do układów niesprzęgniętych. Przy optymalnych wzmacnieniach tego sygnału uzyskano, przy zakłóceniach mocą, zmniejszenie (w porównaniu z układem bez sygnałów pomocniczych) odchyłki ciśnienia odpowiednio: od 40 do 75% w zależności od prędkości zmian mocy [4].

## 5. Rekonfiguracja regulatora

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 jest niedopuszczalne. Celem pracy było przedstawienie możliwości działania układu regulacji w stanach z uszkodzeniami poszczególnych torów pomiarowych.

Przystępując do budowy układu regulacji dla turbiny kondensacyjnej odpornego na uszkodzenia torów pomiarowych należy określić zbiór możliwych stanów funkcjonowania ( $F$ ) w przypadku wystąpienia uszkodzenia [3].

$$F = \{f_m : m = 1, 2, \dots, M\}$$

Tabela 1 w sposób opisowy podaje możliwości zmiany działania układu w stanach z uszkodzeniami [4].

Schematyczne przestawienie układu regulacji w przypadku wykrycia uszkodzenia toru pomiarowego ciśnienia pary świeżej pokazano na rys. 7. Ciśnienie pary jest wprowadzone do układu regulacji ciśnienia w celach kontrolno-zabezpieczających. Sprawdzanie stanu ciśnienia pary w układach z wodącą turbiną ma na celu zabezpieczenie bloku przed niebezpiecznymi wahaniami mocy. Moc generowaną przez blok energetyczny należy dostosować do aktualnych możliwości układów zasilania wodą, powietrzem i paliwem.



Tabela 1. Rekonfiguracja układu regulacji w stanach z uszkodzeniami torów pomiarowych

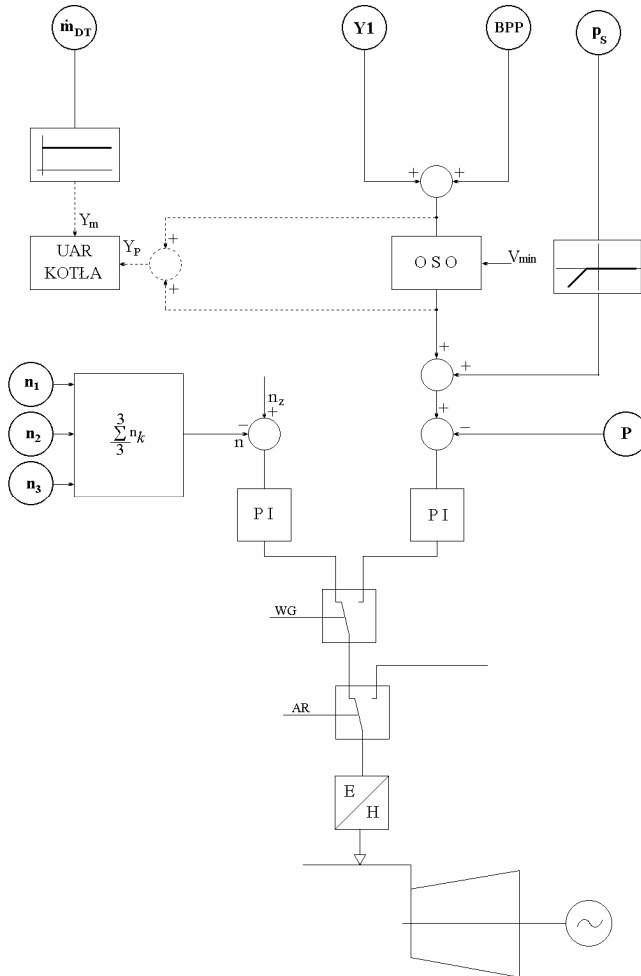
Stan	Uszkodzony tor pom.	Opis zmiany działania układu w stanach z uszkodzeniami
F1	Moc czynna	Sterowanie bezpośrednio zaworami turbiny ze stacyjki sterowania ręcznego
F2	Ciśnienie pary świeżej	Wyłączenie tzw. szybkich regulacji (reg. pierwotna i moc interwencyjna). Wyłączenie parowego ogranicznika mocy. Ustawienie w OSO prędkości minimalnej.
F3	Ciśnienie absolutne w skraplaczu	Wyłączenie próżniowego ogranicznika mocy Blokada mocy interwencyjnej
F4	Strumień masy pary	Odłączenie sygnału $Y_m = k_{mDT}$ sprzęgającego UAR kotła z UAR turbiny.
F5	ARCM – Y0	Zmiana sygnału zadawanego z Y0 na $P_B$ ( $P_B$ – Moc bazowa na pulpicie operatora).
F6	ARCM – Y1	Odłączenie sygnału regulacji wtórnej Y1
F7	BPP	Zmiana sygnału zadawanego z BPP na $P_B$ ( $P_B$ – Moc bazowa na pulpicie operatora).
F8	Częstotliwość	Przełączenie układu regulacji z pomiaru częstotliwości na układ pomiaru prędkości obrotowej.
F9	Prędkość obrotowa	Odrzucenie uszkodzonego toru i praca na dwóch pozostałych (sprawnych)
F10	Położenie zaworów regulacyjnych	Rekonfiguracja układu diagnostyki urządzenia wykonawczego
	Ciśnienie oleju impulsowego	
	Wartość sygnału prądowego wyjściowego	

W przypadku braku kontroli sygnału  $p_T$  należy tak zmienić działanie układu regulacji, aby uszkodzenie to nie spowodowało niekorzystnych skutków dla całego bloku energetycznego. Aby to zrealizować, rekonfiguracja układu powinna polegać na:

- 1) Automatem ustawieniu minimalnej prędkości  $V_{min}$  [MW/min] w OSO (Ogranicznik Szybkości Obciążania) (następuje wtedy także blokada sygnału mocy interwencyjnej  $Y_i$ ).
- 2) Wyłączeniu regulacji pierwotnej, ponieważ jest ona regulacją szybką i może wywołać niekorzystny wpływ na blok energetyczny, jeżeli ciśnienie pary świeżej nie ma odpowiedniej wartości.
- 3) Odłączeniu POM (Parowy Ogranicznik Mocy), charakterystyka sygnału na wyjściu tego programowego bloku zależy od pomierzonego ciśnienia pary. Złe odczyty ciśnienia mogą wysyłać fałszywe sygnały dla mocy zadanej dla całego bloku energetycznego

Przy powyższych założeniach blok może pracować w ograniczonym zakresie nawet z sygnałami zdalnymi jak to przedstawiono na rys.7. Dodatkowym

zabezpieczeniem są sygnały sprzęgające  $Y_m$  i  $Y_p$ , które pomagają uzyskać odpowiednią moc w układzie regulacji mocy z wodącą turbiną. Należy jednak pamiętać o generalnej zasadzie, że lepiej wyłączyć sygnał zdalnego zadawania, niż bronić trybu zdalnego sterowania za wszelką cenę, spowodować odłączenie bloku energetycznego od krajowego systemu elektroenergetycznego.



Rys. 7. Rekonfiguracja układu w przypadku wykrycia uszkodzenia toru pomiarowego  $p_T$

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono strukturę układu regulacji dla turbiny kondensacyjnej spełniającą aktualne wymagania dotyczące regulacji mocy bloku energetycznego. Strukturę tę opracowano na podstawie analizy pracy bloku ener-

tycznego biorącego udział w regulacji systemu elektroenergetycznego, w którym obciążenie regulowane jest poprzez oddziaływanie na turbinę (zmiana położenia zaworów regulacyjnych WP). Zastosowanie nowoczesnych układów sterowania komputerowego pozwala na budowę regulatorów elektrohydraulicznych mocy, posiadających wiele nowych, użytecznych funkcji oraz prowadzi do poprawy jakości regulacji, zwiększenia pewności ruchu i poprawy warunków eksploatacji. Dzięki regulatorom możliwe staje się np. włączenie poszczególnych bloków do układu Automatycznej Regulacji Częstotliwości i Mocy (ARCM) oraz systemu regulacji pierwotnej.

Zaprezentowane struktury UAR wykorzystujące zaawansowane techniki diagnostyczne mogą przyczynić się do rozwoju technologii wytwarzania energii elektrycznej i eksploatacji bloków energetycznych, poprawiając ich żywotność.

### **Bibliografia**

1. Karczewski J., Pawlak M.: Modernizacja regulatorów mocy REH-ITC w celu spełnienia aktualnych wymagań krajowego systemu elektroenergetycznego. *Wiadomości Elektrotechniczne* 7/8 2005.
2. Karczewski J., Pawlak M.: Struktura UAR turbiny kondensacyjnej biorącej udział w regulacji systemu elektroenergetycznego. VII Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej Warszawa, 6–9 grudnia 2005.
3. Kościelny J.M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych. AOW EXIT, Warszawa 2001.
4. Pawlak M., Karczewski J., Szuman P., Wąsik P.: Opracowanie mikroprocesorowego układu regulacji turbiny kondensacyjnej tolerującego uszkodzenia torów pomiarowych i diagnozującego pracę urządzenia wykonawczego. Etap I: Opracowanie struktury układu regulacji dla turbiny kondensacyjnej. Etap II: Opracowanie struktur rezerwowych układu regulacji w stanach z uszkodzeniami. Sprawozdanie ITC nr 7844, Łódź 2005, nie opublikowane.
5. Pawlak M., Wasiewicz P., Kościelny J.M.: Condensation power turbine control system tolerating instrumentation faults. *Networked Control Systems Tolerant to faults Workshop Ajaccio-France, 6–7 October 2005.*

*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.*

Recenzent:  
**Władysław BRZOZOWSKI**

## **Reconfigurable control system of condensation power turbine**

### **Summary**

The construction and operation of an control system of a power unit turboset has been described. Such an installation has been made on power blocks in Power Plant. The control system functions, principle of operation, his structure, software and investigations results have been presented. The presented idea of fault tolerance of control systems lies in the introduction of on-line fault diagnosis and reconfiguration of system structure or parameter changes in the faulty states.