

## Dodatek A

# Symulator zespołu kocioł-turbina

Symulacja komputerowa procesów i obiektów fizycznych stanowi jedną z dynamicznie rozwijających się dziedzin zastosowania technik komputerowych w systemach sterowania procesami technologicznymi, zarządzania produkcją, czy w systemach ekspertowych. Projektowanie oraz testowanie systemów sterowania lub systemów detekcji i lokalizacji uszkodzeń często wykonuje się korzystając z symulatorów procesów technologicznych. Pozwala to na realizację postawionych zadań efektywniej, taniej niż przy eksperymentach realizowanych w rzeczywistym procesie. Ponadto symulatory umożliwiają realizację testów, które nie mogą być realizowane w rzeczywistym procesie przemysłowym.

Ocena poprawności działania systemu ekspertowego wymaga przeprowadzenia określonej liczby testów. Realizowane eksperymenty wymagają współpracy systemu ekspertowego z badanym obiektem. Praca w warunkach znamionowych nie stanowi problemu technicznego, chociaż wymaga niekiedy dodatkowego, drogiego oprzyrządowania pomiarowego. Jednakże bardziej istotna z punktu widzenia weryfikacji poprawności działania diagnostycznego jest analiza pracy, zachowanie procesu w warunkach odbiegających od znamionowych, wywołanych wystąpieniem uszkodzeń wybranych elementów zespołu. Tego typu eksperymenty są niemożliwe przy współpracy z rzeczywistym procesem. Jedynym rozwiązaniem jest wykorzystanie symulatora dynamiki badanego procesu, który będzie z określoną dokładnością reprezentował własności rzeczywistego procesu a ponadto pozwoli wprowadzać uszkodzenia wybranych podzespołów.

Z uwagi na złożoność opisu matematycznego procesów fizycznych zachodzących w poszczególnych urządzeniach zespołu kocioł-turbina, przy realizacji symulatora wykorzystano uproszczone modele matematyczne, które zapewniają niezbędne

wymagania jakościowe i funkcjonalne symulatora. W danej wersji symulatora dopuszcza się symulację wielu możliwych uszkodzeń mogących wystąpić w obiektach rzeczywistych. Cyfrowy symulator został napisany w języku TURBO Pascal v.7.0 i zaimplementowany dla komputerów klasy IBM PC [188].

W procesie realizacji modelu cyfrowego uwzględniono problemy związane z szybkością przetwarzania informacji. Model analogowy całkuje i różniczkuje sygnały w czasie rzeczywistym. W przypadku symulatora cyfrowego należy rozwiązać równania różniczkowe nie tylko w czasie rzeczywistym, ale nawet szybciej, ponieważ symulator musi wykonać wiele innych funkcji zapisu i wizualizacji wyników symulacji. Pewnym ułatwieniem w przypadku omawianego obiektu jest fakt, iż jest to obiekt wielowymiarowy, ale o względnie dużych stałych czasowych. Tak więc, krok dyskretyzacji może być odpowiednio duży, bez ryzyka występowania błędów numerycznych związanych z krokiem dyskretyzacji. Większy krok dyskretyzacji pozostawia margines czasowy niezbędny do przeprowadzenia obliczeń, archiwizacji danych o stanie obiektu oraz wizualizacji graficznej zachowania obiektu.

### A.1. Układ modelu symulacyjnego

Model cyfrowy zrealizowano na bazie struktury blokowej opisującej dynamikę badanego obiektu (rys. A.1). Po przeprowadzeniu analizy omawianego schematu wyróżnić należy pięć podstawowych członów dynamicznych, których schematy blokowe oraz modele w postaci równań różnicowych przedstawiono w [188]. Symulator cyfrowy poza realizacją zadania modelowania dynamiki obiektu zapewnia również:

- ✓ zmianę dynamiki wybranych podzespołów obiektu,
- ✓ wprowadzenie uszkodzeń wybranych elementów zespołu,
- ✓ przerwanie pracy modelu w dowolnym momencie i kontynuację pracy po określonym czasie,
- ✓ wprowadzenie, w dowolnej chwili, zerowych warunków początkowych, co umożliwia powtórzenie eksperymentu,
- ✓ wizualizację przebiegu wybranych sygnałów obiektowych i sterujących,
- ✓ szybkie przejście do stanu pracy w warunkach znamionowych, przy pominięciu procesu rozruchu obiektu,
- ✓ współpracę modelu z systemem ekspertowym diagnostyki i detekcji uszkodzeń,
- ✓ ręczne sterowanie obiektem za pomocą stacyjki współpracującej ze standardową klawiaturą,

∨ skalowanie czasu symulacji dynamiki obiektu, co umożliwia przyspieszenie lub opóźnienie czasu dyskretnego w stosunku do czasu rzeczywistego.

Analizując strukturę modelu (rys. A.1) można zauważyć, że składa się on z określonej liczby odpowiednio połączonych wcześniej omówionych członów podstawowych [188].

W modelu cyfrowym zrealizowano pięć członów dynamicznych, które wywoływane w odpowiedniej kolejności oraz z odpowiednimi parametrami realizują założoną dynamikę. Dla wielkości, dla których na bazie zjawisk fizycznych występują ograniczenia, model cyfrowy zapewnia realizację występujących ograniczeń. Zaliczamy do nich między innymi:

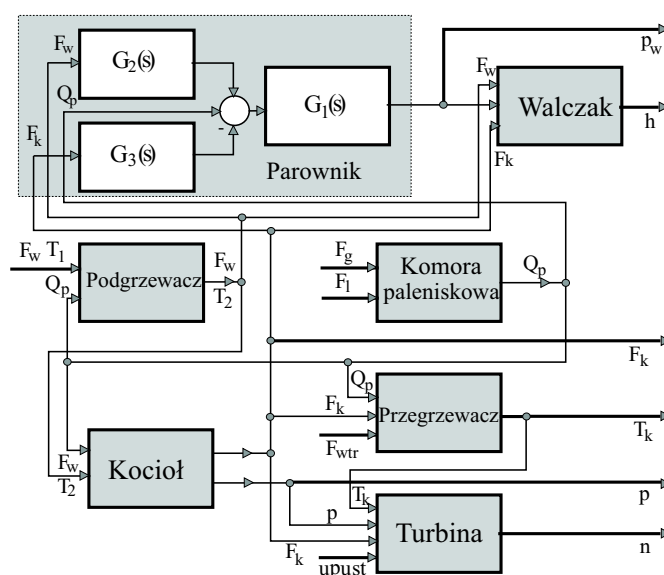
- ◇ minimalną i maksymalną wartość poziomu wody w walczaku,
- ◇ przerwanie procesu wytwarzania pary w przypadku zerowej wartości poziomu wody w walczaku.

Dane o poziomie sygnałów obiektowych zapisywane są w plikach w każdym cyklu symulacji. Program symulacyjny tworzy dwa pliki, z których jeden zawiera dane aktualne do 50 próbek, a drugi dane zarchiwizowane zawierające 50 próbek. W chwili wypełnienia pliku z danymi aktualnymi następuje aktualizowanie zawartości pliku historii. Przebiegi sygnałów obiektowych są ponadto przedstawione w sposób graficzny na ekranie monitora komputerowego.

Przyjęto zasadę animacji ruchu taśmy rejestratora, co pozwala na obserwację zachowania obiektu przez ostatnie 400 próbek. Zasada animacji oraz zapis danych w plikach przechowywanych na dysku twardym powodują znaczne zaangażowanie symulatora do realizacji tych zadań, co wymusza zastosowanie konfiguracji komputera zapewniającej szybką realizację w/w zadań. W przypadku komputera o nieodpowiedniej konfiguracji występuje zjawisko blokowania pracy symulatora w czasie archiwizacji danych lub regeneracji ekranu.

Symulator elektrowni cieplnej zapewnia pełną komunikację z użytkownikiem poprzez możliwość wyboru trybu pracy, formy wizualizacji informacji o obiekcie oraz wizualizacji stanu obiektu w czasie pracy elektrowni. Po uruchomieniu symulatora pojawia się plansza tytułowa programu. Na rysunku A.2 pokazano główne menu symulatora.

Wybór opcji **P** umożliwia obserwację zasady pracy tego typu obiektu z elementami animacji ruchu, członów mechanicznych i przepływu różnego typu mediów technologicznych (rys. A.3). Opcja **O** zawiera skrótowy opis podstawowych funkcji symulatora oraz krótką instrukcję obsługi. Symulator elektrowni uruchamia się za pomocą opcji **S**.



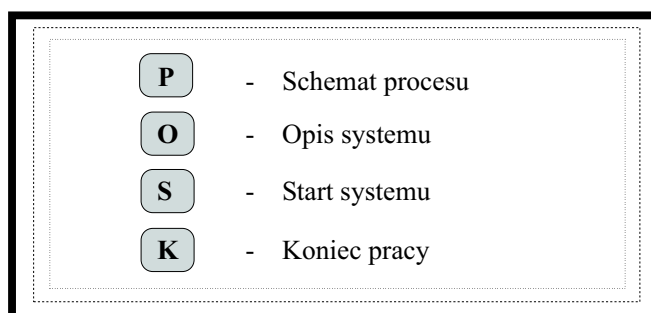
Rys. A.1. Schemat blokowy reprezentujący dynamikę poszczególnych podzespołów zespołu kocioł-turbina

Po uruchomieniu symulatora pojawia się stacyjka operatorska przedstawiona na rysunku A.4. Zawiera ona wiele elementów informacyjnych i sterujących. Użytkownik symulatora może korzystać z systemu podpowiadania za pomocą klawisza **F1**. Wybór funkcji realizuje się za pomocą myszy lub sekwencyjnie za pomocą klawisza **TAB** lub **TAB + SHIFT**, w zależności od kierunku poruszania się po klawiszach funkcyjnych. Aktualnie wybrana funkcja sygnalizowana jest za pomocą ramki obejmującej fragment centralki związanej z tą funkcją.

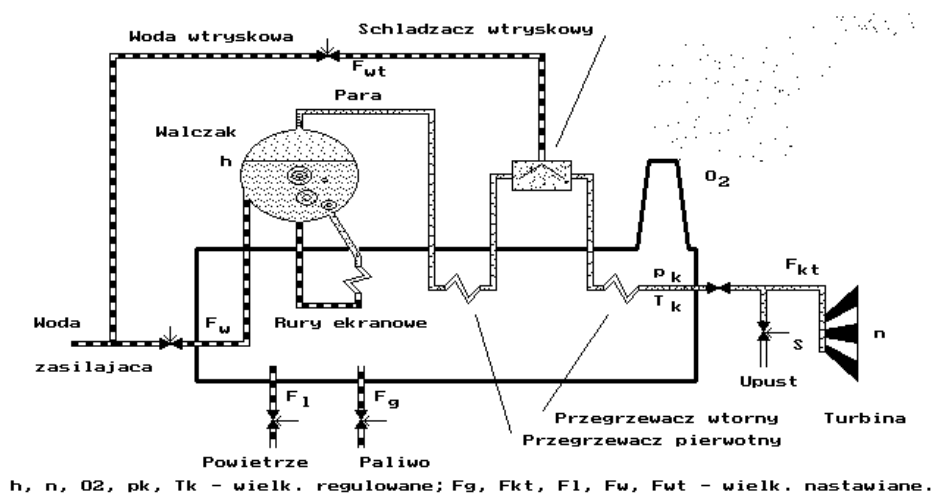
## A.2. Symulacja uszkodzeń wybranych elementów

Omawiany symulator pozwala wprowadzać uszkodzenia niektórych podzespołów obiektu. W omawianym procesie technologicznym, jakim jest elektrownia, współpracuje ze sobą wiele podzespołów o różnym stopniu komplikacji i niezawodności. Analizując specyfikę badanego obiektu należy stwierdzić, że do najczęściej występujących można zaliczyć:

- ◇ uszkodzenia zaworów,
- ◇ uszkodzenia pomp,
- ◇ uszkodzenia wybranych elementów turbiny,
- ◇ uszkodzenia kotła,



Rys. A.2. Główne menu symulatora

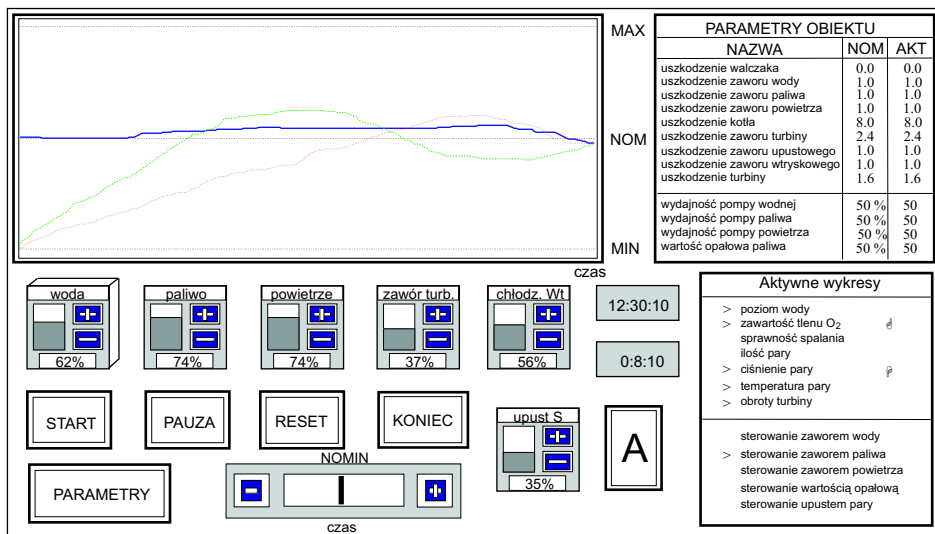


Rys. A.3. Schemat technologiczny elektrowni cieplnej

◇ uszkodzenia walczaka.

### A.2.1. Uszkodzenia walczaka

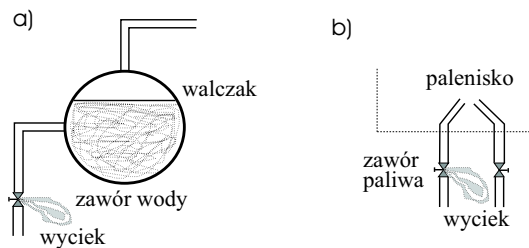
Walczak jest jednym z najważniejszych podzespołów elektrowni cieplnej. Spadek poziomu wody w walczaku może mieć krytyczne skutki w pracy całej elektrowni. Uszkodzenie walczaka może być różnie interpretowane ze względu na złożone zjawiska, występujące w tego typu obiekcie. W omawianym modelu walczaka zasympulowano uszkodzenie w postaci pęknięcia powłoki walczaka (rys. A.7b). Powoduje to spadek poziomu wody przy stałym zasilaniu. Wielkość pęknięcia można wprowadzać przez zmianę wartości wielkości opisującej zjawisko pęknięcia.



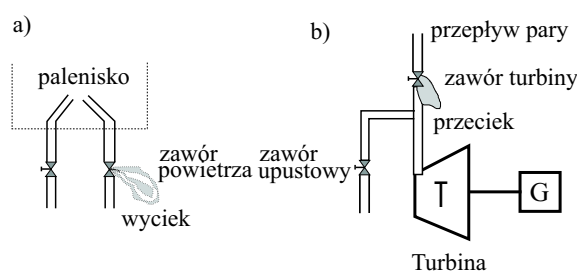
Rys. A.4. Stacyjka operatora symulatora elektrowni ciepłej

### A.2.2. Uszkodzenia zaworów

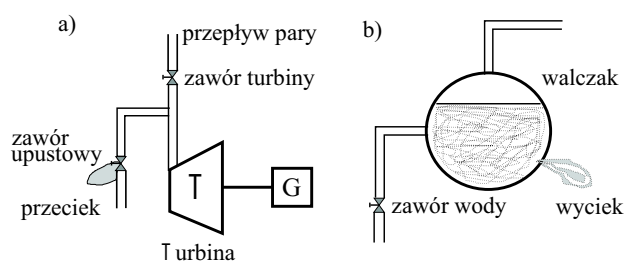
Symulator elektrowni ciepłej umożliwia generowanie uszkodzenia pięciu zaworów. Uszkodzenie zaworu dotyczy sytuacji, w której następuje przeciek na zaworze lub przyłączach do zaworów. W symulatorze rozumiane jest to, jako zmniejszenie wzmocnienia modelu zaworu. Do zaworów, dla których można zasymulować uszkodzenie, zaliczamy: zawór wody (rys. A.5a), zawór paliwa (rys. A.5b), zawór powietrza (rys. A.6a), zawór turbiny (rys. A.6b), zawór wody (rys. A.7a)



Rys. A.5. Schematy uszkodzeń zaworów: (a) wody, (b) paliwa



Rys. A.6. Schematy uszkodzeń zaworów: (a) powietrza, (b) turbiny



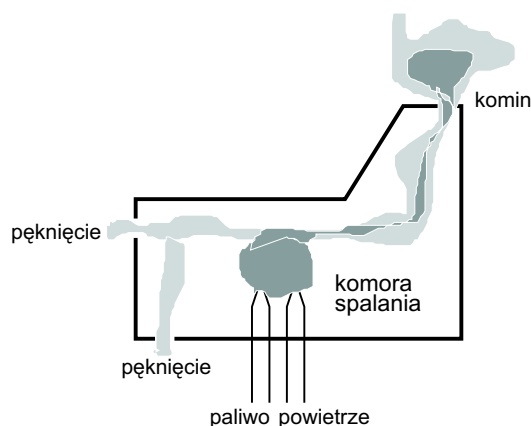
Rys. A.7. Schematy uszkodzeń (a) zaworu wody, (b) uszkodzenie walczaka

### A.2.3. Uszkodzenia kotła

Kocioł jest podzespołem, w którym następuje przetwarzanie energii chemicznej paliwa w energię cieplną pary. W modelu tego obiektu zasymulowano uszkodzenie w postaci zmniejszenia wydajności kotła. Wydajność kotła zależy przede wszystkim od jakości spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Symulowane uszkodzenie związane jest z powstaniem w rzeczywistym obiekcie pęknięć, wywołujących utworzenie przepływu obcego powietrza zakłócającego proces spalania paliwa (rys.A.8).

### A.2.4. Uszkodzenia turbiny

Turbina zawiera wiele elementów mechanicznych. Uszkodzenie turbiny może wynikać z niesprawności wielu elementów składowych. W zastosowanym modelu turbiny wprowadzono uszkodzenie łopatek kierownicy turbiny. Zmiana kąta ustawienia łopatek turbiny prowadzi do zmiany wydajności i prędkości wirowania wirnika turbiny. Wprowadzone uszkodzenie może wynikać ze zmniejszenia kąta ustawienia łopatek, co powoduje spadek prędkości obrotowej wirnika lub ze zwiększenia kąta i wzrostu prędkości obrotowej.



Rys. A.8. Schemat uszkodzenia kotła

### A.3. Przykłady wprowadzania uszkodzeń

Uszkodzenia wprowadzamy za pomocą klawisza *PARAMETRY* (rys.A.4). Uaktywnienie tego klawisza i zatwierdzenie za pomocą klawisza *ENTER* pozwala na przejście w tryb wprowadzania uszkodzeń oraz zatrzymania procesu symulacji dynamiki obiektu. Wyboru uszkodzenia można dokonać w oknie dialogowym pokazanym na rysunku A.9. Aktywna ramka obejmująca jedno z uszkodzeń pozwala zmieniać wartość współczynnika poziomu uszkodzenia.

Dla zaworów współczynnik ten przyjmuje wartości z zakresu od 1 (brak uszkodzenia) do 0.1 (totalne uszkodzenie zaworu). Dla walczaka zakres zmian współczynnika poziomu uszkodzenia wynosi od 0 (brak uszkodzenia) do 10 (duże pęknięcie walczaka). Dla kotła współczynnik ten przyjmuje wartości z przedziału  $2 \div 8$ . Zmiana wartości tego współczynnika wskazuje na pogorszenie jakości spalania paliwa w palenisku. W turbinie omawiany współczynnik może zmieniać wartość w zakresie 1.6 do 4.0 przy czym wartość nominalna wynosi 2.4. Zmiana wartości w obu kierunkach w stosunku do wartości nominalnej związana jest ze sposobem sterowania kątem ustawienia łopatek turbiny. Dla pomp zmiany obejmują zwiększenie lub spadek wydajności pomp. Aktualna wydajność pomp ukazana jest w oknie dialogowym w %. Wartość nominalna wynosi 50% (umożliwia to wprowadzenie modyfikacji wydajności w obu kierunkach). Wartość opałowa paliwa określa jakość spalanego paliwa. Zmiana wartości powyżej 50% oznacza zastosowanie paliwa o większej wydajności energetycznej. Przy zmianach poniżej 50% zastosowano gorsze paliwo.

Dla uszkodzenia uaktywnionego, za pomocą aktywnej ramki (rys.A.9) zmiany wartości współczynnika uszkodzenia dokonuje się za pomocą strzałek poziomych. Wyboru uszkodzenia dokonuje się za pomocą strzałek pionowych. Za po-



PARAMETRY OBIEKTU		
NAZWA	NOM	AKT
uszkodzenie walczaka	0.0	0.0
uszkodzenie zaworu wody	1.0	1.0
uszkodzenie zaworu paliwa	1.0	1.0
uszkodzenie zaworu powietrza	1.0	1.0
uszkodzenie kotła	8.0	8.0
uszkodzenie zaworu turbiny	2.4	2.4
uszkodzenie zaworu upustowego	1.0	1.0
uszkodzenie zaworu wtryskowego	1.0	1.0
uszkodzenie turbiny	1.6	1.6
wydajność pompy wodnej	50 %	50
wydajność pompy paliwa	50 %	50
wydajność pompy powietrza	50 %	50
wartość opałowa paliwa	50 %	50

Rys. A.9. Okno dialogowe w opcji wprowadzania uszkodzeń

mocą myszy uszkodzenia wprowadza się bezpośrednio w oknie dialogowym (rys. A.9). Wartość uszkodzenia wyznacza się ustawiając mysz na prawej lub lewej stronie opisu danego elementu, przy wciśniętym lewym przycisku myszy. Po wprowadzeniu uszkodzenia do procesu symulacji dynamiki przechodzi się za pomocą klawisza *TAB* lub opuszczeniu myszą okna dialogowego. Operacja ta uaktywnia jednocześnie wprowadzone uszkodzenie. Klawisz oznaczony *R/A* stosowany jest do automatycznego rozruchu oraz do usunięcia wcześniej wprowadzonych uszkodzeń (stosować go tylko przy aktywnym procesie symulacji).

## A.4. Zakończenie

Modelowanie własności obiektów statycznych (a tym bardziej dynamicznych) jest zagadnieniem ważnym i niekiedy jedynym umożliwiającym prowadzenie eksperymentów niebezpiecznych lub wręcz niemożliwych z wykorzystaniem obiektu rzeczywistego. Dokładna analiza zjawisk fizycznych, występujących w badanych procesach, wymaga stosowania modeli nieliniowych z wykorzystaniem bardzo zaawansowanego aparatu matematycznego. Tak otrzymane modele są, niestety, często niefunkcjonalne i trudne do weryfikacji i symulacji, dlatego biorąc pod uwagę ograniczony zakres zmian stanu obiektu można dokonać linearyzacji charakterystyk opisujących własności obiektu wokół punktu pracy (praca w warunkach znamionowych). Tak otrzymany model matematyczny wykorzystano do realizacji

komputerowych, pozwalających symulować pracę badanego procesu w warunkach znamionowych lub niewiele od nich odbiegających. Korzystając z liniowych modeli poszczególnych podzespołów badanego procesu zbudowano model strukturalny, reprezentujący własności poszczególnych elementów procesu oraz ich powiązania wynikające z zasad funkcjonowania modelowanego procesu.

Przedstawiony symulator zespołu *kocioł-turbina* umożliwia modelowanie dynamiki poszczególnych elementów procesu. Dodatkowo uzyskano dobre informatyczne narzędzie do badania wpływu zmian wybranych parametrów modelu, symulujących uszkodzenia określonych podzespołów procesu, na zmiany stanu dynamicznego obiektu. Zaimplementowany symulator umożliwia obserwację stanu podstawowego zestawu sygnałów obiektowych w postaci wykresów z dodatkowymi funkcjami odświeżania rejestrogramu oraz archiwizacji wektora zmiennych stanu obiektu na nośniku zewnętrznym komputera, w postaci wymaganej przez interfejs systemu ekspertowego. W omawianym symulatorze przygotowano również funkcjonalną stacyjkę operatora procesu, umożliwiającą wprowadzenie sterowania ręcznego procesem oraz uaktywnienie systemu ekspertowego w celu przeprowadzenia diagnozy stanu symulowanego procesu.