Rozdział 14

Diagnostyczny system doradczy dla symulatora procesu

Damian SKUPNIK

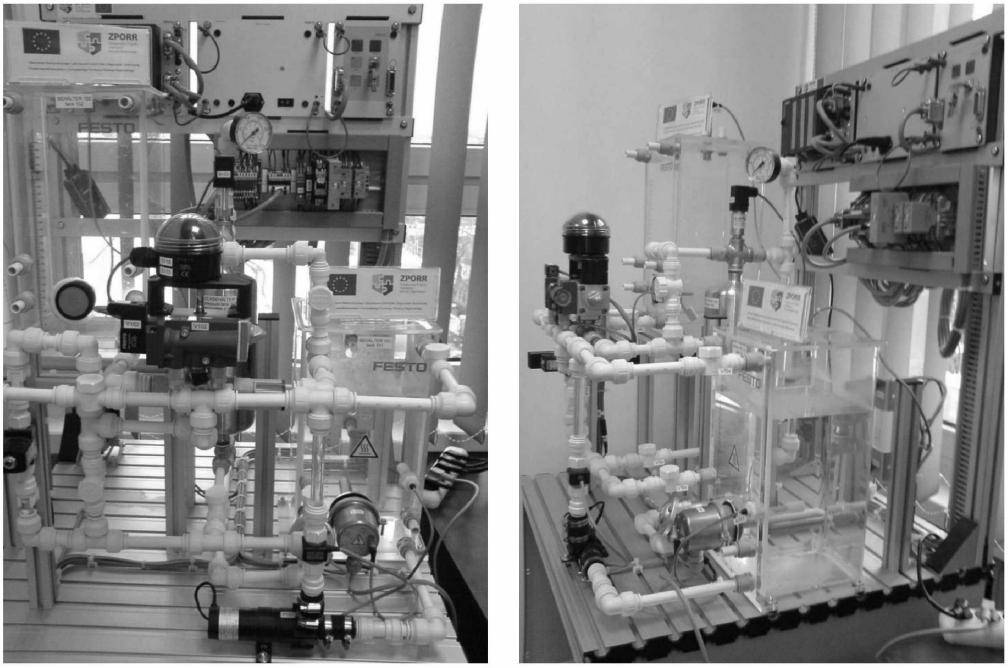
W niniejszym rozdziale przedstawiono, opracowany za pomocą pakietu MMNET i na podstawie [14.10], przykład diagnostycznego systemu doradczego dla symulatora procesu realizowanego przez obiekt techniczny, który stanowi fizyczną miniaturyzację instalacji przemysłowej stosowanej, np. w przemyśle chemicznym, spożywczym itp. Zidentyfikowano zbiór możliwych do rozpoznania stanów technicznych obiektu, przy czym uwzględniano zarówno proste jak i złożone stany techniczne. Przedstawiono sygnały, które powinny stanowić wystarczający nośnik informacji o stanie technicznym obiektu, a więc również o stanie procesu realizowanego przez ten obiekt.

W wyniku przeprowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych pozyskano zbiory danych uczących, które umożliwiły skonstruowanie systemu doradczego składającego się z modeli umieszczonych w 3 warstwach. Wszystkie modele diagnostyczne reprezentowano w postaci sieci stwierdzeń, przy czym ich strukturę i parametry określono z zastosowaniem odpowiednio algorytmu *K2* oraz *Junction Tree*. Na podstawie zgromadzonego zbioru danych testujących dokonano weryfikacji działania systemu i ustalono wartości wag dla opracowanych modeli diagnostycznych.

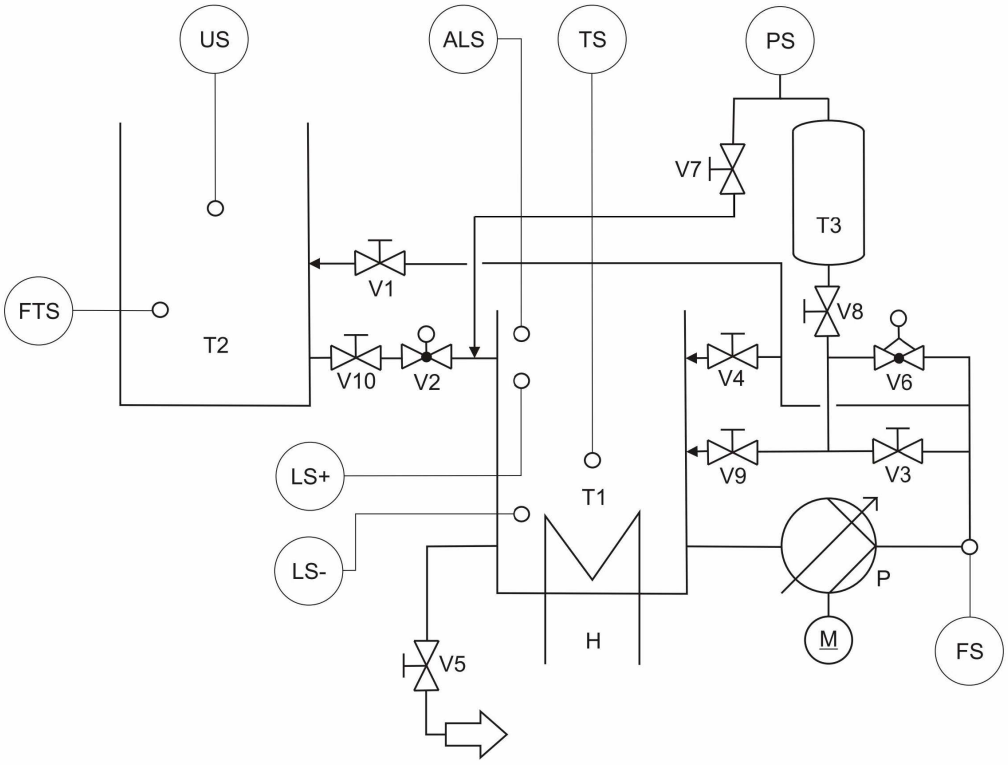
14.1. Rozpatrywany proces

Opracowany system doradczy umożliwia diagnostykę procesu realizowanego przez obiekt techniczny przedstawiony na rys. 14.1. Budowę obiektu w sposób schematyczny ilustruje rys. 14.2, przy czym nie pokazano na nim panelu sterowania, sterownika PLC, przyłączy wejść/wyjść cyfrowych i analogowych, przetworników sygnałów prąd–napięcie, częstotliwość–napięcie oraz termopara–napięcie.

Wymienione elementy, stanowiące układ sterowania działaniem obiektu, w ogólnym wypadku umożliwiają regulację jednej z czterech zmiennych procesowych: temperatury cieczy w zbiorniku T1, poziomu cieczy w zbiorniku T2, ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 oraz natężenia przepływu cieczy w miejscu zamontowania czujnika FS. Strukturę układu, który umożliwia regulację danej zmiennej procesowej uzyskuje się poprzez odpowiednią kombinację otwarcia/zamknięcia zaworów ręcznych V*i*. W związku z tym w trakcie działania obiektu czynności te musi wykonywać operator.



Rys. 14.1: FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C

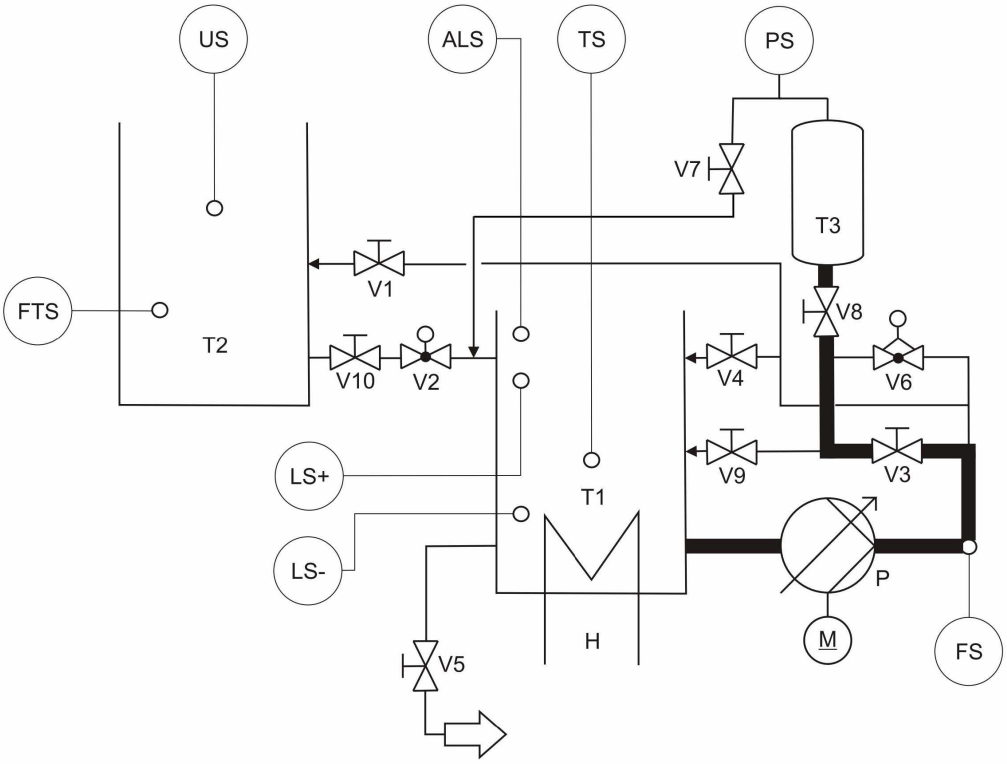


Rys. 14.2: Schemat rozpatrywanego obiektu technicznego (na podstawie [14.3])

gdzie:

ALS — przełącznik pływakowy poziomu alarmowego;
FS — czujnik natężenia przepływu cieczy;
FTS — przełącznik pływakowy;
H — grzałka;
LS- — czujnik zbliżeniowy dolny;
LS+ — czujnik zbliżeniowy górny;
M — silnik;
P — pompa odśrodkowa;
PS — czujnik ciśnienia;
T1, T2 — odpowiednio zbiornik dolny i górny;
T3 — zbiornik ciśnieniowy;
TS — czujnik temperatury;
US — ultradźwiękowy czujnik poziomu;
V2 — zawór kulowy;
V6 — zawór proporcjonalny;
V*i* — zawory ręczne (i = 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10; V5 — zawór spustowy).

Opracowany symulator procesu dotyczy regulacji ciśnienia powietrza w zbiorniku T3. Schemat przepływu cieczy podczas sprężania powietrza w zbiorniku T3 ilustruje rys. 14.3.



Rys. 14.3: Schemat przepływu cieczy podczas sprężania powietrza w zbiorniku T3

Działanie obiektu sterowane jest opracowanym przez autora programem, który wykonywany jest przez sterownik PLC. Po sprawdzeniu, że obiekt znajduje się w wymaganym stanie początkowym, tzn. wtedy, gdy:

- w zbiorniku dolnym T1 znajduje się minimalna ilość cieczy konieczna do zmiany stanu czujnika zbliżeniowego dolnego LS- z 0 na 1,
- w zbiorniku górnym T2 wysokość słupa cieczy wynosi 155 ± 5 mm,
- w zbiorniku ciśnieniowym T3 nie ma cieczy, a ciśnienie zawartego w nim powietrza jest równe ciśnieniu atmosferycznemu,
- temperatura cieczy w zbiorniku T1 wynosi około 20 °C,
- zawory ręczne Vj (j = 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9) są zamknięte,
- zawór kulowy V2 jest zamknięty,
- zawór proporcjonalny V6, pompa P oraz grzałka H są wyłączone,

operator obiektu otwiera zawory ręczne V3 i V8 (rys. 14.3) oraz naciska przycisk „Start" umieszczony na panelu sterowania. Następuje uruchomienie, na czas 20. sekund, pompy P i zwiększanie względnego ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 do wartości 200 mbar (poziomem odniesienia jest ciśnienie powietrza w otoczeniu obiektu). W celu osiągnięcia i ustabilizowania wymaganej wartości ciśnienia, zastosowano regulator PID.

W wyniku powyższej operacji do zbiornika T3 zostaje wtłoczona ze zbiornika dolnego T1 ściśle określona ilość cieczy. Tuż przed upływem 20. sekundy działania obiektu operator zamyka zawór ręczny V8. Po 20. sekundzie następuje wyłączenie pompy P i zatrzymanie działania obiektu. Powietrze w zbiorniku T3 zostało sprężone do wymaganego ciśnienia.

14.2. Zbiór rozpatrywanych stanów technicznych obiektu

Na podstawie analizy działania rozpatrywanego obiektu zidentyfikowano i przedstawiono w tab. 14.1 zbiór 4 prostych stanów technicznych (oprócz stanu bazowego wszystkie pozostałe stany techniczne dotyczą tylko jednego elementu obiektu). Zrezygnowano z rozpatrywania uszkodzeń toru pomiarowego, zarówno w odniesieniu do czujnika ciśnienia PS, natężenia przepływu FS jak i sterownika PLC, z uwagi na brak części ruchomych, które mogłyby ulec przyspieszonemu zużyciu.

Możliwe jest jednak wystąpienie złożonego stanu technicznego, tzn. przypadku gdy w tym samym czasie uszkodzone są co najmniej dwa elementy obiektu. W związku z tym liczba możliwych do detekcji prostych i złożonych stanów technicznych w rozpatrywanym przykładzie wynosi 12 (tab. 14.2).

Tab. 14.1: Lista możliwych do detekcji prostych stanów technicznych obiektu

ID	OPIS PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO
1.	Obiekt techniczny sprawny (stan bazowy)
2.	Pompa P nie pompuje (symulowane poprzez modyfikację programu sterującego działaniem obiektu)
3.	Przytkanie kanału pomiędzy zbiornikiem T1 i zbiornikiem ciśnieniowym T3 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite zamknięcie zaworu ręcznego V8)
4.	Nieszczelność zbiornika T3 (symulowana poprzez otwarcie zaworu ręcznego V7)

Tab. 14.2: Zbiór wszystkich rozpatrywanych stanów technicznych obiektu

ID	OPIS STANU TECHNICZNEGO
z_1	Stan bazowy (obiekt sprawny)
z_2	Pompa P pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny
z_3	Pompa P pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny
z_4	Pompa P pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny
z_5	Pompa P pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny
z_6	Pompa P pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny
z_7	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest szczelny
z_8	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny
z_9	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny
z_{10}	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny
z_{11}	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny
z_{12}	Pompa P nie pompuje, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny

14.3. Zbiór rozpatrywanych sygnałów diagnostycznych

Pozyskanie informacji o rozpatrywanych stanach technicznych obiektu jest możliwe m.in. poprzez pomiar przebiegu określonych wielkości fizycznych. Przedstawione na rys. 14.2 czujniki pomiarowe umożliwiają rejestrację wielu sygnałów. Na podstawie analizy działania rozpatrywanego obiektu można stwierdzić, że nie ma potrzeby obserwowania zmian wszystkich dostępnych do pomiaru wielkości fizycznych. W tab. 14.3 przedstawiono te sygnały, które powinny stanowić wystarczający nośnik informacji o rozważanych stanach technicznych badanego obiektu.

Tab. 14.3: Zbiór rozpatrywanych sygnałów

L.P.	RODZAJ SYGNAŁU
1.	Sygnał analogowy zmian wielkości sterowanej (prędkość obrotowa wirnika pompy P)
2.	Sygnał analogowy zmian ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 (uzyskiwany z czujnika ciśnienia PS)
3.	Sygnał analogowy zmian natężenia przepływu cieczy (uzyskiwany z czujnika natężenia przepływu cieczy FS)
4.	Sygnał cyfrowy upływu czasu (uzyskiwany z wewnętrznego zegara sterownika PLC)

14.4. Identyfikacja warstw modelu

Zagadnienie identyfikacji warstw modelu wielowarstwowego na ogół nie jest zadaniem prostym. W prezentowanym przykładzie zostało ono rozwiązane za pomocą języka UML, który posłużył do precyzyjnego i jednoznacznego opisu procesu realizowanego przez rozpatrywany obiekt techniczny.

Istnieje wiele pozycji literaturowych dotyczących języka UML, np. do najnowszych należą [14.2, 14.8, 14.11, 14.12]. W skrócie można powiedzieć, że jest to język formalny umożliwiający tworzenie zestawu diagramów, za pomocą których określana jest z różnych punktów widzenia struktura i/lub dynamika działania modeli reprezentujących realne obiekty z wybranego fragmentu otoczenia (np. osoby, przedmioty, jednostki organizacyjne, zdarzenia itp.).

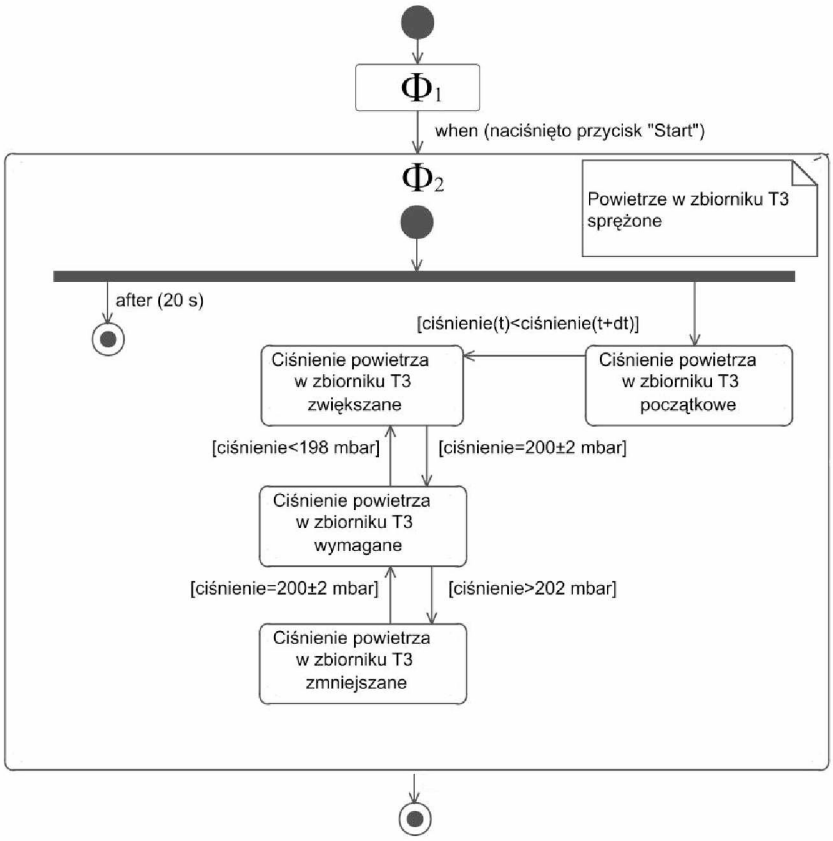
W wersji 2.0 języka UML wyróżniono trzynaście diagramów. Sześć z nich przeznaczonych jest do opisu struktury, natomiast pozostałe pozwalają opisać dynamikę (działanie) systemu. Jak pokazuje praktyka w wielu wypadkach stosowanie wszystkich diagramów lub nadmierna dokładność modelowania może prowadzić do zatracenia głównego celu w wyniku tak zwanej „gorączki" modelowania [14.1]. Poniżej przedstawiono pełny wykaz diagramów UML [14.11, 14.12]:

- diagramy opisujące strukturę systemu:
  - *diagram klas,*
  - *diagram obiektów,*
  - *diagram pakietów,*
  - *diagram komponentów,*
  - *diagram rozlokowania,*
  - *diagram struktur połączonych.*
- diagramy opisujące dynamikę systemu:
  - *diagram przypadków użycia,*
  - *diagram maszyny stanowej,*
  - *diagram czynności,*
  - *diagram sekwencji,*
  - *diagram komunikacji,*
  - *diagram harmonogramu,*
  - *diagram sterowania interakcją.*

Na rys. 14.4 do 14.6 przedstawiono opracowane diagramy UML opisujące przebieg rozpatrywanego procesu. W wyniku ich analizy przyjęto, że tworzony w systemie MMNET model diagnostyczny będzie składał się z następujących 3 warstw:

1. **Warstwa dotycząca stanu funkcjonalnego obiektu** — opisuje ją diagram maszyny stanowej (rys. 14.4). Rozróżnić można 3 podstawowe stany funkcjonalne obiektu:
   (a) postój,
   (b) sprężanie powietrza w zbiorniku T3,
   (c) niesprężanie powietrza w zbiorniku T3 (pomimo działania obiektu).
2. **Warstwa dotycząca działania wybranych elementów obiektu** — opisuje ją diagram czynności (rys. 14.5). Jak wspomniano wcześniej uszkodzenia czujników oraz sterownika PLC nie są rozpatrywane podczas formułowania diagnozy o stanie technicznym obiektu.

3. **Warstwa dotycząca harmonogramu działania wybranych elementów obiektu** — opisuje ją diagram harmonogramu (rys. 14.6), przedstawiający zmianę stanu funkcjonalnego wybranych elementów obiektu w funkcji czasu.



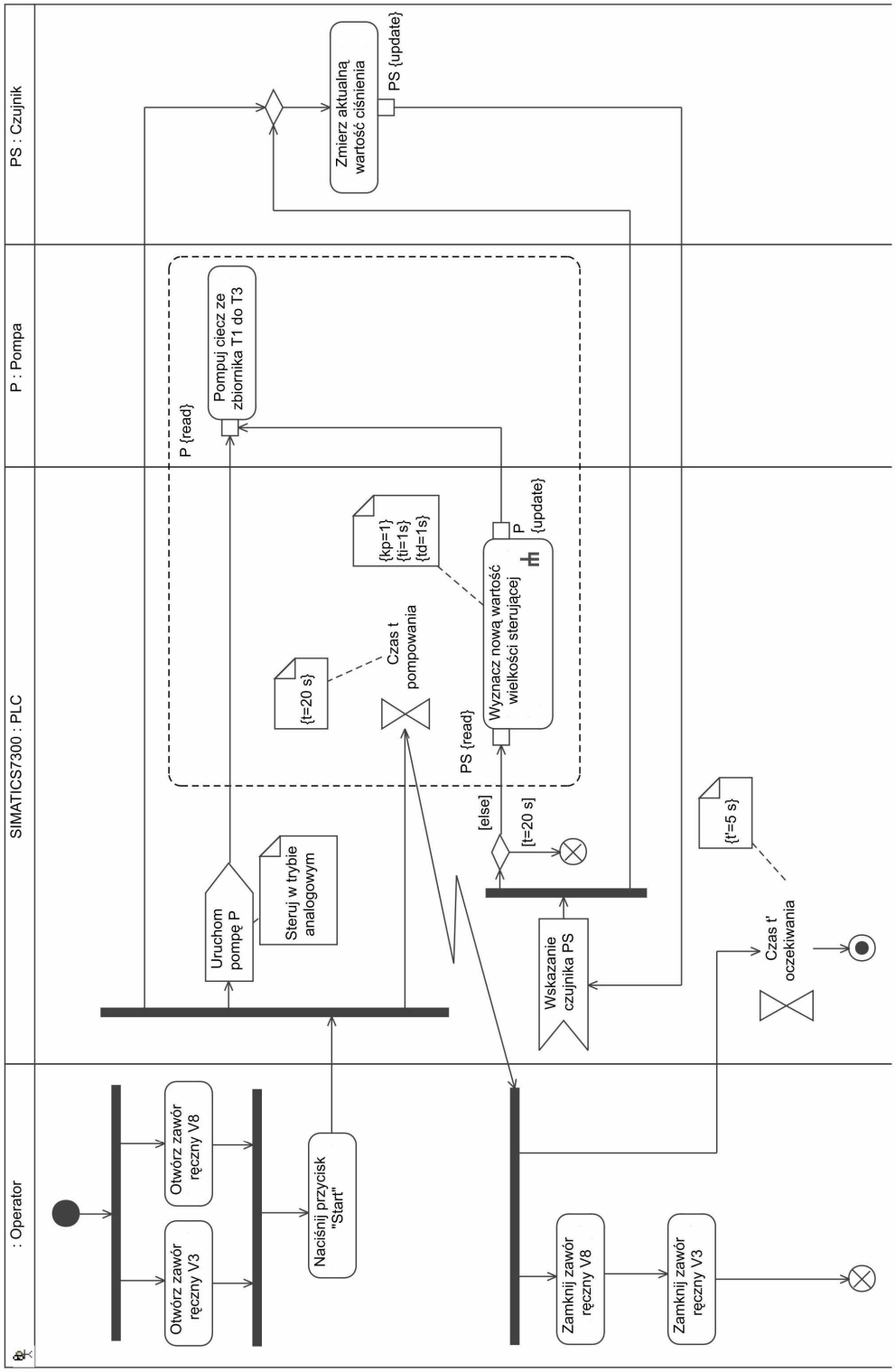
Rys. 14.4: Diagram maszyny stanowej

14.5. Identyfikacja zbioru cech sygnałów diagnostycznych

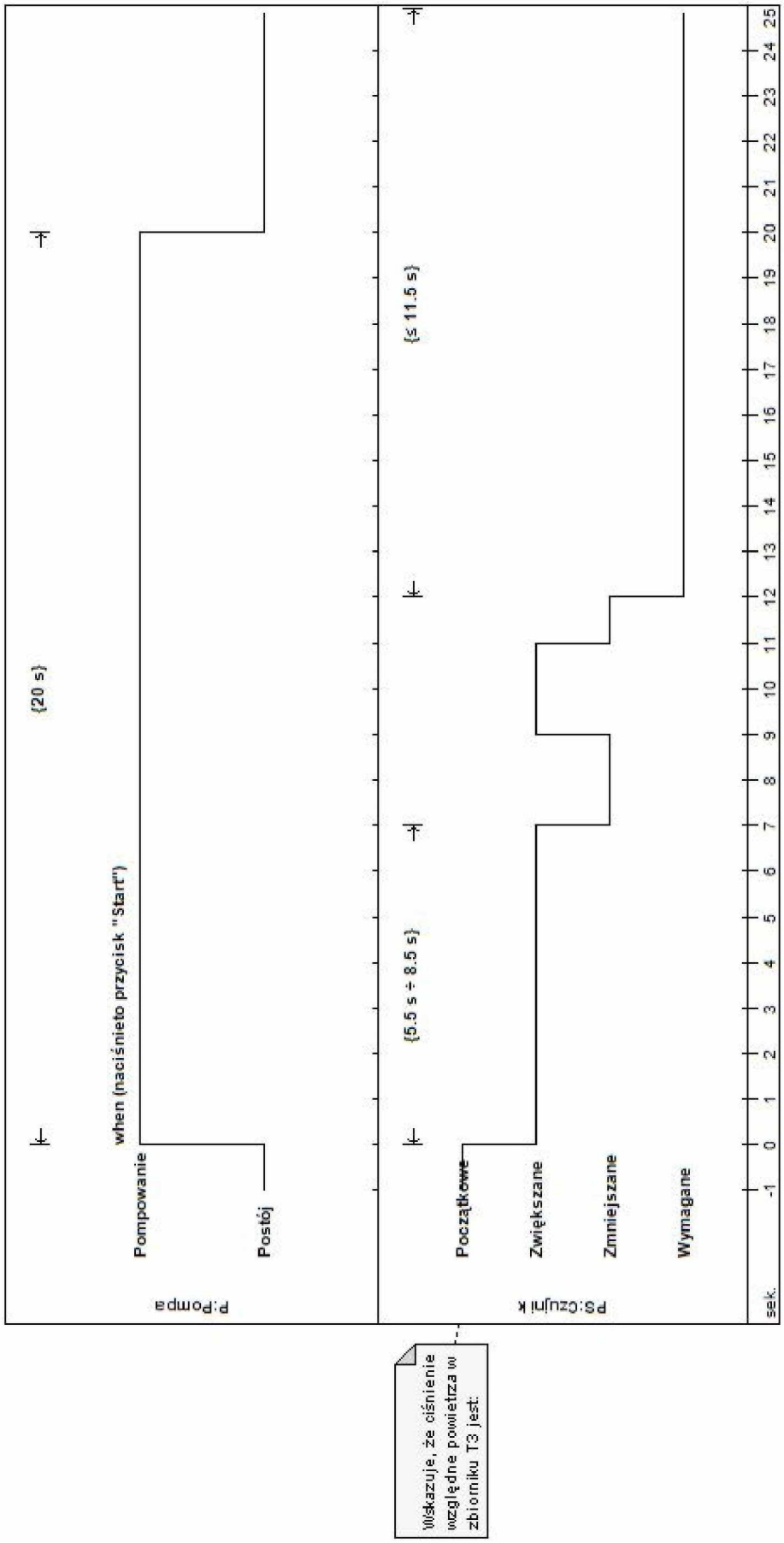
Warto zauważyć, że na podstawie opracowanych diagramów UML ułatwiona jest identyfikacja zbioru cech rozpatrywanych sygnałów diagnostycznych. Wyróżnione cechy sygnałów zostały przedstawione w tab. 14.4. Pierwszy indeks oznaczenia cechy sygnału dotyczy numeru warstwy, natomiast kolumna o nagłówku „**RYS.**" wskazuje numery rysunków (diagramów), na podstawie których określono rozpatrywane cechy.

Tab. 14.4: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych

OZN.	CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO	RYS.
$s_{1,1}$	Wzrastająca wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3	14.4
$s_{1,2}$	Malejąca wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3	14.4
$s_{1,3}$	Wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3	14.4
$s_{2,1}$	Wartość natężenia przepływu cieczy	14.5
$s_{2,2}$	Wartość wielkości sterującej	14.5
$s_{3,1}$	Czas zwiększania ciśnienia w zbiorniku T3	14.6



Rys. 14.5: Diagram czynności elementów obiektu



Rys. 14.6: Diagram harmonogramu działania elementów obiektu

14.6. Przygotowanie zbioru danych

Do niedawna pozyskiwanie zbioru danych dla celów diagnostycznych w przeważającej większości realizowane było na podstawie obserwacji obiektu bez modyfikowania w sposób zamierzony jego stanu technicznego (tzw. bierny eksperyment diagnostyczny). Jest to związane z potrzebą wzięcia pod uwagę kryteriów bezpieczeństwa oraz kosztów. Wynikający z tego długi czas badań można skrócić obserwując dużą liczbę podobnych obiektów.

Obecnie coraz częściej istnieje możliwość opracowywania dokładnych numerycznych modeli obiektów technicznych, które pozwalają wiernie symulować działanie danego obiektu. W związku z tym możliwe jest bezpieczne i niedrogie prowadzenie tzw. czynnych eksperymentów diagnostycznych. Polegają one na celowym wprowadzaniu uszkodzeń w badanym obiekcie, po to aby wykryć zewnętrzne objawy ich występowania.

W prezentowanym przykładzie rozpatrywany jest fizyczny model instalacji przemysłowej (rys. 14.1), a więc pozyskanie wiarygodnych danych jest wyjątkowo ułatwione. Przeprowadzone czynne eksperymenty diagnostyczne polegały na zarejestrowaniu sygnałów przedstawionych w tab. 14.3 dla wszystkich rozpatrywanych stanów technicznych obiektu (tab. 14.2), przy czym dla stanu bazowego zgromadzono 8 przykładów (dla innych stanów po 1 przykładzie).

Poszczególne przykłady zostały powielone proporcjonalnie do określonego w sposób subiektywny prawdopodobieństwa a priori zaistnienia danego stanu technicznego. Tak przygotowany zbiór danych stanowił podstawę do konstruowania w sposób automatyczny modeli diagnostycznych dla wybranych warstw systemu.

14.7. Modele diagnostyczne dla kolejnych warstw sytemu

Zdecydowano, że modele diagnostyczne dla kolejnych warstw systemu będą reprezentowane w postaci sieci bayesowskich (przekonań). Tworzenie modelu reprezentowanego w tej postaci polega na zdefiniowaniu zmiennych i relacji między nimi (określenie struktury sieci) oraz przyjęciu odpowiednich prawdopodobieństw a priori i prawdopodobieństw warunkowych.

W systemie MMNET zmienne reprezentowane są w postaci stwierdzeń, a więc zdań oznajmujących, którym można przypisać wartość logiczną („Prawda", „Fałsz") lub stopień przekonania o prawdziwości ich treści. W związku z powyższym opracowywanie modelu wielowarstwowego w systemie MMNET należy rozpocząć od przygotowania odpowiedniego słownika stwierdzeń, tzw. tezaurusa.

14.7.1. Słownik stwierdzeń

Na podstawie analizy rozpatrywanych stanów technicznych obiektu oraz cech sygnałów diagnostycznych opracowano zbiór 9 stwierdzeń. W tab. 14.5 przedstawiono ich treść oraz możliwe do przyjęcia wartości.

14.7.2. Określenie struktur sieci stwierdzeń

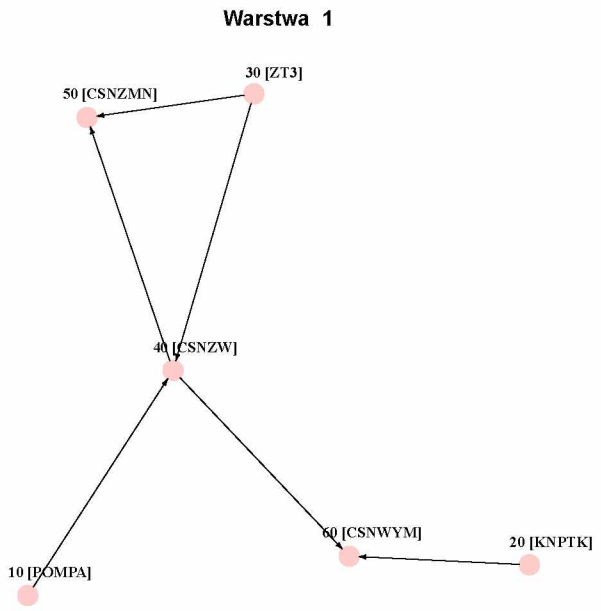
Identyfikację struktur sieci przekonań przeprowadzono w środowisku MATLAB z zastosowaniem dostępnej bezpłatnie biblioteki BNT [14.9]. Sformułowane stwierdzenia stanowią węzły sieci. W celu identyfikacji połączeń węzłów zastosowano algorytm K2 dla przygotowanego wcześniej zbioru danych. Aby móc skorzystać z tego algorytmu należy podać m.in. wybraną kolejność węzłów. Z uwagi na fakt niewielkiej liczby węzłów sieci w danej warstwie rozpatrywano wszystkie możliwe permutacje kolejności. W rezultacie, w wielu wypadkach, otrzymano kilka różnych struktur równoważnych sieci dla danej warstwy. Wybrano te, dla których pozyskanie wartości prawdopodobieństw warunkowych wydaje się najłatwiejsze (np. poprzez przyjęcie założenia, że

Tab. 14.5: Tezaurus dla rozpatrywanego przykładu

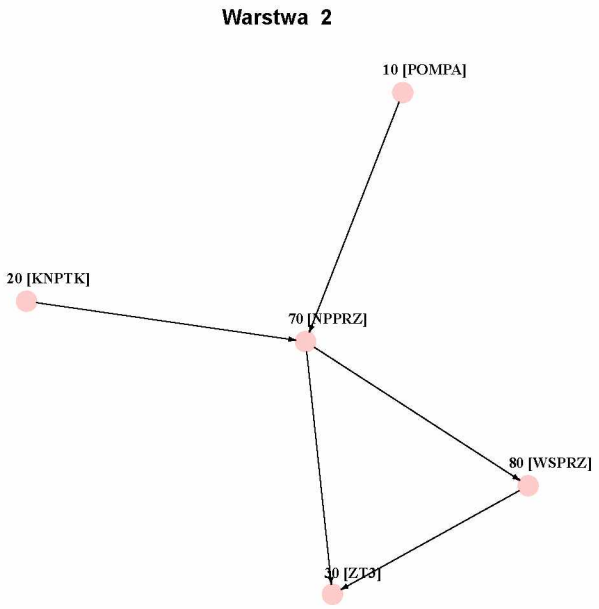
L.P.	TREŚĆ STWIERDZENIA	SKRÓCONA NAZWA	MOŻLIWE WARTOŚCI
1.	Pompa działa prawidłowo	POMPA	TAK/NIE
2.	Kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest przytkany	KNPTK	NIE/CZĘŚCIOWO/ CAŁKOWICIE
3.	Zbiornik T3 jest szczelny	ZT3	TAK/NIE
4.	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest zwiększane	CSNZW	TAK/NIE
5.	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest zmniejszane	CSNZMN	TAK/NIE
6.	Ciśnienie powietrza w zbiorniku T3 jest sprężone do wymaganej wartości	CSNWYM	TAK/NIE
7.	Wartość natężenia przepływu ma oczekiwany przebieg	NPPRZ	TAK/NIE
8.	Wartość wielkości sterowanej ma oczekiwany przebieg	WSPRZ	TAK/NIE
9.	Czas zwiększania ciśnienia w zbiorniku T3 jest dopuszczalny	CZWCSN	TAK/WARUNKOWO/NIE

węzeł dotyczący stwierdzenia odnoszącego się do wybranego elementu obiektu nie może być potomkiem węzła dotyczącego stwierdzania związanego z cechą sygnału diagnostycznego).

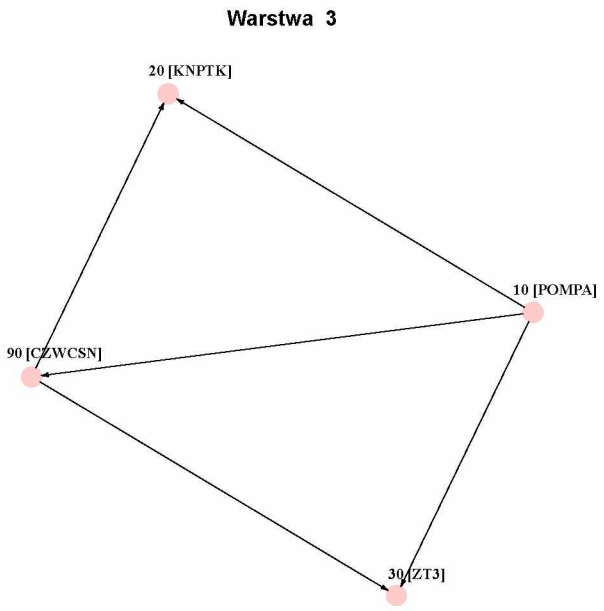
Na rys. 14.7 do 14.9 przedstawiono wybrane i zidentyfikowane w sposób automatyczny struktury sieci stwierdzeń.



Rys. 14.7: Struktura sieci stwierdzeń w warstwie 1



Rys. 14.8: Struktura sieci stwierdzeń w warstwie 2



Rys. 14.9: Struktura sieci stwierdzeń w warstwie 3

14.7.3. Określenie wartości prawdopodobieństw warunkowych

Wartości prawdopodobieństw warunkowych zostały zidentyfikowane w środowisku MATLAB. Po określeniu struktur sieci we wszystkich warstwach oraz mając do dyspozycji odpowiedni zbiór danych, dokonano wstępnego oszacowania poszukiwanych wartości prawdopodobieństw warunkowych w oparciu o rozkład Dirichleta (zakładając brak jakiejkolwiek wiedzy), a następnie zaktualizowano te wartości dzięki zastosowaniu algorytmu z grupy Junction Tree (informacje na temat tej klasy algorytmów można znaleźć np. w [14.5, 14.6, 14.7]).

W prezentowanym przykładzie nie ma potrzeby wstępnego oszacowania wartości prawdopodobieństw warunkowych, ponieważ przygotowany zbiór danych zawierał przykłady dotyczące wszystkich rozpatrywanych stanów technicznych obiektu. Gdyby przygotowany zbiór danych nie zawierał przykładów dotyczących pewnego stanu technicznego obiektu, co mogłoby wynikać, np. z potrzeby ograniczenia rozmiaru zbioru, to prawdopodobieństwo wystąpienia takiego stanu w tworzonej sieci, byłoby równe zeru (zgodnie ze sposobem określania prawdopodobieństwa na podstawie częstości występowania zdarzeń). Chcąc uniknąć takiego błędu dobrym zwyczajem jest wstępne oszacowanie prawdopodobieństw warunkowych na podstawie rozkładu Dirichleta lub rozkładu beta dla zmiennych binarnych [14.4].

14.7.4. Określenie wartości wag modeli

W systemie MMNET tworzona jest w sposób automatyczny, tzn. bez udziału użytkownika, warstwa specjalna (tzw. warstwa zerowa), w której ulokowane są stwierdzenia z wszystkich sieci znajdujących się w zdefiniowanych wcześniej warstwach. Stwierdzeniom zawartym w warstwie zerowej przypisane są zagregowane wartości stopni przekonań o prawdziwości tych stwierdzeń, przy czym wybranym operatorem agregacji jest średnia ważona. Oznacza to, że użytkownik systemu może wpływać na wynik końcowy poprzez modyfikację wartości wag przypisanych do modeli ulokowanych w danej warstwie.

Wartości wag dla warstw, w których znajdują się opracowane sieci stwierdzeń zostały określone na podstawie analizy wyników uzyskiwanych z tych sieci. Utworzono dwa podzbiory danych:

- podzbiór danych wzorcowych, który zawierał znane wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzeń dotyczących pompy P, kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 oraz zbiornika T3 w odniesieniu do kolejnych przykładów zawartych w zbiorze danych wejściowych,
- podzbiór wyników uzyskiwanych z sieci stwierdzeń znajdujących się w opracowanych warstwach modelu dla kolejnych przykładów zawartych w zbiorze danych wejściowych.

Zbiór danych wejściowych stanowił zbiór pojedynczych przykładów dotyczących rozpatrywanych stanów technicznych obiektu (punkt 14.6).

W tab. 14.6 i 14.7 przedstawiono przykład ukazujący wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia, że zbiornik T3 jest szczelny odpowiednio dla podzbioru danych wzorcowych i podzbioru uzyskanych wyników.

Tab. 14.6: Wzorcowe wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia, *Zbiornik T3 jest szczelny* wtedy, gdy zbiornik T3 był nieszczelny

	WARTOŚCI STOPNI PRZEKONAŃ DLA SIECI STWIERDZEŃ		
WARTOŚĆ STWIERDZENIA	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
TAK	0	0	0
NIE	1	1	1

Tab. 14.7: Uzyskane wartości stopni przekonań o prawdziwości stwierdzenia, *Zbiornik T3 jest szczelny* wtedy, gdy zbiornik T3 był nieszczelny (wartości zaokrąglono)

	WARTOŚCI STOPNI PRZEKONAŃ DLA SIECI STWIERDZEŃ		
WARTOŚĆ STWIERDZENIA	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
TAK	0.04	0.01	0.73
NIE	0.96	0.99	0.27

Chcąc określić odchyłki uzyskanych wartości stopni przekonań od wartości wzorcowych przyjęto, że wartości stopni przekonań stanowią współrzędne punktów w przestrzeni wielowymiarowej. Następnie obliczono odległości (metryka euklidesowa) pomiędzy tymi punktami. Dla prezentowanego przykładu uzyskane odchyłki wynoszą $[0.057, 0.014, 1.032]$. Dokonując analogicznych działań dla kolejnych przykładów znajdujących się w zbiorze danych wejściowych oraz dodając odchyłki dotyczące stwierdzeń odnoszących się do pompy P, kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 oraz zbiornika T3, otrzymano sumaryczny błąd (tab. 14.8) generowany przez sieci stwierdzeń z kolejnych warstw.

Tab. 14.8: Sumaryczny błąd generowany przez opracowane sieci dla rozpatrywanych stwierdzeń

	SUMARYCZNY BŁĄD DLA SIECI STWIERDZEŃ		
TREŚĆ STWIERDZENIA	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
Pompa działa prawidłowo	9.2059	8.0652	9.9084
Kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest przytkany	9.2866	9.5333	8.4639
Zbiornik T3 jest szczelny	6.9629	5.6851	7.7255
Σ	**25.4554**	**23.2836**	**26.0978**

Jasne jest, że sieć stwierdzeń, która generuje najmniejszy błąd powinna mieć największą wagę. W związku z tym zdecydowano, że wartości wag dla opracowanych sieci będą wyznaczone na podstawie następującej zależności:

$$W = \frac{C}{\Sigma}$$

gdzie C to dowolna stała. Po przyjęciu $C = 100$ i zaokrągleniu wyników otrzymano wektor następujących wag dla kolejnych sieci stwierdzeń $[3.93, 4.30, 3.83]$.

14.8. Weryfikacja systemu

Weryfikację opracowanego w systemie MMNET diagnostycznego systemu doradczego przeprowadzono z zastosowaniem metody resubstytucji. W większości wypadków prowadzi to do zawyżania wyników oceny jakości modelu, jednak dla rozpatrywanego obiektu wpływ czynników zakłócających jego działanie jest nieistotny a wprowadzenie do danych odpowiedniego szumu nie jest proste. Oznacza to, że dane testujące pozyskane w wyniku powtórzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych nie będą różniły się w sposób istotny statystycznie od danych, na podstawie których opracowywano modele. Ponadto wystąpienie stanu technicznego, który nie został uwzględniony podczas identyfikacji modeli sieci stwierdzeń jest mało prawdopodobne.

Diagnoza klasyfikowana jest jako trafna, jeżeli uzyskany stopień przekonania o prawdziwości danego stwierdzenia różni się od wartości wzorcowej nie więcej niż o 0.4. Biorąc pod uwagę przykładowe wyniki przedstawione w tab. 14.7 należy stwierdzić, że dla opracowanych sieci stwierdzeń błędy wynoszą odpowiednio 0.04, 0.01, 0.73, a więc diagnoza jest trafna tylko dla dwóch pierwszych sieci.

Diagnoza klasyfikowana jest jako nietrafna, jeżeli popełniony zostanie jeden z następujących błędów:

- **B1** — niewskazanie istniejącego uszkodzenia (np. model z warstwy nr 3 w przykładzie przedstawionym w tab. 14.7),
- **B2** — wskazanie nieistniejącego uszkodzenia.

W tab. 14.9 przedstawiono procentową trafność określania stanu technicznego pompy P, kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 oraz zbiornika T3 (wyniki zostały zaokrąglone „w dół") a także procent popełnionych błędów typu **B1** i **B2** (zaokrąglone „w górę"). Kolumna **N** określa liczbę niesprawnych elementów obiektu.

Tab. 14.9: Trafność diagnoz formułowanych przez opracowany system diagnostyczny dla rozpatrywanego symulatora procesu

N	**TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, %**			**B1, %**	**B2, %**
	Pompa P	**Kanał T1T3**	**Zbiornik T3**		
0	100	100	100	0	0
1	50	50	100	25	9
2	20	0	40	74	7
3	0	0	0	100	0

Analizując wyniki uzyskane z opracowanego modelu należy stwierdzić, że nie działa on w sposób zadowalający zwłaszcza w odniesieniu do złożonych stanów technicznych, tzn. wtedy, gdy uszkodzone są co najmniej 2 elementy obiektu.

Z tab. 14.8 wynika, że nie można jednoznacznie stwierdzić, który model daje najlepsze wyniki, np. do orzekania o stanie technicznym pompy najlepszy wydaje się model z warstwy 2 ale w odniesieniu do kanału pomiędzy zbiornikami najlepsze wyniki otrzymuje się najczęściej z modelu ulokowanego w warstwie 3. W tab. 14.10 przedstawiono kolejność modeli pod względem trafności diagnoz dotyczących stanu technicznego pompy P w odniesieniu do wszystkich przykładów zawartych w zbiorze danych wejściowych.

Tab. 14.10: Lokaty modeli pod względem trafności diagnoz dotyczących stanu technicznego pompy P

	LOKATA SIECI STWIERDZEŃ		
L.P.	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
1	1	1	2
2	2	1	3
3	1	1	2
4	3	1	2
5	2	3	1
6	2	3	1
7	2	1	3
8	2	1	3
9	2	1	3
10	2	1	3
11	2	1	3
12	2	1	3

Na tej podstawie możliwe jest określenie prawdopodobieństw zajęcia określonego miejsca przez opracowane modele (tab. 14.11), a następnie obliczenie wartości oczekiwanych dla tak zdefiniowanych zmiennych dyskretnych, które w prezentowanym przykładzie wynoszą odpowiednio $\left[1\frac{11}{12}, 1\frac{1}{3}, 2\frac{5}{12}\right]$.

Tab. 14.11: Prawdopodobieństwa zajęcia określonej lokaty przez opracowane sieci

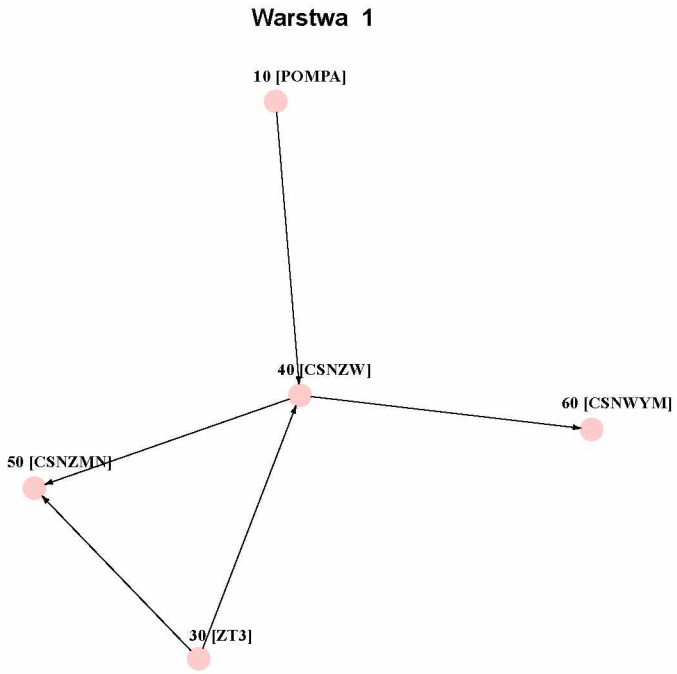
	PRAWDOPODOBIEŃSTWA DLA SIECI STWIERDZEŃ		
MIEJSCE	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
1	$\frac{1}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{6}$
2	$\frac{3}{4}$	0	$\frac{1}{4}$
3	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{7}{12}$

W tab. 14.12 przedstawiono obliczone wartości oczekiwane zajęcia przez sieci z kolejnych warstw określonego miejsca po przeprowadzeniu analogicznych działań w odniesieniu do kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 oraz zbiornika T3.

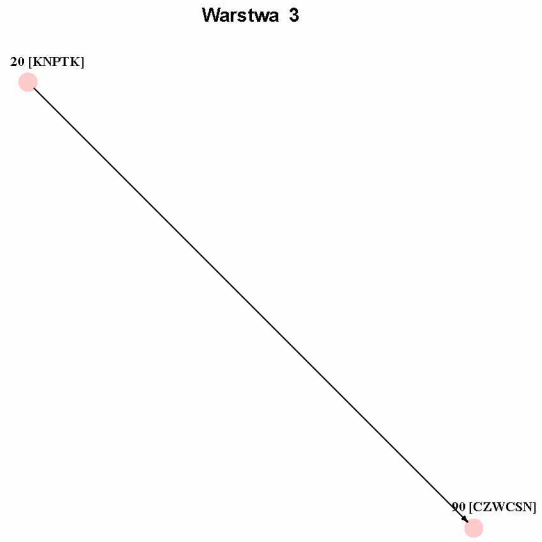
Tab. 14.12: Wartości oczekiwane zajęcia danego miejsca przez opracowane sieci ze względu na trafność określania wartości rozpatrywanych stwierdzeń

	WARTOŚĆ OCZEKIWANA MIEJSCA SIECI STWIERDZEŃ		
TREŚĆ STWIERDZENIA	**Warstwa W1**	**Warstwa W2**	**Warstwa W3**
Pompa działa prawidłowo	$1\frac{11}{12}$	$1\frac{1}{3}$	$2\frac{5}{12}$
Kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest przytkany	$2\frac{1}{3}$	2	$1\frac{2}{3}$
Zbiornik T3 jest szczelny	$2\frac{1}{12}$	$1\frac{2}{3}$	$2\frac{1}{4}$

Na podstawie analizy otrzymanych wyników zdecydowano, że z sieci stwierdzeń znajdującej się w warstwie 1 usunięty zostanie węzeł dotyczący kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 a z sieci z warstwy 3 stwierdzenia dotyczące zarówno pompy P jak i zbiornika T3. Na rys. 14.10 i 14.11 przedstawiono nowe struktury sieci stwierdzeń w tych warstwach, które uzyskano dzięki zastosowaniu algorytmu K2. Tak samo jak poprzednio wartości prawdopodobieństw warunkowych w tych sieciach określono za pomocą algorytmu z grupy Junction Tree.



Rys. 14.10: Zmodyfikowana struktura sieci stwierdzeń w warstwie 1



Rys. 14.11: Zmodyfikowana struktura sieci stwierdzeń w warstwie 3

Biorąc pod uwagę fakt, że sieć z warstwy 3 umożliwia wyłącznie diagnozę stanu technicznego kanału pomiędzy zbiornikami, przy czym jak wynika z tabeli 14.12 diagnoza ta jest statystycznie bardziej pewna niż dla sieci z warstwy 2, zatem sieć z warstwy 3 musi mieć największą wagę.

Waga sieci z warstwy 2 może zostać określona procentowo w odniesieniu do wagi sieci z warstwy 3 jako stosunek odpowiednich wartości oczekiwanych, tzn. $1\frac{2}{3} : 2 = \frac{5}{6}$. Podobnie waga sieci z warstwy 1 może zostać określona procentowo w odniesieniu do wagi sieci z warstwy 2 jako średnia arytmetyczna stosunku odpowiednich wartości oczekiwanych, tzn. $\left(1\frac{1}{3} : 1\frac{11}{12} + 1\frac{2}{3} : 2\frac{1}{12}\right)/2$

Przyjmując dla sieci z warstwy 3 wagę równą 1 otrzymuje się wagi dla sieci z warstw 2 i 1 równe odpowiednio $\frac{5}{6}$ oraz $\frac{43}{69}$. Po przeprowadzeniu weryfikacji zmodyfikowanego diagnostycznego systemu doradczego otrzymano znacznie lepsze wyniki niż poprzednio. Zostały one przedstawione w tab. 14.13. Podobnie jako poprzednio wyniki zostały zaokrąglone „w dół" a błędy „w górę".

Tab. 14.13: Trafność diagnoz formułowanych przez zmodyfikowany system diagnostyczny dla rozpatrywanego symulatora procesu

N	TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, %			B1, %	B2, %
	Pompa P	Kanał T1T3	Zbiornik T3		
0	100	100	100	0	0
1	75	50	100	17	9
2	80	0	60	47	7
3	100	0	0	67	0

14.9. Wnioski

Wyniki uzyskiwane z opracowanego diagnostycznego systemu doradczego dla prezentowanego symulatora procesu są zadowalające. Skonstruowany model dobrze rozpoznaje proste stany techniczne i niektóre stany złożone. Wraz ze wzrostem liczby niesprawnych elementów obiektu trafność diagnozy maleje, szczególnie w odniesieniu do kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3. Zmniejszona trafność diagnozy dotycząca złożonych stanów technicznych obiektu wynika z faktu występowania identycznych symptomów jak dla określonych stanów prostych. Wykrycie przytkania kanału lub nieszczelności zbiornika przy niesprawnej pompie jest praktycznie niemożliwe na podstawie dostępnych sygnałów diagnostycznych. Oznacza to istotny wzrost wartości błędu **B1**, tzn. niewykrycia istniejącego uszkodzenia.

Obecnie nie jest znana ogólna metoda, która umożliwiałaby rozróżnianie takich stanów. Najczęściej formułowana diagnoza powinna wskazywać wystąpienie najbardziej prawdopodobnego stanu technicznego, a więc stanu, w którym niesprawny lub uszkodzony jest jest tylko 1 element obiektu.

Przedstawiony przykład konstruowania sieci wielowarstwowej za pomocą pakietu MMNET ukazuje w wyraźny sposób jak ważne jest poprawne zrozumienie zasady działania tego typu sieci. Konstruowanie modelu w sposób rutynowy może prowadzić do wyników, które będą znacznie odbiegały od oczekiwań. Chcąc uniknąć wystąpienia takiej sytuacji należy bardzo starannie rozważyć, które stwierdzenia powinny znaleźć się w danej warstwie. Jak dowodzi prezentowany przykład nie zawsze korzystne jest uwzględnianie wszystkich stwierdzeń dotyczących elementów obiektu w każdej warstwie.

Bibliografia

[14.1] Bell Alex. E. Death by uml fever. *Queue*, 2(1):72–80, March 2004.

[14.2] Bruegge Bernd, Dotoit Allen H. *Object-oriented software engineering. Using UML, patterns, and Java (3rd Edition)*. Pearson Education, Inc., NJ, 2010.

[14.3] FESTO. Stanowisko PCS. Dokumentacja techniczna.

[14.4] Gelman Andrew, Carlin John B., Stern Hal S., Rubin Donald B. *Bayesian Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 2004.

[14.5] Huang Cecil, Darwiche Adnan. Inference in belief networks: A procedural guide. *International Journal of Approximate Reasoning*, 15(3):225–263, 1996.

[14.6] Lauritzen Steffen L., Spiegelhalter David J. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal of the Royal Statistical Society*, 50(2):157–224, 1988.

[14.7] Madsen A. L., Nilsson D. Solving influence diagrams using hugin, shafer–shenoy and lazy propagation. *Proceedings of the Seventeenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, strony 337–345, 2001.

[14.8] Miles Russ, Hamilton Kim. *Learning UML 2.0*. O'Reilly Media, Inc., CA, 2006.

[14.9] Murphy Kevin. `http://code.google.com/p/bnt/`, luty 2010.

[14.10] Skupnik Damian. *Wieloaspektowe modele diagnostyczne*. Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 140. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009.

[14.11] Śmiałek Michał. *Zrozumieć UML 2.0. Metody modelowania obiektowego*. Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2005.

[14.12] Wrycza Stanisław, Marcinkowski Bartosz, Wyrzykowski Krzysztof. *Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych*. Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2005.