Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

# Wieloaspektowe modele diagnostyczne

Damian SKUPNIK

Gliwice 2009

*Recenzenci*
Prof. dr hab. inż. Jan Maciej Kościelny, Politechnika Warszawska
Prof. dr hab. Wojciech Moczulski, Politechnika Śląska

*Redaktor zeszytów*
Wojciech Cholewa

*Redaktor techniczny*
Marek Wyleżoł

*Projekt okładki*
Wojciech Cholewa, Marek Wyleżoł

*BibTeX*
```
@BOOK{, title = {Wieloaspektowe modele diagnostyczne}, publisher =
{Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn}, year = {2009},
author = {Skupnik, D.}, volume = {140}, series = {Zeszyty}, address =
{Gliwice}}
```

Praca finansowana częściowo ze środków na naukę w latach 2006-2010, jako fragmenty projektów badawczych 4 T07B 042 30 i N N504 478434.

**ISBN 978-83-60759-12-7**

*Wydawca*
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice
tel. (032) 237-14-67, fax (032) 237-13-60
http://kpkm.polsl.pl

---

Druk i oprawa (z dostarczonych materiałów):
Drukarnia cyfrowa D&D sp. z o.o. ul. Moniuszki 6, 44-100 Gliwice

# Od autora

Zeszyt został opracowany na podstawie rozprawy doktorskiej, którą wykonałem pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Wojciecha Cholewy. Publiczna obrona rozprawy odbyła się 7 lipca 2009 roku przed Komisją powołaną przez Radę Wydziału Mechanicznego Technologicznego.

Składam serdeczne podziękowania Recenzentom rozprawy, Prof. dr. hab. inż. Janowi Maciejowi Kościelnemu oraz Prof. dr. hab. Wojciechowi Moczulskiemu za cenne uwagi, które starałem się uwzględnić w niniejszym zeszycie.

Dziękuję Promotorowi oraz Koleżankom i Kolegom z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej za pomoc w przeprowadzeniu badań oraz cenne sugestie umożliwiające poprawę jakości treści rozprawy. Szczególnie zaś dziękuję mojej żonie, Jadwidze, za okazaną wyrozumiałość i cierpliwość.

Gliwice, lipiec 2009 Damian Skupnik

# Spis treści

**Od autora** **3**

**1 Wprowadzenie** **7**

**2 Modele diagnostyczne** **11**
2.1 Odwrotny model obiektu . . . 11
2.2 „Czarna skrzynka" . . . 14
2.2.1 Wybór postaci modelu . . . 16
2.2.2 Przykładowe postacie modelu . . . 18
2.2.3 Identyfikacja modelu . . . 22
2.2.4 Eksperymenty diagnostyczne . . . 23
2.3 Wielomodel diagnostyczny . . . 23
2.3.1 Rodzaje wielomodeli . . . 23
2.3.2 Łączenie wyjść modeli składowych . . . 25

**3 Geneza badań** **27**
3.1 Język UML . . . 28
3.1.1 Diagramy UML . . . 28
3.1.2 Reprezentacja warunków i ograniczeń . . . 29
3.1.3 Ograniczenie zastosowania języka UML . . . 29
3.2 Identyfikacja i reprezentacja aspektów . . . 30
3.3 Cel badań . . . 31
3.4 Tezy rozprawy . . . 32

**4 Metoda tworzenia wieloaspektowego modelu diagnostycznego** **33**
4.1 Identyfikacja zbioru stanów technicznych obiektu . . . 33
4.2 Opis działania obiektu w języku UML . . . 34
4.3 Zbiór cech sygnałów diagnostycznych . . . 34
4.4 Tworzenie modeli aspektowych . . . 35
4.5 Określenie wyjścia modelu wieloaspektowego . . . 36
4.6 Postać ogólna modelu wieloaspektowego . . . 36

**5 Przykład zastosowania opracowanej metody** **39**
5.1 Wybrany obiekt badań . . . 39
5.2 Działanie rozpatrywanego obiektu . . . 41
5.2.1 Stan funkcjonalny $\phi_1$ . . . 41
5.2.2 Stan funkcjonalny $\phi_2$ . . . 42
5.2.3 Stan funkcjonalny $\phi_3$ . . . 43
5.2.4 Stan funkcjonalny $\phi_4$ . . . 43
5.2.5 Stan funkcjonalny $\phi_5$ . . . 43
5.2.6 Stan funkcjonalny $\phi_6$ . . . 43

5.2.7 Stan funkcjonalny $\phi_7$ . . . 45
5.2.8 Stan funkcjonalny $\phi_8$ . . . 45
5.2.9 Stan funkcjonalny $\phi_9$ . . . 45
5.3 Konstruowanie modelu wieloaspektowego . . . 47
5.3.1 Identyfikacja zbioru stanów technicznych obiektu . . . 47
5.3.2 Opis działania obiektu w języku UML . . . 50
5.3.3 Identyfikacja zbioru cech sygnałów diagnostycznych . . . 50
5.3.4 Tworzenie modeli aspektowych . . . 50
5.3.5 Określenie wyjścia modelu wieloaspektowego . . . 52
5.3.6 Postać opracowanego modelu wieloaspektowego . . . 56

**6 Weryfikacja opracowanego modelu 57**

**7 Porównanie wyników 63**
7.1 Globalny model diagnostyczny w wersji 1. . . . 63
7.2 Globalny model diagnostyczny w wersji 2. . . . 66
7.3 Globalny model diagnostyczny w wersji 3. . . . 69
7.4 Omówienie uzyskanych wyników . . . 71

**8 Podsumowanie 73**
8.1 Wnioski . . . 73
8.2 Kierunki dalszych badań . . . 74

**Dodatek A. Zidentyfikowane zbiory stanów technicznych obiektu 75**

**Dodatek B. Opisy rozpatrywanych stanów technicznych obiektu 81**

**Dodatek C. Opis działania obiektu w języku UML 91**

**Dodatek D. Zidentyfikowane zbiory cech sygnałów diagnostycznych 107**

**Bibliografia 115**

**Streszczenie 116**

**Abstract 117**

# Rozdział 1

# Wprowadzenie

Początki działalności technicznej człowieka związane są z wytwarzaniem najprostszych narzędzi kamiennych umożliwiających zaspokajanie podstawowych potrzeb (np. zdobywanie pożywienia). Wraz z rozwojem cywilizacji pojawiały się nowe potrzeby a wraz z nimi środki techniczne, które pozwalały realizować coraz bardziej odpowiedzialne zadania.

Nowoczesne obiekty techniczne oceniane są nie tylko na podstawie ich cech utylitarnych. Wymagana jest także duża niezawodność, bezpieczeństwo w użytkowaniu oraz możliwie niewielki negatywny wpływ na środowisko. Nie bez znaczenia jest również estetyka i niski koszt. Wymienione cechy determinują jakość środka technicznego.

Poprawnie zaprojektowany, skonstruowany, wytworzony i eksploatowany obiekt techniczny jest bezpieczny dla użytkownika i otoczenia wtedy, gdy jest sprawny. Wówczas jego stosowanie nie generuje dodatkowych kosztów. Chcąc utrzymać dany obiekt możliwie długo w wymaganym stanie technicznym, nie należy stosować wyłącznie podejścia obsługowo-naprawczego. Konieczne jest prowadzenie odpowiednich działań profilaktycznych (np. regulacja, wymiana zużytych elementów obiektu). Dzięki temu można zapobiec wystąpieniu niebezpiecznych i kosztownych awarii.

W związku z powyższym istnieje potrzeba opracowywania obiektywnych metod i środków, za pomocą których możliwe jest określanie szeroko rozumianego stanu technicznego różnych obiektów bez ich zatrzymywania lub demontażu. Zaspokajaniem tej potrzeby zajmuje się dziedzina wiedzy zwana *diagnostyką techniczną* [5]. Ze względu na obiekt badania wyróżnia się dwa podstawowe działy tej dziedziny wiedzy:

- diagnostykę maszyn (urządzeń);
- diagnostykę procesów.

Warto zauważyć, że niezależnie od rozpatrywanego obiektu, istotną informację stanowi nie tylko znajomość aktualnego stanu technicznego ale także wiedza o przyczynach zaistnienia tego stanu i przede wszystkim wiedza o prawdopodobnym przyszłym stanie technicznym. A zatem podstawowe zadania diagnostyki technicznej to [5]:

- *genezowanie*, czyli określanie przeszłych stanów technicznych obiektu, które determinują stan bieżący;
- *diagnozowanie*, czyli określanie aktualnego stanu technicznego obiektu, który determinuje przyszły stan;
- *prognozowanie*, czyli określanie przyszłego stanu technicznego obiektu na podstawie znajomości stanu bieżącego.

Najważniejszym zadaniem jest diagnozowanie. W zależności od rozpatrywanego obiektu w procesie diagnozowania można wyróżnić dwie [65] lub trzy fazy [39]. Rozpoznawanie bieżącego stanu technicznego w odniesieniu do maszyn lub urządzeń polega na wykonaniu działań umożliwiających

detekcję ewentualnej niesprawności (tzn. wykrycie wadliwego działania lub niedziałania obiektu), a w razie otrzymania wyniku pozytywnego, również jej zlokalizowania. Lokalizacja niesprawności sprowadza się do wskazania wadliwych, np. zużytych, elementów obiektu.

Jeżeli diagnozowany jest proces przemysłowy, to po detekcji i lokalizacji uszkodzeń (w diagnostyce procesów rozpatrywane są uszkodzenia a nie niesprawności) występuje faza identyfikacji uszkodzenia, tzn. określenie jego rozmiaru i charakteru zmienności w czasie [39].

Diagnozowanie jest możliwe na podstawie obserwacji i analizy dostępnych sygnałów diagnostycznych, przy czym pojęcie *sygnał diagnostyczny* rozumiane jest jako przebieg dowolnej wielkości, będącej nośnikiem informacji o stanie technicznym rozpatrywanego obiektu [19]. W wyniku takiego działania powinno być możliwe stwierdzenie obecności symptomów, świadczących np. o niesprawności, lub ich braku, gdy obiekt jest zdatny do użytkowania. Wykrycie symptomu polega na stwierdzeniu zgodności chwilowych wartości cech sygnałów diagnostycznych z odpowiednim wzorcem wartości tych cech dla rozpatrywanego stanu technicznego [14].

Wzorce wartości cech sygnałów diagnostycznych definiuje się w różny sposób, np. za pomocą wartości granicznych, wartości średnich, obszarów akceptacji [17], krzywych ROC [78, 77], norm, zaleceń, doświadczenia czy opinii specjalistów. Należy przy tym pamiętać, że indolentne posługiwanie się normami może doprowadzić do zbędnych remontów lub dużej liczby awarii. W pierwszym wypadku spowodowane jest to przyjęciem zbyt niskiej wartości granicznej, natomiast w drugim — zbyt wysokiej [6].

Na podstawie znajomości możliwych do detekcji stanów technicznych oraz towarzyszących im symptomów można dokonać lokalizacji, np. niesprawności, przy czym należy pamiętać, że nie zawsze zapewniona jest jednoznaczność takiego wskazania. Wynikać to może m.in. z niepełnej i niepewnej wiedzy o obiekcie oraz z obserwowania nieodpowiednich sygnałów diagnostycznych.

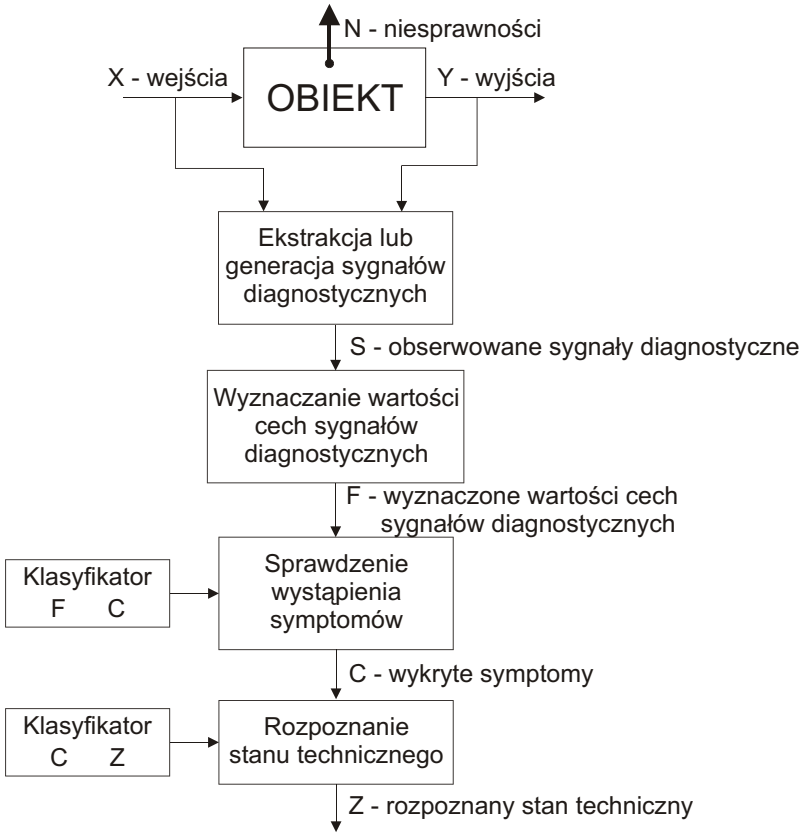
Problem rozróżnialności stanów technicznych jest szczególnie widoczny dla obiektów, w których mogą wystąpić stany złożone, tzn. gdy w tym samym czasie niesprawne lub uszkodzone są co najmniej dwa elementy obiektu. Wówczas występuje jednocześnie wiele przyczyn wpływających na postać symptomów. Forma tych wpływów może być różna, np. symptomy mogą być takie same jak dla stanów prostych („maskowanie" stanu), mogą ulegać wzmocnieniu lub osłabieniu, a w szczególnym wypadku mogą wzajemnie się znosić [46]. Obecnie nie jest znana ogólna metoda, która umożliwiałaby rozróżnianie takich stanów. Na ogół formułowana diagnoza powinna wskazywać stan techniczny, którego wystąpienie jest najbardziej prawdopodobne, a więc najczęściej na prosty stan techniczny.

Opisany proces diagnozowania dla dowolnego obiektu technicznego przedstawiono w sposób schematyczny na rys. 1.1. Jest to tzw. diagnostyka symptomowa.

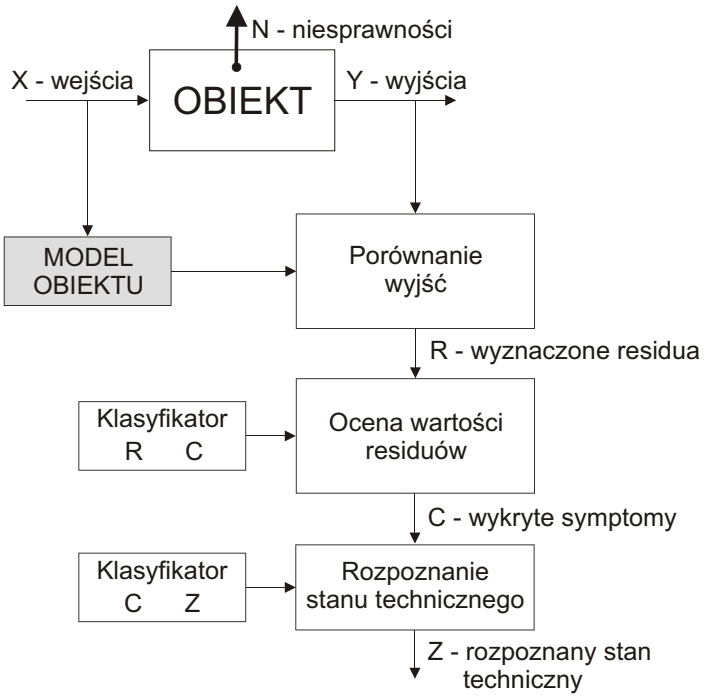
W procesie diagnozowania stosowane mogą być różnego rodzaju modele. Pojęcie *model* nie jest jednoznaczne. Wywodzi się od łacińskiego słowa *modulus* i może być przetłumaczone jako miara, wzór [92]. W szczególnym ujęciu oznacza ono fizyczny lub abstrakcyjny byt działający analogicznie do oryginału lub odzwierciedlający pewne aspekty tego działania. W diagnostyce technicznej stosowane są dwa typy modeli: modele obiektów oraz modele diagnostyczne.

Model obiektu to najczęściej program komputerowy odzwierciedlający działanie obiektu w określonych warunkach i dla znanego stanu technicznego. Diagnozowanie z zastosowaniem modelu obiektu zostało pokazane w sposób schematyczny na rys. 1.2. W tym wypadku sygnał diagnostyczny stanowią residua rozumiane jako różnica wyjść obiektu i jego modelu. Jeżeli model odzwierciedlał działanie obiektu w normalnym stanie technicznym (obiekt zdatny), to zaobserwowanie zwiększonych wartości residuów oznacza wykrycie symptomów świadczących o zmianie stanu technicznego z normalnego na inny.

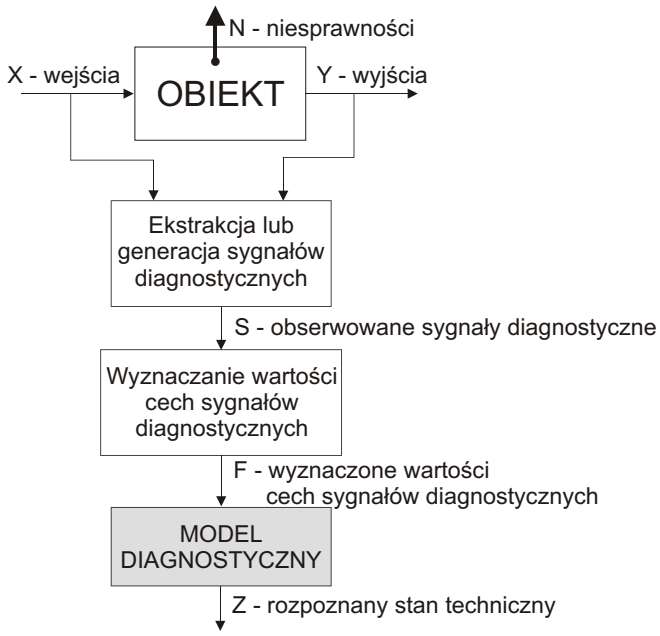
Z kolei model diagnostyczny to model odzwierciedlający proces wnioskowania o stanie technicznym rozpatrywanego obiektu, na podstawie wartości cech obserwowanych sygnałów diagnostycznych. Diagnozowanie z zastosowaniem modelu diagnostycznego ilustruje rys. 1.3.




Rys. 1.1: Diagnostyka symptomowa obiektów technicznych (na podstawie [19])




Rys. 1.2: Proces diagnozowania z zastosowaniem modelu obiektu (na podstawie [19])




Rys. 1.3: Proces diagnozowania z zastosowaniem modelu diagnostycznego (na podstawie [19])

Niniejsza praca dotyczy metody rozpoznawania stanu technicznego pewnej klasy obiektów technicznych z zastosowaniem modelu diagnostycznego uwzględniającego różne punkty widzenia (aspekty). Przeprowadzone badania zostały częściowo sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego (promotorskiego) pt. „Wieloaspektowe modele diagnostyczne" o numerze 4 T07B 042 30.

# Rozdział 2

# Modele diagnostyczne

Opracowanie modelu diagnostycznego jest zadaniem trudnym. Z przeprowadzonych badań literaturowych wynika, że istnieją dwie główne metody, za pomocą których można wyznaczyć taki model. Jedna z nich polega na odwróceniu znanego modelu rozpatrywanego obiektu, natomiast druga dotyczy koncepcji tak zwanej „*czarnej skrzynki*".

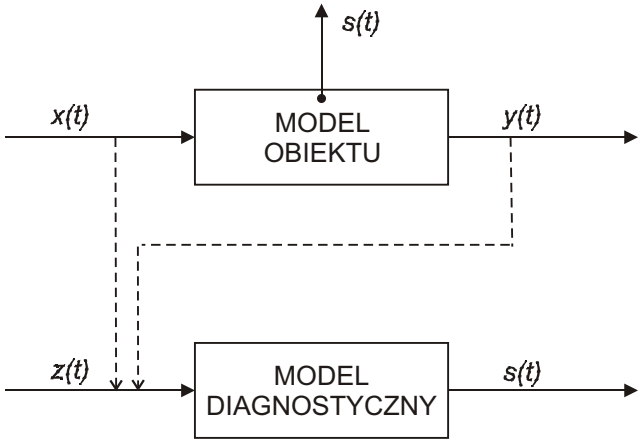
## 2.1. Odwrotny model obiektu

Konsekwencją intensywnego rozwoju przemysłu informatycznego jest między innymi możliwość opracowywania numerycznych modeli obiektów technicznych. W uproszczeniu można przyjąć, że tego typu model pozwala na symulowanie działania danego obiektu. Związek pomiędzy modelem obiektu a modelem diagnostycznym można pokazać, korzystając z podejścia stosowanego w ogólnej teorii systemów [53]. Przegląd zastosowań tej teorii do określania modeli obiektów znajduje się w [16].

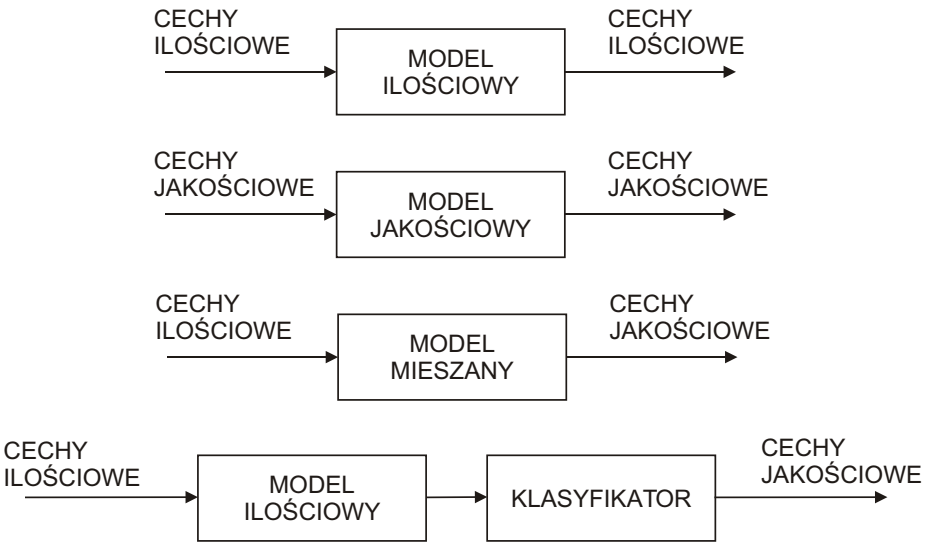
Definiowanie modelu systemowego należy rozpocząć od wyznaczenia umownej granicy pomiędzy rozpatrywanym obiektem a jego otoczeniem. Dzięki temu następuje myślowe wyodrębnienie ze środowiska modelowanego obiektu. W kolejnym kroku należy przyjąć, że oddziaływanie otoczenia na obiekt reprezentowane jest w postaci wejść obiektu $x(t)$, natomiast oddziaływanie odwrotne w postaci wyjść obiektu $y(t)$. Interpretując w uproszczeniu stan obiektu $s(t)$, jako parametr transformacji wejść obiektu w wyjścia obiektu, możliwe jest przekształcenie modelu systemowego w model diagnostyczny [14, 16]. Jest tak, ponieważ można określić stan $s(t)$ rozpatrywanego obiektu, na podstawie cech oddziaływań zewnętrznych $z(t)$, uzyskanych poprzez połączenie cech wejść $x(t)$ z cechami wyjść $y(t)$ (rys. 2.1).

Istota opisywanego przekształcenia identyfikowana jest w wyniku następującego rozumowania: model obiektu pozwala wyznaczyć obserwowalne skutki funkcjonowania obiektu w oparciu o znajomość stanu obiektu, cech konstrukcyjnych i warunków działania [14]. Można zauważyć, że model diagnostyczny modeluje relację odwrotną, tzn. umożliwia wnioskowanie o przyczynie na podstawie skutku. W związku z tym przekształcenie modelu obiektu w model diagnostyczny sprowadza się do odwrócenia znanego modelu obiektu. Należy wyraźnie zaznaczyć, że rozumowanie to jest poprawne tylko wtedy, gdy model obiektu obejmuje nie tylko wyjścia „użytkowe" ale również wyjścia odnoszące się do procesów resztkowych (np. drgania, hałas).

W czasie procesu modelowania konieczne jest przyjmowanie wielu uproszczeń. Oznacza to brak podstaw do sformułowania założenia, że model obiektu stanowi dokładne i jednoznaczne odwzorowanie „oryginału". W konsekwencji można przypuszczać, że dokładny model odwrotny nie istnieje. Wobec tego należy ograniczyć dokładność poszukiwanego modelu odwrotnego, przyjmując, że będzie on wyznaczał klasy wartości parametrów (cechy jakościowe) a nie wartości dokładne (cechy ilościowe) [12]. Zatem w procesie wyznaczania modelu odwrotnego wymagane jest wprowadzenie klasyfikatora $C$ (rys. 2.3), który umożliwia przekształcenie cech ilościowych w jakościowe (rys. 2.2).

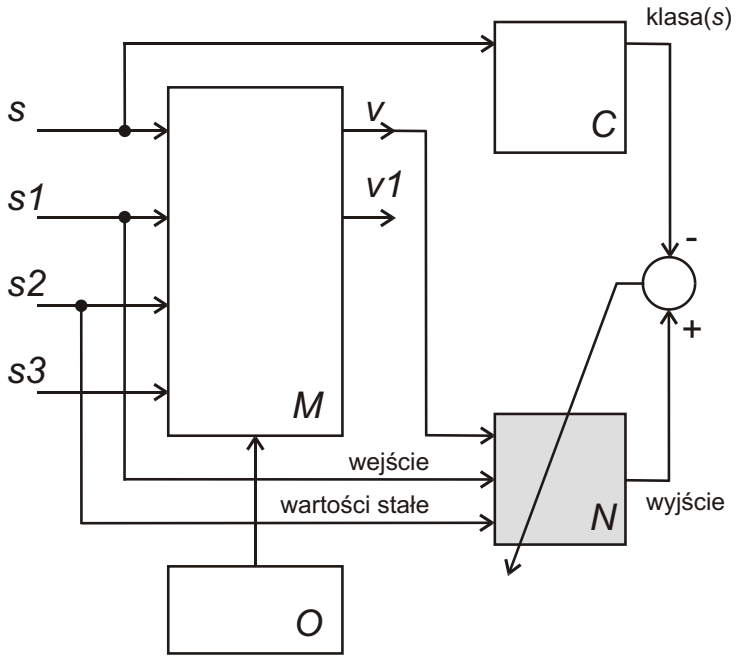



Rys. 2.1: Przekształcenie modelu systemowego [14]




Rys. 2.2: Klasy modeli [11]

Ogólną koncepcję odwracania modeli obiektów przedstawiono w [12, 14]. Ilustruje ją rys. 2.3,



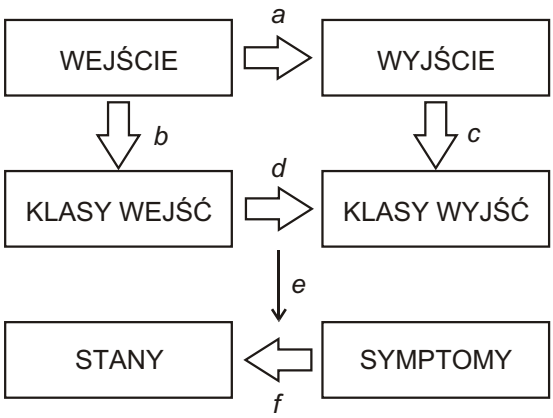

Rys. 2.3: Wyznaczanie modelu odwrotnego [14]

gdzie:

- *O* — rozpatrywany obiekt;
- *M* — znany model rozpatrywanego obiektu;
- *N* — wyznaczany model odwrotny rozpatrywanego obiektu;
- *C* — klasyfikator parametrów określających stan rozpatrywanego obiektu;
- *s* — parametry opisujące stan rozpatrywanego obiektu (np. stopień zużycia bieżni łożyska kulkowego);
- *s1* — znane parametry opisujące warunki działania obiektu (np. prędkość obrotowa);
- *s2* — znane parametry, które nie ulegają zmianom dla danego obiektu (np. cechy konstrukcyjne obiektu);
- *s3* — parametry trudne do oszacowania i pomiaru, traktowane jako wielkości losowe, wpływające na dokładność modelu (np. tłumienie drgań przez posadowienie rozpatrywanego obiektu);
- *v* — znane parametry opisujące symptomy działania obiektu (np. cechy drgań);
- *v1* — nieznane parametry opisujące skutki działania obiektu.

Można zauważyć, że wyznaczanie modelu odwrotnego odzwierciedla transformację modelu przedstawioną na rys. 2.1. Model *M* rozpatrywanego obiektu opisuje relację przyczynowo-skutkową pomiędzy parametrami wejściowymi $\{s, s1, s2, s3\}$, które w pewnym stopniu odpowiadają uogólnionemu parametrowi $x(t)$ (patrz rys. 2.1), oraz parametrami wyjściowymi $\{v, v1\}$, lub ogólniej $y(t)$. Poszukiwany model odwrotny *N* badanego obiektu, a więc model diagnostyczny, przekształca określane w wyniku pomiaru lub symulacji parametry $\{v, s1, s2\}$ (cechy oddziaływań zewnętrznych $z(t)$) w parametry klasa(*s*), opisujące stan rozpatrywanego obiektu. Identyfikacja modelu odwrotnego polega na dostrojeniu wartości jego wybranych, wewnętrznych parametrów w taki sposób, aby nastąpiło dopasowanie otrzymywanych wyników, z wynikami uzyskanymi z klasyfikatora *C*.

Opisany tok odwracania znanego modelu obiektu można przedstawić i nieco rozszerzyć za pomocą modeli relacji, dla których istotne jest poprawne opisanie związków pomiędzy wejściami i wyjściami, natomiast nieistotna jest struktura wewnętrzna tych modeli. Oznacza to, że model relacji traktowany jest jako „czarna skrzynka" (patrz punkt 2.2). Rys. 2.4 przedstawia zidentyfikowane klasy relacji,




Rys. 2.4: Klasy identyfikowanych relacji [12]

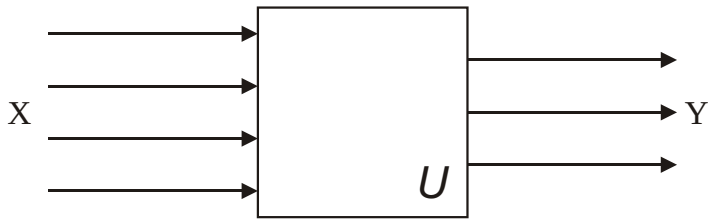
gdzie:
- *a* — model obiektu technicznego;
- *b* — klasyfikator wejściowych cech modelu, przekształcający cechy ilościowe w cechy jakościowe;
- *c* — klasyfikator wyjściowych cech modelu realizujący zadania grupowania;
- *d* — przybliżony model obiektu jako źródło danych trenujących dla modelu odwrotnego;
- *e* — operacja odwracania modelu;
- *f* — poszukiwany model odwrotny (model diagnostyczny).

W [23] pokazano, że procesy stosowania modelu obiektu i wyznaczania modelu odwrotnego mogą być traktowane jako procesy rozłączne, to znaczy realizowane w różnym czasie, miejscu oraz w różnych środowiskach programowych. Ponadto procesy te mogą być przeprowadzane sekwencyjnie, dzięki czemu możliwe jest iteracyjne doskonalenie wyznaczanego modelu odwrotnego [43]. Niestety dla złożonych modeli obiektów, szczególnie nieliniowych, nie istnieją analityczne odwzorowania odwrotne [18]. Jest to podstawowa przyczyna, dla której obecnie modele odwrotne nie są powszechnie stosowane [14].

## 2.2. „Czarna skrzynka"

Wyznaczenie modelu diagnostycznego z zastosowaniem koncepcji „czarnej skrzynki" sprowadza się do wyznaczenia wspomnianego już modelu relacji, która zachodzi pomiędzy zbiorem wartości wejść a zbiorem wartości wyjść.

Zgodnie z teorią mnogości, pod pojęciem *relacji n-argumentowej* należy rozumieć dowolny podzbiór iloczynu kartezjańskiego $X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n$, gdzie $X_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ to zbiory [48]. W celu określenia szczegółów modelowanej relacji, wygodnie jest przyjąć, że poszukiwany model diagnostyczny $N$ jest modelem jakiegoś wirtualnego, statycznego układu $U$ (tzn. bez pamięci i bez swoich stanów wewnętrznych), którego struktura i działanie nie są znane (tzw. „czarna skrzynka", rys. 2.5). Zadaniem tego układu jest przyporządkowywanie do każdego zbioru wartości wejść $X_i$, obserwowanych w chwili czasu $t_i$ $(i = 1, 2, \ldots, N)$, odpowiedniego zbioru wartości wyjść $Y_i$ [11, 14]. Można zauważyć, że w ujęciu matematycznym stanowi to relację $\mathbf{R}$ pomiędzy zbiorem $\mathbf{X}$, zawierającym zbiory wartości wejść z kolejnych chwil czasu, a zbiorem $\mathbf{Y}$, którego elementami są zbiory wartości




Rys. 2.5: Obserwowany wirtualny układ *U* [11, 14]

wyjść z rozpatrywanych chwil czasu

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_N\} \tag{2.1}$$
$$\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \ldots, Y_N\} \tag{2.2}$$
$$\mathbf{R} \subset \mathbf{X} \times \mathbf{Y} \tag{2.3}$$

Ponadto należy zwrócić uwagę na fakt, że zewnętrzny obserwator wirtualnego układu $U$ może w konkretnym momencie obserwować tylko wybrane wejścia i wyjścia, ponieważ nie jest znana ich ogólna liczba (analogia do parametrów $s_3$ i $v_1$ z rys. 2.3). W związku z tym w chwili czasu $t_i$ dostępne są następujące dane:

- zbiór wybranych wartości wyjść

$$Y_i^{'} = \{y_{i,1},\ y_{i,2},\ \ldots,\ y_{i,L}\} \subset Y_i \tag{2.4}$$

- zbiór wybranych wartości wejść

$$X_i^{'} = \{x_{i,1},\ x_{i,2},\ \ldots,\ x_{i,M}\} \subset X_i \tag{2.5}$$

Wartości nieznanych wejść, to znaczy $x_{i,M+1}$, $x_{i,M+2}$ i tak dalej, należy traktować jako zakłócenia (szum) [11, 14], których wpływ może doprowadzić do sytuacji, gdzie dwóm równym zbiorom $X_i^{'}$ oraz $X_j^{'}$ $(i \neq j)$, przyporządkowane będą dwa różne zbiory $Y_i^{'}$ i $Y_j^{'}$.

Jeżeli przyjąć, że $\mathbf{X}^*$ oraz $\mathbf{Y}^*$ oznaczają odpowiednio zbiór, składający się ze zbiorów wybranych wartości wejść i wyjść w chwilach czasu $t_1, t_2, \ldots, t_N$

$$\mathbf{X}^* = \{X_1^{'}, X_2^{'}, \ldots, X_N^{'}\} \tag{2.6}$$
$$\mathbf{Y}^* = \{Y_1^{'}, Y_2^{'}, \ldots, Y_N^{'}\} \tag{2.7}$$

to model diagnostyczny można rozpatrywać jako model relacji dwuargumentowej $\mathbf{R}^*$, opisany zależnością (2.8)

$$\mathbf{R}^* \subset \mathbf{X}^* \times \mathbf{Y}^* \tag{2.8}$$

Niech $W_N$ oznacza zbiór, którego elementami są pary uporządkowane zbiorów wybranych wartości wejść i wyjść z kolejnych chwil czasu, tzn.

$$W_N = \{w_1, w_2, \ldots, w_N\} = \{(X_1^{'}, Y_1^{'}), (X_2^{'}, Y_2^{'}), \ldots, (X_N^{'}, Y_N^{'})\} \tag{2.9}$$

Zbiór $W_N$, zwany także *zbiorem danych uczących* [11] stanowi podstawę do wyboru odpowiedniej postaci modelu diagnostycznego. Po dokonaniu tego wyboru konieczne jest określenie wartości parametrów modelu, które wynikają z przyjętej postaci (tzw. *identyfikacja modelu*). Zadania, których rozwiązywanie polega na realizacji powyższych kroków, określane są jako *poszukiwanie modelu danych* [11, 14].

Należy podkreślić, że model diagnostyczny umożliwi rozpoznawanie różnych stanów technicznych wtedy, gdy zostanie zidentyfikowany z użyciem reprezentatywnego zbioru $W_N$, tzn. zbioru, który zawiera dane dotyczące różnych warunków działania i różnych stanów technicznych.

### 2.2.1. Wybór postaci modelu

Z dotychczasowych rozważań wynika, że wybór odpowiedniej klasy modelu zależy przede wszystkim od zawartości i postaci zbioru danych uczących $W_N$. Warto zauważyć, że nawet jeśli poszukiwany model diagnostyczny rozpatrywany jest jako reprezentacja pewnego wirtualnego układu $U$, to nie stanowi to źródła dodatkowych informacji wspomagających proces doboru postaci modelu, ponieważ z założenia struktura i działanie układu $U$ nie są znane (układ $U$ traktowany jest jako „czarna skrzynka") [11, 14].

Dokonywanie jakiegokolwiek racjonalnego wyboru realizowane jest zawsze na podstawie pewnych kryteriów. Odnosi się to również do zadania wyboru odpowiedniej klasy modelu diagnostycznego, gdzie wyodrębnione przesłanki powinny umożliwiać wybór takiej postaci modelu, która jest najlepiej dopasowana do zbioru danych uczących $W_N$. Poniżej przedstawiono wyróżnione w [11, 14] kryteria doboru postaci modelu.

#### Kryterium rodzaju modelowanej zależności

W ogólnym wypadku modelowana zależność ma charakter relacji dwuargumentowej. W związku z tym poszukiwany model diagnostyczny przyjmuje postać modelu relacji opisanej związkiem (2.8). Jeśli przez $f$ oznaczona zostanie relacja spełniająca następujące dwa warunki:

$$\forall X' \in \mathbf{X}^* \ \exists Y' \in \mathbf{Y}^* : (X', Y') \in f \tag{2.10}$$

$$\forall X' \in \mathbf{X}^* \ \forall (Y'_i, Y'_j : i \neq j) \in \mathbf{Y}^* : ([(X', Y'_i) \in f \wedge (X', Y'_j) \in f] \Rightarrow (Y'_i = Y'_j)) \tag{2.11}$$

to nazywana jest ona odwzorowaniem lub przekształceniem zbioru $\mathbf{X}^*$ w zbiór $\mathbf{Y}^*$, albo funkcją określoną w zbiorze $\mathbf{X}^*$, o wartościach ze zbioru $\mathbf{Y}^*$ [37]. Symboliczne oznaczenie relacji o tych własnościach przedstawia (2.12), a odpowiadający jej model przyjmuje postać tak zwanego *modelu odwzorowania* [11, 14].

$$f : \mathbf{X}^* \rightarrow \mathbf{Y}^* \tag{2.12}$$

#### Kryterium istoty działania modelu

Wybór postaci modelu ze względu na istotę jego działania, ograniczony jest w zasadzie do dwóch klas. Pierwszą klasę stanowią tak zwane *modele aproksymacyjne*, natomiast drugą tworzą *modele interpolacyjne* [11, 14]. O tym, którą klasę modeli wybrać, decyduje jakość danych zawartych w zbiorze $W_N$, to znaczy ich liczność, dokładność, gęstość itp.

Generalnie można stwierdzić, że jeżeli zgromadzone dane obarczone są błędami, których nie można pominąć, to dobrym rozwiązaniem jest wybór modelu aproksymacyjnego. Zastępuje on (przybliża) niepewne dane w taki sposób, aby uzasadnione było przekonanie (nadzieja), że związek pomiędzy zbiorami wartości wejść i wyjść dla dowolnej chwili czasu reprezentowany jest wystarczająco dokładnie. Określenie dokładności tego przybliżenia polega na tym, by dla danych zbiorów wartości wejść zminimalizować sumaryczny błąd, powstały w wyniku złożenia różnic pomiędzy wartościami wyjść uzyskanymi z modelu, a odpowiednimi wartościami wyjść zawartymi w zbiorze $W_N$. W praktyce realizowane jest to najczęściej na podstawie kryteriów minimalnoodległościowych, przy czym w takim wypadku należy dokonać odpowiedniego skalowania danych [11, 14]. Powszechnie stosowanym kryterium minimalnoodległościowym jest tak zwane *kryterium najmniejszych kwadratów*

$$\sum_{i=1}^{N} \left( \left\| \underline{y_i} - \underline{f(x_i)} \right\|^2 \right) \rightarrow min \tag{2.13}$$

gdzie:

$\underline{x_i}$ — wektor wartości wejść obserwowanych w chwili czasu $t_i$, odpowiadający zbiorowi wartości wejść $X_i^{'}$;

$\underline{y_i}$ — wektor wartości wyjść obserwowanych w chwili czasu $t_i$, odpowiadający zbiorowi wartości wyjść $Y_i^{'}$;

$\underline{f(\underline{x_i})}$ — wektor wartości wyjść uzyskanych z modelu odwzorowania $f$ dla wektora wartości wejść z chwili czasu $t_i$.

W sytuacji, gdy w zbiorze danych uczących $W_N$ możliwe jest wyodrębnienie podzbioru dostatecznie dokładnych danych $W_P$, zwanych *danymi wzorcowymi* [11],

$$W_P \subseteq W_N \tag{2.14}$$

to dane te mogą zostać wykorzystane do utworzenia modelu interpolacyjnego. Charakteryzuje się on tym, że dla przykładów wzorcowych wyniki uzyskane z modelu, są zgodne z odpowiednimi wielkościami zawartymi w zbiorze tych przykładów. Jeżeli przez $\mathcal{W}_P$ oznaczony zostanie zbiór par uporządkowanych wektorów wejść i wyjść $(\underline{x_i}, \underline{y_i})$, odpowiadający parom uporządkowanym zbiorów wartości wejść i wyjść $(X_i^{'}, Y_i^{'})$ zbioru danych wzorcowych $W_P$, to istotę działania modelu interpolacyjnego można przedstawić za pomocą wyrażenia

$$\forall(\underline{x_i}, \underline{y_i}) \in \mathcal{W}_P : \underline{y_i} = \underline{f(\underline{x_i})} \tag{2.15}$$

#### Kryterium stopnia złożoności modelu

Ze względu na stopień złożoności modelu, w literaturze, np. [11, 14], wyróżniane są dwie klasy modeli. Są to: *modele uogólniające* oraz *modele pełne*. Poszukiwany model przyjmuje postać uogólniającą, jeżeli liczba parametrów niezbędnych do identyfikacji modelu jest znacznie mniejsza od mocy zbioru danych uczących $W_N$. W przeciwnym wypadku model występuje w postaci pełnej. Zazwyczaj dąży się do tego, aby wyznaczany model stanowił uogólnienie danych, ponieważ w praktyce dane zgromadzone w zbiorze $W_N$ nie są ani pełne, ani pewne.

#### Kryterium zakresu modelu

Jeżeli zawarte w zbiorze danych uczących $W_N$, zbiory wartości wejść i wyjść z kolejnych chwil czasu, obejmują pełną przestrzeń możliwych wartości wejść i wyjść, to poszukiwany model przyjmuje postać tak zwanego *modelu globalnego*. Jeżeli natomiast dane zgromadzone w zbiorze $W_N$ opisują tylko fragment przestrzeni możliwych wartości wejść i wyjść zawartych w odpowiednich zbiorach wartości wejść i wyjść, to postać poszukiwanego modelu określana jest jako *model lokalny*.

Biorąc pod uwagę opisane wcześniej kryterium istoty działania modelu, można stwierdzić, że modele aproksymacyjne są przykładem modeli globalnych, a modele interpolacyjne są egzemplifikacją modeli lokalnych [11]. W pracach [17, 18, 22, 66] pokazano, że wyniki uzyskiwane za pomocą modeli lokalnych są zazwyczaj lepsze od rozwiązań otrzymywanych z modelu globalnego.

#### Kryterium jakości rozwiązania

Jakość wyników otrzymywanych z modelu determinuje jego postać do tak zwanego *modelu dokładnego*, umożliwiającego wyznaczanie rozwiązań dokładnych, lub do postaci *modelu przybliżonego*, w którym wyznaczane są wyłącznie rozwiązania przybliżone lub rozmyte [11, 14]. W praktyce model diagnostyczny przyjmuje postać przybliżoną, ponieważ nie jest znany pełny zbiór wejść modelu (punkt 2.2), a zatem nie można zagwarantować, że otrzymywane wyniki będą dokładne.

**Kryterium sposobu reprezentacji danych**

Postać zgromadzonych danych uczących $W_N$ w znacznym stopniu decyduje o wyborze postaci modelu. Jeżeli dane zapisane są w postaci liczb, to model przyjmuje postać tak zwanego *modelu ilościowego*, jeżeli natomiast dane reprezentowane są w sposób przybliżony, to model powinien występować w postaci *modelu jakościowego*. Z kolei dla danych zapisanych w postaci liczb lub zbiorów rozmytych najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie *modelu rozmytego*. Jeżeli wyniki uzyskiwane z modelu mają być reprezentowane w postaci zbiorów, grup (skupień) lub klas, to postać poszukiwanego modelu powinna mieć charakter *klasyfikatora* [14].

Ciekawą grupę modeli stanowią tak zwane *modele statystyczne*, dla których dane reprezentowane są w postaci łącznych rozkładów gęstości prawdopodobieństw wystąpienia wartości tych danych. Jeżeli zamiast prawdopodobieństw użyte zostaną miary subiektywnych przekonań, to model statystyczny przyjmie postać *modelu przekonań*. Posiada on wiele zalet szczególnie użytecznych w modelowaniu diagnostycznym, ponieważ umożliwia reprezentację wiedzy niepewnej i niepełnej [14].

## 2.2.2. Przykładowe postacie modelu

W nieniejszym punkcie przedstawiono cechy dwóch przykładowych postaci modelu diagnostycznego. Postacie te zostały wybrane do badań opisanych w dalszych rozdziałach pracy.

**Przykład nr 1 — sieć przekonań**

W wielu projektach dotyczących diagnostyki technicznej (m.in. dla energetyki jądrowej, np. [1]) wysoką trafność formułowanych diagnoz uzyskano dzięki zastosowaniu modeli reprezentowanych w postaci sieci przekonań (sieci bayesowskich). Nazwa tych sieci podkreśla ich związek z rachunkiem prawdopodobieństwa, a w szczególności z twierdzeniem Thomasa Bayesa[1].

**Prawdopodobieństwo a przekonanie.** W celu uniknięcia wystąpienia sprzeczności przy opisie zjawisk o charakterze losowym konieczne są do spełnienia pewne aksjomaty, które w 1933 r. przedstawił A. N. Kołmogorow[2]. Ogólną (aksjomatyczną) definicję prawdopodobieństwa można znaleźć np. w [34], przy czym definicja ta nie mówi nic o sposobie przyporządkowywania prawdopodobieństw. Wynika z niej jedynie, że każde przyporządkowanie spełniające aksjomaty Kołmogorowa jest poprawne.

W praktyce prawdopodobieństwo zdarzenia $A$ określa się najczęściej na podstawie częstości występowania zdarzenia $A$ w trakcie eksperymentu losowego, odznaczającego się tzw. *statystyczną regularnością* [34], tzn.

$$P(A) = \lim_{N\to\infty} \frac{n}{N} \tag{2.16}$$

gdzie $n$ oznacza liczbę wystąpień zdarzenia $A$ w trakcie doświadczenia losowego przeprowadzonego $N$-razy. Przedstawiona interpretacja prawdopodobieństwa nazywana jest obiektywną, fizyczną, częstościową lub statystyczną [25].

Niezależnie od stopnia znajomości aparatu matematycznego związanego z rachunkiem prawdopodobieństwa, każdy człowiek wykorzystuje w swoim życiu tzw. *prawdopodobieństwo subiektywne*. Można powiedzieć, że prawdopodobieństwo to jest miarą *przekonania* lub pewności, co do wystąpienia określonych zdarzeń.

Z powyższych rozważań wynika, że ocena istoty prawdopodobieństwa nie jest oczywista, ze względu na trudności w rozstrzygnięciu kwestii, czy prawdopodobieństwo jest obiektywną cechą zdarzenia, czy związane jest z jego subiektywnym opisem. Jak zasygnalizowano np. w [13, 21] taka dwuznaczność może być przyczyną powstania wielu nieporozumień.

[1] Thomas Bayes (1702—1761) – angielski matematyk.
[2] Andriej N. Kołmogorow (1903—1987) – rosyjski matematyk i logik.

**Prawdopodobieństwo warunkowe.** Prawdopodobieństwo warunkowe stanowi jedno z ważniejszych pojęć rachunku prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia $A$ pod warunkiem, że zaszło zdarzenie $B$ określa następujący wzór:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \tag{2.17}$$

gdzie $P(A \cap B)$ oznacza prawdopodobieństwo łącznego zajścia zdarzeń $A$ i $B$. Jeżeli zdarzenia te są niezależne, wówczas

$$P(A \cap B) = P(A)\,P(B) \tag{2.18}$$

w przeciwnym wypadku

$$P(A \cap B) = P(A|B)\,P(B) = P(B|A)\,P(A) \tag{2.19}$$

**Wzór Bayesa.** Jeżeli zdarzenia $A$ i $B$ są wzajemnie wykluczającymi się zdarzeniami losowymi, z których jedno na pewno zachodzi oraz dane są ich prawdopodobieństwa $P(A)$, $P(B)$ i $P(B|A)$, to zachodzi zależność:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)\,P(A)}{P(B)} \tag{2.20}$$

Można zauważyć, że (2.20) wynika z (2.19). Wzór Bayesa zapisywany jest także w następującej postaci:

$$P(h_i|e_j) = \frac{P(e_j|h_i)\,P(h_i)}{P(e_j)} \tag{2.21}$$

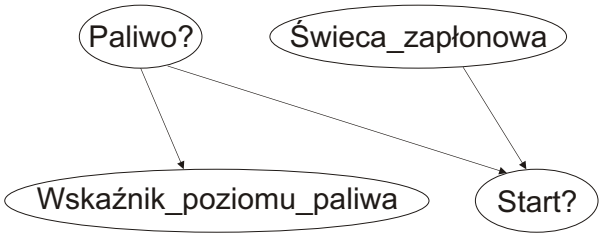
gdzie: $P(h_i|e_j)$ oznacza prawdopodobieństwo, że hipoteza $h_i$ jest prawdziwa wtedy, gdy wiadomo, że racja $e_j$ jest prawdziwa; $P(e_j|h_i)$ oznacza prawdopodobieństwo występowania racji $e_j$ wtedy, gdy hipoteza $h_i$ jest prawdziwa; $P(h_i)$ oznacza prawdopodobieństwo tego, że hipoteza $h_i$ jest prawdziwa; $P(e_j)$ oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia racji $e_j$.

Zależność (2.20) (lub (2.21)) określa prawdopodobieństwo a posteriori $P(A|B)$ zdarzenia $A$ (hipotezy $h_i$) na podstawie prawdopodobieństwa a priori $P(A)$ ($P(h_i)$) zdarzenia $A$ (hipotezy $h_i$).

**Sieci przekonań.** Sieć przekonań jest to nie zawierający cykli graf skierowany, którego węzły reprezentują zmienne, identyfikujące hipotezy oraz obserwacje (przykład w tab. 2.1), a skierowane gałęzie reprezentują związki pomiędzy tymi zmiennymi (przykład na rys. 2.6). Określenie relacji pomiędzy zmiennymi realizowane jest poprzez przypisanie węzłom sieci, tablic prawdopodobieństw warunkowych (np. tab. 2.2 i 2.3). Zbiór tablic prawdopodobieństw warunkowych oraz prawdopodobieństw a priori (np. tab. 2.4 i 2.5) umożliwia wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa łącznego, a więc cała sieć reprezentuje w oszczędny sposób łączny rozkład prawdopodobieństwa dla wszystkich zmiennych [40].

Tab. 2.1: Zmienne rozpatrywane w przykładowej sieci przekonań przedstawionej w [42] (przykład dotyczy problemu uruchomienia samochodu)

| ZMIENNA | MOŻLIWE STANY |
|---|---|
| Start? | {nie, tak} |
| Świeca_zapłonowa | {zanieczyszczona, czysta} |
| Paliwo? | {brak, jest} |
| Wskaźnik_poziomu_paliwa | {zbiornik_paliwa_pusty, paliwo_jest_w_zbiorniku} |




Rys. 2.6: Struktura przykładowej sieci przekonań [42]

Tab. 2.2: Tablica prawdopodobieństw warunkowych dla zmiennej „Wskaźnik_poziomu_paliwa" [42]

| | Wskaźnik_poziomu_paliwa | |
|---|---|---|
| Paliwo? | zbiornik_paliwa_pusty | paliwo_jest_w_zbiorniku |
| brak | 0.995 | 0.005 |
| jest | 0.001 | 0.999 |

Tab. 2.3: Tablica prawdopodobieństw warunkowych dla zmiennej „Start?" [42]

| | | Start? | |
|---|---|---|---|
| Paliwo? | Świeca_zapłonowa | nie | tak |
| nie | zanieczyszczona | 1 | 0 |
| nie | czysta | 1 | 0 |
| tak | zanieczyszczona | 0.1 | 0.9 |
| tak | czysta | 0.01 | 0.99 |

Tab. 2.4: Prawdopodobieństwo a priori dla zmiennej „Paliwo?" [42]

| | brak | jest |
|---|---|---|
| P(Paliwo?) | 0.001 | 0.999 |

Tab. 2.5: Prawdopodobieństwo a priori dla zmiennej „Świeca_zapłonowa" [42]

| | zanieczyszczona | czysta |
|---|---|---|
| P(Świeca_zapłonowa) | 0.05 | 0.95 |

Wyznaczanie opisywanych prawdopodobieństw na podstawie równania (2.16) wiązałoby się z koniecznością bardzo długiego czasu badań lub z potrzebą obserwacji dużej liczby podobnych obiektów. Warto zauważyć, że prawdopodobieństwa te można rozpatrywać jako prawdopodobieństwa subiektywne, a więc dopuszczalne jest (w praktyce często konieczne) pozyskanie ich wartości na podstawie opinii specjalistów.

Wymagane prawdopodobieństwa mogą zostać oszacowane także w wyniku analizy ryzyka za pomocą metod predykcyjnych takich jak PSA (ang. *Probabilistic Safety Assessment*), umożliwiających określanie wiarygodnych, potencjalnych scenariuszy awaryjnych oraz ocenę ich prawdopodobieństw i skutków wystąpienia. Wybrane zagadnienia dotyczące procesów diagnozowania oraz oceniania ryzyka dla obiektów technicznych przedstawiono w [20].

W automatycznym konstruowaniu sieci przekonań najczęściej stosowane są algorytmy umożliwiające określenie tablic prawdopodobieństw warunkowych dla sieci o znanej strukturze (algorytmy z grupy junction tree np. Shafera–Shenoya, Hugin [51]). Istnieją również algorytmy pozwalające określać strukturę sieci przekonań na podstawie odpowiedniego zbioru danych (np. algorytm Chow-Liu [24], Pearla [57], K2 [26]).

Warto zauważyć, że jeżeli zbiór danych nie będzie zawierał przykładów dotyczących pewnego stanu technicznego obiektu, co może wynikać np. z potrzeby ograniczenia rozmiaru tego zbioru, to prawdopodobieństwo wystąpienia takiego stanu w tworzonej sieci, będzie równe zero (zgodnie ze sposobem określania prawdopodobieństwa na podstawie częstości występowania zdarzeń). Chcąc uniknąć takiego błędu można w pierwszej kolejności oszacować, na podstawie rozkładu Dirichleta (lub rozkładu beta dla zmiennych binarnych), subiektywne wartości stopni przekonań, a następnie zaktualizować je na podstawie zbioru danych [35].

Wnioskowanie w sieci przekonań polega na wyznaczeniu nieznanych wartości dowolnych zmiennych na podstawie znanych wartości innych zmiennych [25]. Stosowane algorytmy wnioskowania przedstawiono np. w [3, 27, 41]. W ogólnym wypadku znalezienie rozwiązania globalnego sprowadza się do zagadnień NP-trudnych, możliwych do rozwiązania dla sieci z pojedynczymi połączeniami. W przypadku sieci o bardziej złożonej strukturze należy poszukiwać rozwiązań lokalnych, dotyczących danego węzła oraz jego rodziców i potomków [40, 57].

**Zastosowanie sieci przekonań w diagnostyce technicznej.** W sieciach przekonań wykorzystuje się wiedzę posiadaną przed próbą określenia stanu technicznego obiektu (wiedza *a priori*), oraz wiedzę uzyskaną w wyniku przeprowadzenia wnioskowania probabilistycznego (wiedza *a posteriori*). Aby wykorzystać tę metodę należy określić prawdopodobieństwa $P(z_i)$ $(i = 0, 1, 2, \ldots, n)$ zaistnienia rozpatrywanych stanów technicznych obiektu oraz prawdopodobieństwa warunkowe $P(s_j \mid z_i)$ wystąpienia symptomu $s_j$ w stanach $z_i$ [6]. Wówczas można obliczyć prawdopodobieństwo zaistnienia stanu $z_i$ pod warunkiem wystąpienia symptomu $s_j$ na podstawie wzoru Bayesa (2.21):

$$P(z_i \mid s_j) = \frac{P(s_j \mid z_i)P(z_i)}{\sum_i P(s_j \mid z_i)P(z_i)} = \frac{P(s_j \mid z_i)P(z_i)}{P(s_j)} \tag{2.22}$$

Trafność diagnozy przy zastosowaniu sieci przekonań wzrośnie, jeśli rozkład prawdopodobieństw a priori $P(z_i)$ będzie różny od rozkładu równomiernego, tzn. dla $P(z_i) \neq 0.5$ [6].

### Przykład nr 2 — tablica stanów

Tablica stanów przedstawia relację pomiędzy zbiorem wzorcowych wartości cech sygnałów diagnostycznych a zbiorem rozpatrywanych stanów technicznych obiektu. Ogólną postać tablicy stanów można znaleźć np. w [46].

Chcąc opracować tablicę stanów konieczna jest znajomość *sygnatur*, które określają każdy rozpatrywany stan techniczny obiektu. Sygnaturą danego stanu technicznego nazywany jest wektor wzorcowych wartości cech sygnałów diagnostycznych dla tej kolumny tablicy stanów, która dotyczy tego stanu [44, 45].

Stany techniczne identyfikowane przez jednakowe sygnatury są nierozróżnialne. W takim wypadku diagnoza powinna wskazywać najbardziej prawdopodobny stan techniczny [46] (np. wystąpienie prostego stanu technicznego jest na ogół bardziej prawdopodobne niż wystąpienie złożonego stanu technicznego).

Wnioskowanie diagnostyczne z zastosowaniem tablicy stanów może mieć charakter, tzw. wnioskowania równoległego lub szeregowego. Wnioskowanie równoległe można zaliczyć do metod rozpoznawania obrazów [46]. Polega ono na porównywaniu sygnatury obecnego stanu technicznego obiektu z sygnaturami wzorcowymi umieszczonymi w tablicy stanów. Jeśli w wyniku takiego porównania zostanie stwierdzona zgodność z jedną lub kilkoma sygnaturami tablicy stanów, to możliwe jest sformułowanie diagnozy o aktualnym stanie technicznym obiektu.

Wnioskowanie szeregowe polega na analizie wartości kolejnych cech sygnałów diagnostycznych i formułowaniu diagnozy na bieżąco w sposób krokowy [46]. Identyfikacja aktualnego stanu technicznego obiektu rozpoczyna się od obserwacji wybranej cechy sygnału diagnostycznego. W zależności od otrzymanej wartości zostaje wyznaczony podzbiór możliwych stanów technicznych obiektu. W kolejnym kroku analizowana jest następna cecha sygnału diagnostycznego i ponownie określany jest podzbiór możliwych stanów technicznych obiektu ze zbioru rozpatrywanego w poprzednim kroku. Cały proces przebiega aż do momentu określenia aktualnego stanu technicznego obiektu lub do uwzględnienia wszystkich rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych. W tym wypadku, jeśli liczba możliwych stanów technicznych obiektu pozostanie większa od 1, występuje problem rozróżnialności stanów.

### 2.2.3. Identyfikacja modelu

Proces identyfikacji modelu składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap polega na wyznaczeniu nieznanych wartości parametrów modelu, na podstawie *zbioru danych trenujących* $W_D$, który stanowi pewien podzbiór zbioru danych uczących $W_N$

$$W_D \subseteq W_N \tag{2.23}$$

W drugim etapie wyznaczony model podlega weryfikacji przy użyciu *zbioru danych testujących* $W_T$, który także zawarty jest w zbiorze danych $W_N$

$$W_T \subseteq W_N \tag{2.24}$$

Sposób wyodrębniania zbiorów $W_D$ oraz $W_T$ zdeterminowany jest między innymi przyjętą metodą identyfikacji modelu. Ilustrują to dwa ostatnie przykłady, z przedstawionych poniżej metod podziału zbioru $W_N$. Wszystkie przykłady zaczerpnięto z [79].

**Przykład nr 1**. Zbiory danych trenujących $W_D$, testujących $W_T$ oraz uczących $W_N$ są sobie równe

$$W_D = W_T = W_N \tag{2.25}$$

Należy podkreślić, że jeżeli zbiór $W_N$ nie jest licznym zbiorem reprezentatywnych danych, zastosowanie tej metody, zwanej również *metodą resubstytucji* [79], może prowadzić do zawyżonych wyników oceny jakości modelu.

**Przykład nr 2**. Zbiory danych trenujących $W_D$ i testujących $W_T$ są rozłączne, przy czym ich suma równa się zbiorowi danych uczących $W_N$ (tzw. *metoda holdout* [79]). W tradycyjnym podejściu zbiór danych trenujących $W_D$ obejmuje połowę elementów zbioru danych uczących $W_N$, a pozostałe elementy należą do zbioru danych testujących $W_T$ [79]

$$\begin{array}{rcl} W_D \bigcup W_T & = & W_N \\ W_D \bigcap W_T & = & \emptyset \\ |W_D| & = & |W_T| = \frac{1}{2}|W_N| \end{array} \tag{2.26}$$

**Przykład nr 3**. Zakłada się, że identyfikacja modelu przeprowadzana jest w dwóch iteracjach. W pierwszym cyklu zbiór danych trenujących $W_D^{(1)}$ i testujących $W_T^{(1)}$ można wyodrębnić, np. według sposobu (2.26) (ale nie (2.25)). W drugim cyklu zbiór danych trenujących $W_D^{(2)}$ odpowiada zbiorowi danych testujących $W_T^{(1)}$, a zbiór danych testujących $W_T^{(2)}$ zbiorowi danych trenujących $W_D^{(1)}$

$$\begin{array}{l} W_D^{(1)} = W_D \\ W_T^{(1)} = W_T \\ W_D^{(2)} = W_T^{(1)} \\ W_T^{(2)} = W_D^{(1)} \end{array} \tag{2.27}$$

**Przykład nr 4**. Zakłada się, że identyfikacja modelu przeprowadzana jest $N$-krotnie, gdzie $N$ równa się mocy zbioru danych uczących $W_N$. W takim wypadku zbiór danych testujących $W_T^{(i)}$ w $i$-tej iteracji ($i = 1, 2, \ldots, N$) odpowiada $i$-temu elementowi zbioru $W_N$, a zbiór danych trenujących w tym cyklu $W_D^{(i)}$, składa się z pozostałych elementów zbioru $W_N$

$$\forall w_i \in W_N : \; W_D^{(i)} = W_N \setminus \{w_i\}, \; W_T^{(i)} = \{w_i\}, \; i = 1, 2, \ldots, N \tag{2.28}$$

Wyznaczanie danych trenujących oraz testujących według przedstawionej metody, określanej w literaturze jako *leave-one-out* i będącej szczególnym przypadkiem *metody rotacji* (*leave-k-out*) [79], może zaniżać wyniki oceny jakości zidentyfikowanego modelu.

### 2.2.4. Eksperymenty diagnostyczne

Zbiór danych uczących $W_N$ pozyskiwany jest w wyniku przeprowadzenia eksperymentów diagnostycznych. Wyróżnia się dwie ogólne klasy takich badań [7]:

- *eksperymenty czynne* — polegają na celowym wprowadzeniu określonych stanów technicznych (np. niesprawności) w badanym obiekcie, po to aby wykryć zewnętrzne objawy występowania tych stanów;
- *eksperymenty bierne* — polegają na obserwowaniu obiektu bez modyfikowania w sposób zamierzony jego stanu technicznego.

Bierne eksperymenty diagnostyczne wymagają zazwyczaj długiego czasu badań. Problem ten można rozwiązać obserwując dużą liczbę podobnych obiektów. Efektywniejszym podejściem do pozyskiwania danych są eksperymenty czynne. Niestety nie można ich stosować w odniesieniu do dużych obiektów technicznych (np. turbozespół) z powodu wysokiego kosztu i niedopuszczalnego stopnia ryzyka [14].

Niewielki koszt i niski stopień ryzyka prowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych jest możliwy w sytuacji, gdy badania prowadzone są na modelu. Są to tzw. badania symulacyjne, które z uwagi na rozwój metod numerycznego modelowania odgrywają coraz większą rolę.

## 2.3. Wielomodel diagnostyczny

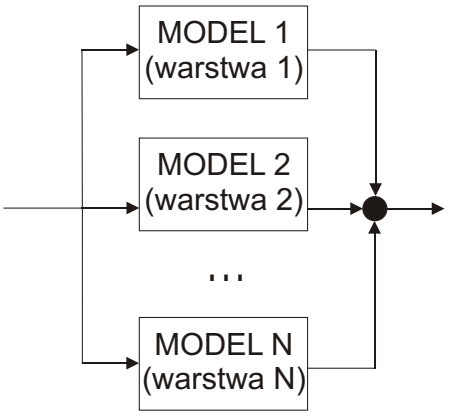
W wielu nowoczesnych obiektach technicznych można wyodrębnić kilka układów, z których każdy ma inną naturę fizyczną, np.: układ mechaniczny, elektryczny, hydrauliczny, pneumatyczny itp. Zazwyczaj jeden z nich pełni rolę dominującą, co wynika z istoty działania obiektu. Opracowanie pojedynczego (globalnego) modelu diagnostycznego dla tego typu obiektów technicznych jest zazwyczaj zadaniem bardzo trudnym lub wręcz niemożliwym do zrealizowania. Na podstawie opublikowanych wyników badań, np. [23, 17, 18], można stwierdzić, że w takim wypadku lepsze rezultaty uzyskuje się stosując zbiór modeli lokalnych. Wówczas, w celu rozpoznania stanu technicznego danego obiektu, należy wziąć pod uwagę informacje pochodzące ze wszystkich aktywnych modeli lokalnych. Jest to więc realizacja idei tzw. *wielomodelu diagnostycznego*.

Definicję tego pojęcia, opracowaną na podstawie [61, 62], podano w [83], gdzie wielomodelem nazwano „ (...) model składający się z co najmniej dwóch, stosowanych łącznie, modeli składowych, które mogą być identyfikowane oddzielnie, najczęściej z zastosowaniem różnych metod i kryteriów".

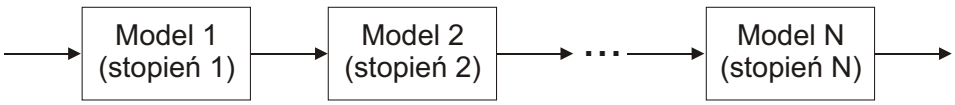
### 2.3.1. Rodzaje wielomodeli

Ze względu na strukturę wielomodele zostały podzielone na trzy klasy. Są to [82]:

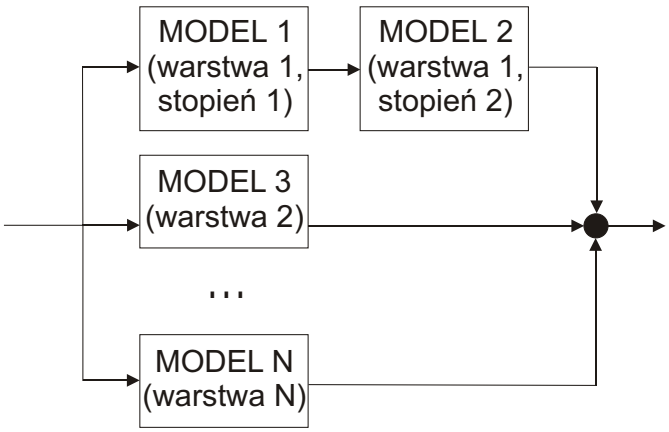
- modele wielowarstwowe (rys. 2.7), do których zaliczono model wieloaspektowy [15] oraz model sekwencyjny;
- modele wielostopniowe (rys. 2.8);




Rys. 2.7: Struktura modelu wielowarstwowego [83]




Rys. 2.8: Struktura modelu wielostopniowego [83]




Rys. 2.9: Przykładowa struktura modelu mieszanego [83]

- modele mieszane (rys. 2.9).

Można zauważyć, że w odniesieniu do modeli wielowarstwowych konieczne jest określenie sposobu łączenia wyjść modeli składowych w jedno wspólne wyjście.

### 2.3.2. Łączenie wyjść modeli składowych

Istnieje wiele metod łączenia wyjść modeli składowych. Generalnie dzielone są one na dwie klasy: metody uzgadniania wyjść oraz metody agregacji wyjść.

Uzgadnianie wyjść stosowane jest najczęściej przy podejmowaniu decyzji i planowaniu strategii negocjacyjnych w różnych dziedzinach (np. [4, 9, 50, 88]). Polega ono na takim modyfikowaniu wartości wyjść modeli składowych, aby w rezultacie otrzymać identyczne wartości wyjść z każdego modelu składowego, które jednocześnie stają się wartościami wyjścia wielomodelu.

Z kolei metody agregacji polegają na wyznaczeniu wyjścia wielomodelu na podstawie wyjść modeli składowych, które w tym wypadku nie są modyfikowane w jakikolwiek sposób. Oznacza to konieczność zdefiniowania (zastosowania) operatora agregacji $\oplus$, umożliwiającego przeprowadzenie odpowiednich działań na zbiorze wyjść modeli składowych. Poprawnie określony operator agregacji $\oplus$ powinien posiadać wszystkie lub większość własności przedstawionych w [10, 29].

Do podstawowych operatorów agregacji należą operatory powszechnie używane w statystyce, np.: średnia arytmetyczna, mediana, wartość maksymalna, wartość minimalna. W pewnych sytuacjach agregację wyjść modeli składowych można także przeprowadzić w oparciu o metody głosowania, takie jak proste głosowanie większościowe, głosowanie większościowe ważone czy rangowe głosowanie większościowe [59]. Przykłady zastosowania tego typu metod można znaleźć w [56, 64], natomiast przykłady dotyczące innych metod można znaleźć w [36, 60, 67].

Dobrze zbadanym modelem niepewności, w sytuacji gdy dana zmienna przyjmuje jednocześnie różne wartości jest teoria funkcji przekonania, zwana także matematyczną teorią ewidencji lub teorią Dempstera-Shafera [28, 70]. Teoria ta jest stosowana m.in. w wypadku agregacji stopni przekonań uzyskanych z niezależnych źródeł informacji [58]. Realizowane jest to za pomocą tzw. reguły kombinacji Dempstera, określonej w następujący sposób:

$$\begin{aligned} m_{1,2}(\emptyset) &= 0 \\ m_{1,2}(A) &= (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{\sum\limits_{B \cap C = A \neq \emptyset} m_1(B)\, m_2(C)}{1 - \sum\limits_{B \cap C = \emptyset} m_1(B)\, m_2(C)} \end{aligned} \tag{2.29}$$

gdzie $m_X(Y)$ opisuje rozkład stopni przekonań o wartościach zmiennej $Y$ uzyskany ze źródła informacji $X$.

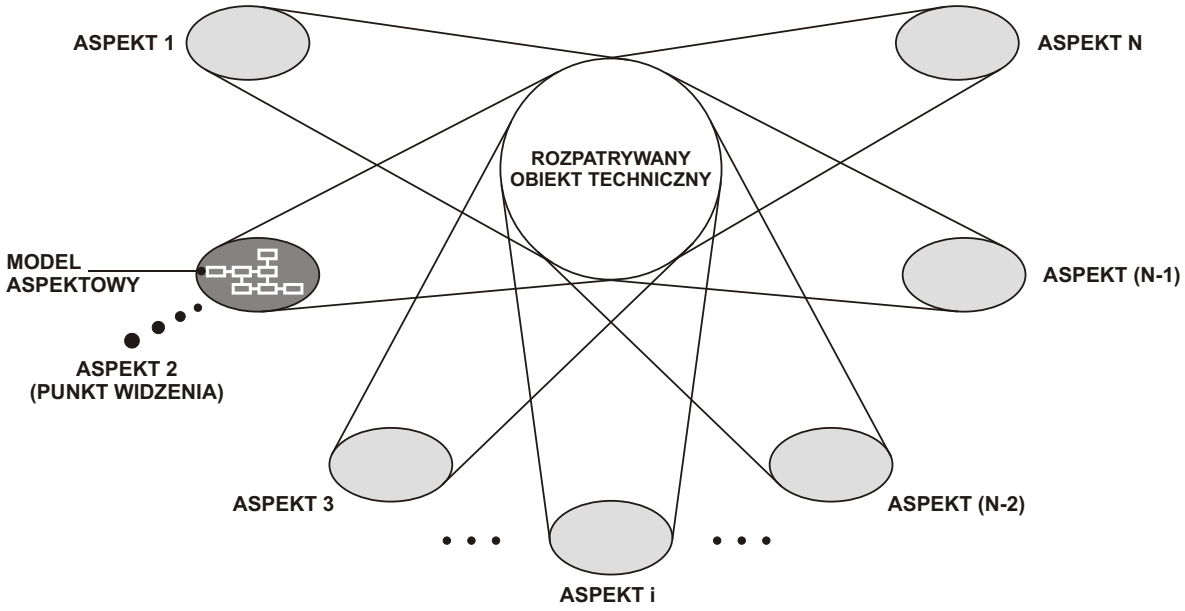
Należy zauważyć, że w przypadku całkowitej sprzeczności stopni przekonań zastosowanie reguły kombinacji Dempstera prowadzi do nieoznaczoności typu $\frac{0}{0}$. Ponadto w pewnych wypadkach agregacja stopni przekonań za jej pomocą daje wyniki kłopotliwe w interpretacji, co pokazano w [89, 90]. Podejmowano liczne próby zmodyfikowania tej reguły. Do jej podstawowych odmian należą: reguła Yagera [86, 87], reguła Inagakiego [38], reguła Zhanga [91] oraz reguła Dubois'a i Prade'a [31]. Praktyczny przykład zastosowania teorii Dempstera-Shafera w diagnostyce technicznej, uwzględniający zawodność urządzeń pomiarowych, przedstawiono w [32].

# Rozdział 3

# Geneza badań

Pojęcie *aspekt* wywodzi się od łacińskiego słowa *aspectus* i najczęściej rozumiane jest jako *„punkt widzenia, z którego rozpatruje się jakąś rzecz lub zjawisko; ujęcie, postać czegoś, rodzaj, przejaw, strona czegoś"* [92]. W astrologii oznacza wzajemny układ gwiazd i planet brany pod uwagę przy układaniu horoskopów, natomiast w sensie gramatycznym, oznacza postać czasownika wyrażającą jego niedokonaność lub dokonaność (np. napisałem, piszę, wpiszę) [92, 47].

W kontekście niniejszej pracy *aspekt* rozumiany jest jako „widok" obiektu. Wynika z tego, że ujęcie wieloaspektowe sprowadza się do przyjęcia wielu (co najmniej dwóch) różnych punktów widzenia na dany obiekt. Obrazuje to rys. 3.1 opracowany na podstawie [68].




Rys. 3.1: Podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej (na podstawie [68])

Analizując rys. 3.1 można zauważyć, że obszar, który obejmuje dany aspekt pokrywa się częściowo z innymi obszarami reprezentującymi inne aspekty. Oznacza to, że pomiędzy aspektami występują związki (sprzężenia), a zatem kolejne „widoki" obiektu są różne ale nie mogą być dowolne. Analogicznie jest przy określaniu postaci geometrycznej danego elementu. Zazwyczaj jednoznaczna identyfikacja dokonywana jest po obejrzeniu tego elementu z różnych stron, przy czym pewne części elementu widziane z jednego punktu widzenia determinują w jakimś stopniu to, co można zaobserwować po

przyjęciu innego punktu widzenia.

Opis budowy dowolnego obiektu technicznego z różnych punktów widzenia nie stanowi większego problemu, ponieważ rysunek techniczny definiuje możliwe do uwzględnienia „widoki" obiektu oraz umożliwia sformalizowaną reprezentację wiedzy o konstrukcji tego obiektu. Niestety, jak dotąd nikt nie zaproponował podobnego narzędzia, w odniesieniu do opisu działania danego obiektu technicznego. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie ujednoliconego języka modelowania (ang. *Unified Modelling Language*, UML) pozwala rozwiązać, zarówno problem identyfikacji jak i reprezentacji relewantnych aspektów.

## 3.1. Język UML

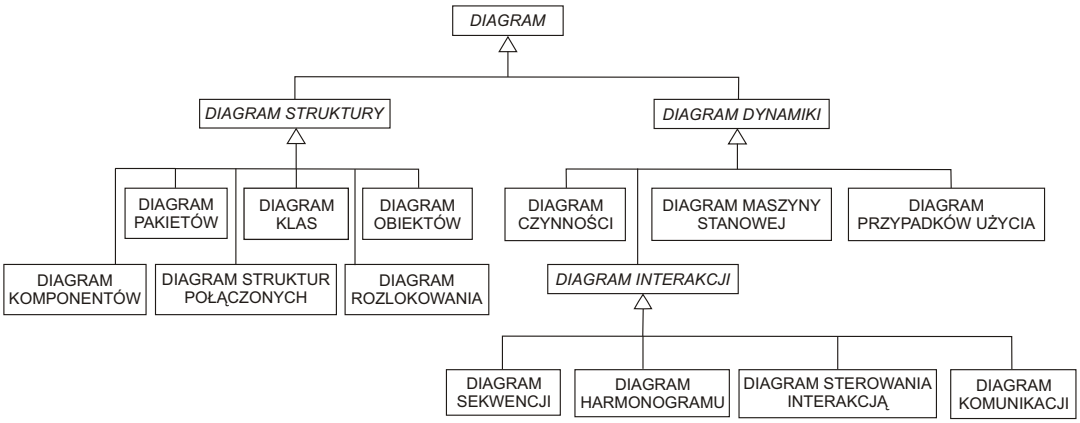
UML to język formalny z dziedziny informatycznej umożliwiający określenie z różnych punktów widzenia (aspektów) struktury i dynamiki działania modeli obiektowych, które w sensie programowania zorientowanego obiektowo reprezentują realne obiekty z wybranego fragmentu otoczenia (np. osoby, przedmioty, jednostki organizacyjne, zdarzenia itp. [76, 69]). Oznacza to, że w szczególnym wypadku rozpatrywany może być obiekt techniczny, a więc istnieje możliwość zastosowania języka UML w diagnostyce technicznej.

W języku UML aspekty reprezentowane są w postaci diagramów, przy czym liczba uwzględnianych punktów widzenia nie równa się liczbie dostępnych diagramów, ponieważ niektóre diagramy są semantycznie równoważne. Diagramy UML determinują natomiast możliwe do rozpatrzenia aspekty, a więc rozpatrywanie danego obiektu technicznego z różnych punktów widzenia jest w pewnym stopniu ograniczone. W razie potrzeby dopuszczalne jest jednak wprowadzanie nowych symboli, a przez to tworzenie nowych diagramów, uwzględniających specyficzne własności rozpatrywanego problemu (np. w modelowaniu biznesowym [69, 84], analitycznym [84] czy baz wiedzy systemu doradczego [69]).

### 3.1.1. Diagramy UML

W wersji 2.0 języka UML wyróżniono trzynaście diagramów. Sześć z nich przeznaczonych jest do opisu struktury, natomiast pozostałe pozwalają opisać dynamikę (działanie) systemu. Poniżej przedstawiono pełny wykaz diagramów UML [76, 84]:

- 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.*




Rys. 3.2: Struktura hierarchiczna diagramów UML [81]

Strukturę hierarchiczną wymienionych diagramów można przedstawić za pomocą diagramu klas (rys. 3.2).

Jak pokazuje praktyka tworzenia modeli oprogramowania, w wielu wypadkach stosowanie wszystkich diagramów nie jest konieczne. Również nadmierna dokładność modelowania może prowadzić do „przeciążenia" diagramów i zatracenia głównego celu w wyniku tak zwanej „gorączki" modelowania [2].

### 3.1.2. Reprezentacja warunków i ograniczeń

W języku UML warunek przedstawiany jest jako ujęte w nawiasy kwadratowe wyrażenie, zapisane w języku naturalnym lub formalnym, któremu można przypisać wartość logiczną „prawda" lub „fałsz". Warunki dzielą się na dwie kategorie. Pierwsza dotyczy węzłów decyzyjnych, dla których warunki muszą się wzajemnie wykluczać. Drugą kategorię stanowią tak zwane warunki dozoru, których spełnienie determinuje wykonanie określonej operacji [84].

Restrykcje (ograniczenia) reprezentowane są na diagramach UML w postaci ujętych w nawiasy klamrowe wyrażeń, zapisanych w języku naturalnym lub formalnym. Jak widać zapis ograniczeń i warunków jest bardzo podobny, ale znaczenie tych pojęć jest różne, ponieważ ograniczeniu nie jest przypisywana wartość logiczna. Ma ono jedynie na celu nadanie lub doprecyzowanie znaczenia pewnego fragmentu opracowywanego modelu [76]. Do definiowania ograniczeń stosowane są również, związane ze standardem UML, języki OCL [80] i ODCL [52]. Opis ograniczeń w tych językach jest sformalizowany, co w znacznym stopniu może ułatwić proces tworzenia kodu oprogramowania.

### 3.1.3. Ograniczenie zastosowania języka UML

Język UML przeznaczony jest przede wszystkim do tworzenia modeli systemów informatycznych, których działanie ma charakter dyskretny. W związku z tym zastosowanie tego języka w odniesieniu do obiektów działających wg ustalonych procedur w zmiennych warunkach (np. obrabiarka CNC, robot przemysłowy, pralka automatyczna itp.) nie powinno stwarzać większych trudności. Dla tego typu obiektów możliwe jest naturalne rozgraniczenie stanów funkcjonalnych oraz jednoznaczne zidentyfikowanie elementów (zespołów) odpowiedzialnych za przejście pomiędzy tymi stanami (np. zbiornik pusty i zbiornik napełniony — odpowiedzialny zawór i/lub pompa).

Opracowanie diagramu maszyny stanowej dla obiektów technicznych, które nie działają w sposób dyskretny, stwarza poważne trudności związane przede wszystkim z koniecznością rozgraniczania stanów funkcjonalnych obiektu. W takim wypadku wyodrębnienie stanów funkcjonalnych może zostać dokonane dzięki dyskretyzacji warunków działania obiektu.

## 3.2. Identyfikacja i reprezentacja aspektów

Uwzględniane w języku UML aspekty, reprezentowane w postaci odpowiednich diagramów, stanowią podstawę do identyfikacji aspektów istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej.

Rozpatrując dowolny rzeczywisty obiekt techniczny, w pierwszej kolejności należy stwierdzić, że zbudowany on jest z cząstek obdarzonych masą spoczynkową i zajmujących określoną przestrzeń (fermiony). Abstrakcyjną reprezentację stanu zbioru cząstek materialnych, tworzących dany obiekt, stanowi struktura tego obiektu, którą należy rozumieć jako informację o obiekcie, pozyskaną, np. na podstawie obserwacji i pomiaru [30]. Biorąc pod uwagę fakt, że budowa obiektu, reprezentowana za pomocą struktury zewnętrznej, determinuje sposób jego działania, pierwszym koniecznym do uwzględnienia punktem widzenia jest *aspekt struktury obiektu* (AS).

Obserwacja jakiegokolwiek obiektu technicznego realizowana jest zawsze w konkretnej chwili. W każdej z nich obiekt znajduje się w określonym stanie funkcjonalnym, np. może być w stanie rozruchu, pracy, wybiegu, stanie czuwania itp. Wobec tego istotnym aspektem, który należy wziąć pod uwagę, rozpatrując dowolny obiekt techniczny, jest *aspekt stanów funkcjonalnych obiektu* (ASF). Niestety, trzeba zauważyć, że dla obiektów nie działających w sposób dyskretny, określenie przesłanek do naturalnego rozgraniczenia tego typu stanów może być trudne [5, 8]. W takim wypadku rozwiązanie może być uzyskane poprzez odpowiednie grupowanie wartości cech opisujących warunki działania obiektu.

Niezależnie od rozpatrywanego obiektu, przejścia między stanami funkcjonalnymi zachodzą przede wszystkim na skutek oddziaływań zewnętrznych oraz czynności wykonywanych przez elementy tego obiektu. Niezrealizowanie danej czynności lub pojawienie się zakłóceń podczas jej realizacji spowoduje, że obiekt nie znajdzie się w oczekiwanym stanie funkcjonalnym. Stanowi to cenną informację diagnostyczną, a zatem następnym relewantnym punktem widzenia powinien być *aspekt działania elementów obiektu* (AD).

Zmiana stanu funkcjonalnego każdego obiektu technicznego zależy także od czynników zewnętrznych. Przykładowo: wyczerpanie się paliwa podczas podróży samochodem spowoduje zmianę jego stanu funkcjonalnego z *jazda* na *postój*. Zatem należy stwierdzić, że niezbędnym do uwzględnienia „widokiem" jest również *aspekt ograniczeń działania elementów obiektu* (AOD).

Jeżeli działanie obiektu jest ściśle określone w dziedzinie czasu, jak np. w odniesieniu do obrabiarek sterowanych numerycznie, pralek automatycznych itp., to kolejnym aspektem, który należy wziąć pod uwagę jest *aspekt harmonogramu działania elementów obiektu* (AHD).

Wiadomo, że działanie obiektu znajdującego się w stanie technicznym dopuszczalnym jest nieco inne wtedy, gdy jest on nowy, gdy jest po okresie docierania, po remoncie lub gdy jest eksploatowany przez dłuższy czas. Wobec powyższego, uwzględniając *aspekt historii elementów obiektu* (AH), można oczekiwać, że prawdopodobieństwo trafności diagnozy zostanie zwiększone oraz dokładniej zostanie określony horyzont czasowy przyszłych zmian stanu technicznego danego obiektu.

Zidentyfikowane aspekty umożliwiają pozyskanie wiedzy o rozpatrywanym obiekcie technicznym, która wymagana jest do opracowania wieloaspektowego modelu diagnostycznego. Niewątpliwie jakość tego modelu będzie zależeć od przyjętego sposobu reprezentacji wiedzy. O ile w badaniach dotyczących metod pozyskiwania wiedzy odnotowano znaczące sukcesy, np. [54, 55, 85], to jak do tej pory, nie znaleziono dostatecznie ogólnego rozwiązania problemu formalizacji sposobów zapisu wiedzy [13]. Znane są natomiast kryteria, które taki zapis powinien spełniać. Są to: prostota, kompletność, zwięzłość, zrozumiałość i wyraźność [13]. Wymienione kryteria spełnia język UML, zatem jest to odpowiednie narzędzie do reprezentacji wyodrębnionych punktów widzenia (aspektów).

Oceniając możliwości zastosowania diagramów UML w opisywaniu obiektów technicznych dla potrzeb diagnostycznych [73], można stwierdzić, że stosowanie diagramów komponentów i rozlokowania jest niecelowe, ponieważ diagramy te dotyczą konkretnych bytów związanych z oprogramowaniem lub sprzętem komputerowym [69, 84]. Wydaje się, że można także zrezygnować ze stosowania diagramu struktur połączonych. Zadaniem tego typu diagramu jest przedstawienie współdziałających ze sobą elementów dla pewnego wycinka modelowanego systemu [84].

Z całą pewnością należy stwierdzić, że podczas tworzenia modelu diagnostycznego, rozpatrzone powinny zostać wszystkie diagramy, należące do kategorii opisującej działanie systemu. Dopuszczalne jest jednak podjęcie decyzji o niekorzystaniu z diagramu sterowania interakcją, ponieważ przedstawia on w zbiorczy sposób informacje zawarte na innych diagramach (to znaczy diagramach czynności, sekwencji, komunikacji i harmonogramu) [84]. Można również zrezygnować z diagramu komunikacji, którego uzyskanie jest możliwe poprzez przekształcenie diagramu sekwencji (odwrotne działanie jest również możliwe).

W związku z powyższym w tab. 3.1 przedstawiono te diagramy UML, które umożliwiają reprezentację zidentyfikowanych punktów widzenia (aspektów). Warto przypomnieć, że aspekty są sprzężone, co oznacza, że część wiedzy o obiekcie, reprezentowana na jednym z diagramów, występuje również, ale w innej postaci, na pozostałych diagramach. Ta redundancja opisu zostanie wykorzystana do zwiększenia prawdopodobieństwa trafności diagnozy.

Tab. 3.1: Diagramy UML umożliwiające reprezentację zidentyfikowanych aspektów (AS — aspekt struktury obiektu; ASF — aspekt stanów funkcjonalnych obiektu; AD — aspekt działania elementów obiektu; AOD — aspekt ograniczeń działania elementów obiektu; AHD — aspekt harmonogramu działania elementów obiektu; AH — aspekt historii elementów obiektu)

| | Diagram | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | klas, pakietów | maszyny stanowej | czynności | komunikacji, sekwencji | harmongramu |
| AS | X | | | | |
| ASF | | X | | | |
| AD | | | X | X | |
| AOD | X | | | X | |
| AHD | | | | | X |
| AH | | | | X | X |

## 3.3. Cel badań

Jeżeli dla każdego rozpatrywanego aspektu zostanie skonstruowany, niezależnie od pozostałych, model diagnostyczny, to w rezultacie powstanie zbiór modeli aspektowych. Zestawienie tych modeli według jednego ze sposobów opisanych w punkcie 2.3.2 jest równoznaczne z opracowaniem wieloaspektowego modelu diagnostycznego [74]. Należy podkreślić, że detekcja zmiany stanu technicznego obiektu (klasy stanów) w jednym modelu aspektowym powinna odzwierciedlać się także, być może nawet wyraźniej, w innych modelach aspektowych. Wynika to z faktu występowania sprzężeń pomiędzy aspektami. Oznacza to, że różne modele aspektowe mogą być stosowane równocześnie. Taka interpretacja modelu wieloaspektowego jest zgodna z koncepcją przedstawioną w [63].

W związku z powyższym sformułowano następujący cel badań: *opracowanie metody tworzenia wieloaspektowego modelu diagnostycznego oraz zbadanie zalet i wad tego środka reprezentacji wiedzy diagnostycznej w oparciu o przykład jego zastosowania*.

## 3.4. Tezy rozprawy

Opisany w poprzednich rozdziałach aktualny stan wiedzy dotyczącej zagadnień modelowania w diagnostyce technicznej oraz opis narzędzia stosowanego w inżynierii oprogramowania, pozwalającego uwzględniać różne punkty widzenia, stanowi podstawę do sformułowania następujących tez:

1. Język UML umożliwia opisanie budowy i działania obiektu technicznego w sposób odpowiedni do zastosowań diagnostycznych.
2. Opis działania obiektu technicznego, reprezentowany w postaci zbioru powiązanych ze sobą diagramów UML, umożliwia wskazywanie relewantnych sygnałów diagnostycznych.
3. Zastosowanie wieloaspektowego modelu diagnostycznego umożliwia rozpoznawanie złożonych stanów technicznych obiektu.
4. Zastosowanie wieloaspektowego modelu diagnostycznego zmniejsza prawdopodobieństwo braku rozpoznania stanu technicznego obiektu.

# Rozdział 4

# Metoda tworzenia wieloaspektowego modelu diagnostycznego

Konstruowanie wieloaspektowego modelu diagnostycznego jest celowe wtedy, gdy nie dysponuje się wystarczająco szczegółowym modelem obiektu. W takim wypadku tworzenie modelu diagnostycznego sprowadza się do wyznaczenia modelu relacji, zachodzącej pomiędzy zbiorem rozpatrywanych symptomów a zbiorem rozpatrywanych stanów technicznych obiektu. Proponowana metoda [75] dotyczy obiektów, których działanie można opisać za pomocą języka UML (patrz punkt 3.1.3).

## 4.1. Identyfikacja zbioru stanów technicznych obiektu

Na ogół identyfikacja zbioru $Z$ możliwych do detekcji stanów technicznych (np. niesprawności) danego obiektu nie stanowi większego problemu. W związku z tym opracowywanie modelu diagnostycznego należy rozpocząć od określenia takiego zbioru, tzn.

$$Z = \{z_0, z_1, z_2, \ldots, z_n\} \tag{4.1}$$

gdzie: $z_0$ oznacza stan bazowy (obiekt zdatny), natomiast $z_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$ oznacza inny rozpatrywany stan techniczny.

Warto zauważyć, że jeżeli możliwe jest naturalne rozgraniczenie stanów funkcjonalnych obiektu $\phi_j$ $(j = 1, 2, \ldots, m)$, stanowiących zbiór

$$\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \ldots, \phi_m\}, \tag{4.2}$$

to zazwyczaj nie jest konieczne bezpośrednie uwzględnianie całego zbioru $Z$, gdyż w danej chwili obiekt znajduje się zawsze w konkretnym stanie funkcjonalnym $\phi_{k\in\{1,2,\ldots m\}}$. W związku z tym zasadne jest rozpatrywanie odpowiednich podzbiorów zbioru $Z$, tzn.

$$Z_j^* \subseteq Z \tag{4.3}$$

przy czym nie wymaga się aby podzbiory te były rozłączne, natomiast konieczne jest spełnienie warunku

$$Z = \bigcup_j Z_j^* \tag{4.4}$$

Innymi słowy wystarczy rozpatrywać stan techniczny tylko tych elementów obiektu, które mają istotny wpływ na jego działanie w danym stanie funkcjonalnym. Przykładowo: analiza stwierdzenia, że obiekt nie wypompowywuje cieczy nie wymaga rozpatrywania stanu technicznego tych elementów obiektu, które nie mają wpływu na proces pompowania.

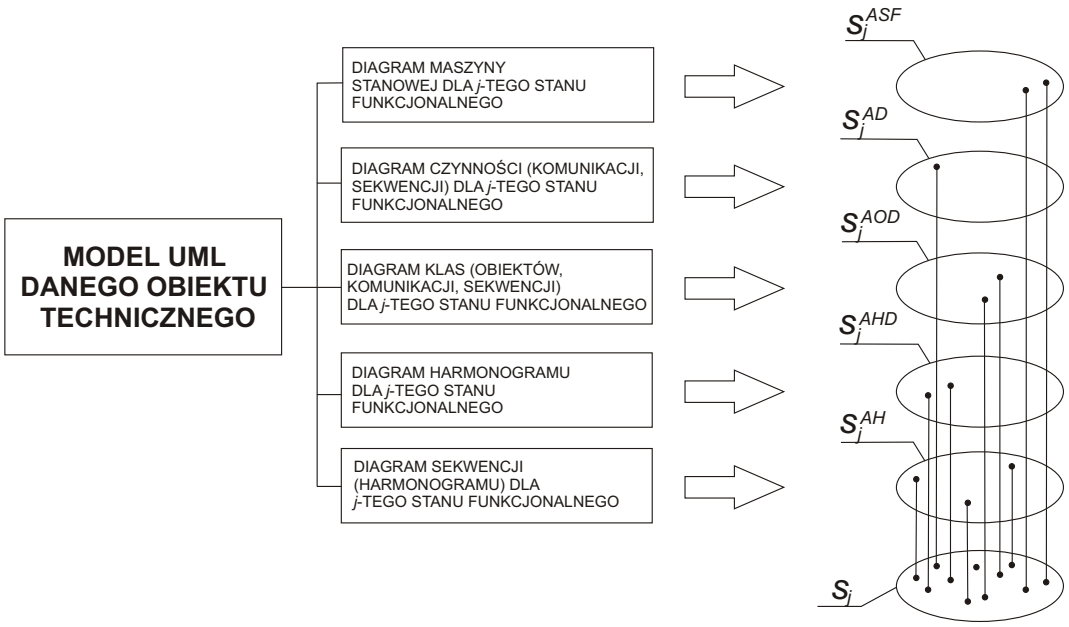
## 4.2. Opis działania obiektu w języku UML

Kolejny krok tworzenia wieloaspektowego modelu diagnostycznego polega na opisaniu działania danego obiektu technicznego w języku UML w sposób jednoznaczny i pełny. Sprowadza się to do zastosowania metody, przedstawionej np. w [69, 84], według której tworzony jest model zorientowanego obiektowo systemu informatycznego, przy czym wystarczy opracować tylko te diagramy, które wyszczególniono w tab. 3.1.

Podczas tworzenia wymaganych diagramów należy brać pod uwagę zbiór $Z$ zidentyfikowanych wcześniej stanów technicznych obiektu, gdyż kompletny opis działania obiektu, oprócz stanu bazowego, powinien również uwzględniać przypadek wystąpienia innych, możliwych do detekcji, stanów technicznych. Należy podkreślić, że ze względu na iteracyjny charakter modelowania w języku UML, proces ten może być czasochłonny.

## 4.3. Zbiór cech sygnałów diagnostycznych

W wieloaspektowym podejściu do modelowania, zbiór cech każdego sygnału diagnostycznego stanowi sumę odpowiednich podzbiorów, które odnoszą się do wyróżnionych punktów widzenia. Każdy podzbiór dotyczy tylko tych cech sygnałów diagnostycznych, które identyfikowane są przy pomocy odpowiedniego diagramu UML. Ilustruje to rys. 4.1.




Rys. 4.1: Identyfikacja podzbiorów cech sygnałów diagnostycznych dla $j$-tego stanu funkcjonalnego

gdzie:

$S_j^{ASF}$ — podzbiór cech sygnału diagnostycznego, rozpatrywanych w aspekcie stanów funkcjonalnych obiektu dla $j$-tego stanu funkcjonalnego;

$S_j^{AD}$ — podzbiór cech sygnału diagnostycznego, rozpatrywanych w aspekcie działania elementów obiektu dla $j$-tego stanu funkcjonalnego;

$S_j^{AOD}$ — podzbiór cech sygnału diagnostycznego, rozpatrywanych w aspekcie ograniczeń działania elementów obiektu dla $j$-tego stanu funkcjonalnego;

$S_j^{AHD}$ — podzbiór cech sygnału diagnostycznego, rozpatrywanych w aspekcie harmonogramu działania elementów obiektu dla $j$-tego stanu funkcjonalnego;

$S_j^{AH}$ — podzbiór cech sygnału diagnostycznego, rozpatrywanych w aspekcie historii elementów obiektu dla $j$-tego stanu funkcjonalnego;
$S_j$ — podzbiór rozpatrywanych cech sygnału diagnostycznego dla $j$-tego stanu funkcjonalnego.

Można zauważyć, że w zbiorze $S_j$ rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych nie znajduje się podzbiór związany z aspektem struktury obiektu. Jest tak, ponieważ z punktu widzenia diagnostyki technicznej najistotniejsze są diagramy opisujące działanie obiektu. Nie oznacza to jednak, że pomijana jest informacja o strukturze obiektu, gdyż informacja ta jest uwzględniana podczas tworzenia diagramów opisujących działanie obiektu. Oczywiście możliwe jest określenie podzbioru cech sygnałów diagnostycznych, który dotyczyłby aspektu struktury obiektu. Wówczas konieczne jest zastosowanie odpowiednich narzędzi umożliwiających weryfikację, np. kompletności elementów obiektu.

## 4.4. Tworzenie modeli aspektowych

W danym stanie funkcjonalnym obserwowane z określonego punktu widzenia (aspektu) cechy sygnałów diagnostycznych przyjmują konkretne wartości, zależne od aktualnego stanu technicznego obiektu. Niech $V_{j,k}^{ASF}$, $V_{j,k}^{AD}$, $V_{j,k}^{AOD}$, $V_{j,k}^{AHD}$, $V_{j,k}^{AH}$ oznaczają zbiory wartości cech sygnałów diagnostycznych, określonych odpowiednio przez $S_j^{ASF}$, $S_j^{AD}$, $S_j^{AOD}$, $S_j^{AHD}$, $S_j^{AH}$, dla konkretnego stanu technicznego $z_k$, rozpatrywanego w $j$-tym stanie funkcjonalnym, przy czym $j \in J = \{1, 2, \ldots, m\}$ natomiast $k \in K = \{0, 1, 2, \ldots, n\}$. Wobec powyższego możliwe jest wyodrębnienie następujących rodzin zbiorów:

$$\begin{aligned}
\forall j \in J\ \forall z_{k\in K} \in Z_j^* &: S_j^{ASF*} = \{V_{j,k}^{ASF}\} \\
\forall j \in J\ \forall z_{k\in K} \in Z_j^* &: S_j^{AD*} = \{V_{j,k}^{AD}\} \\
\forall j \in J\ \forall z_{k\in K} \in Z_j^* &: S_j^{AOD*} = \{V_{j,k}^{AOD}\} \\
\forall j \in J\ \forall z_{k\in K} \in Z_j^* &: S_j^{AHD*} = \{V_{j,k}^{AHD}\} \\
\forall j \in J\ \forall z_{k\in K} \in Z_j^* &: S_j^{AH*} = \{V_{j,k}^{AH}\}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Wówczas modele aspektowe dla $j$-tego stanu funkcjonalnego można rozpatrywać jako modele relacji $R_j^{ASF}$, $R_j^{AD}$, $R_j^{AOD}$, $R_j^{AHD}$, $R_j^{AH}$ pomiędzy rodzinami zbiorów (4.5) i odpowiednimi zbiorami (4.3), tzn.

$$\begin{aligned}
R_j^{ASF} &\subset S_j^{ASF*} \times Z_j^* \\
R_j^{AD} &\subset S_j^{AD*} \times Z_j^* \\
R_j^{AOD} &\subset S_j^{AOD*} \times Z_j^* \\
R_j^{AHD} &\subset S_j^{AHD*} \times Z_j^* \\
R_j^{AH} &\subset S_j^{AH*} \times Z_j^*
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Innymi słowy, w odróżnieniu od tradycyjnego podejścia, gdzie jeden (globalny) model diagnostyczny (model relacji (2.8)) identyfikowany jest na podstawie jednego zbioru danych uczących (2.9), w tym wypadku, tworzone są lokalne modele diagnostyczne (4.6) w oparciu o odpowiedni (przeznaczony dla tego modelu) zbiór danych uczących.

Wybór postaci modeli aspektowych (diagnostycznych) może zostać przeprowadzony na podstawie kryteriów przedstawionych w punkcie 2.2.1. Jeżeli opracowywany będzie model aspektowy dla każdego rozpatrywanego punktu widzenia opisującego działanie obiektu (5 aspektów), to liczbę tych modeli można określić na podstawie następującego równania:

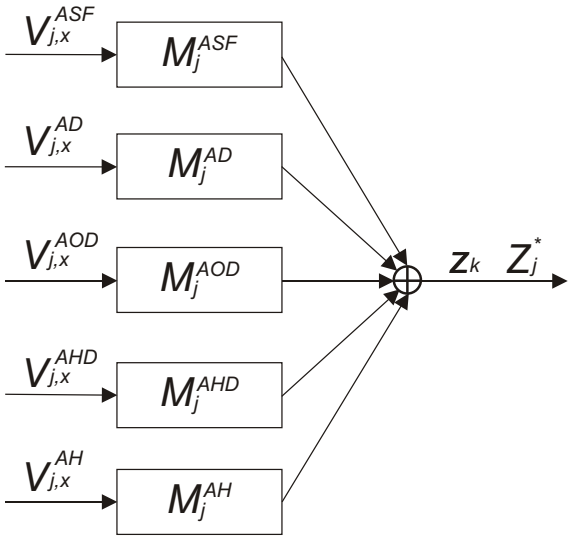
$$N = 5m \tag{4.7}$$

gdzie $m$ oznacza liczbę rozpatrywanych stanów funkcjonalnych obiektu.

## 4.5. Określenie wyjścia modelu wieloaspektowego

Otrzymany zbiór modeli aspektowych nie jest jeszcze wieloaspektowym modelem diagnostycznym, ponieważ konieczne jest powiązanie wyjść modeli aspektowych w jedno wyjście, będące wyjściem modelu wieloaspektowego. Dopiero łączne rozpatrywanie modeli aspektowych pozwala reprezentować relację, która powinna być odzwierciedlona przez wieloaspektowy model diagnostyczny.

Jak wspomniano wcześniej (punkt 2.3.2) łączenie wyjść modeli składowych może zostać zrealizowane albo poprzez uzgadnianie wyjść, albo poprzez ich agregację. Wybór odpowiedniej metody powinien zależeć m.in. od przyjętej postaci modeli aspektowych. Rys. 4.2 przedstawia zastosowanie operatora agregacji wyjść $\oplus$ dla $j$-tego stanu funkcjonalnego.




Rys. 4.2: Agregacja wyjść modeli aspektowych dla $j$-tego stanu funkcjonalnego

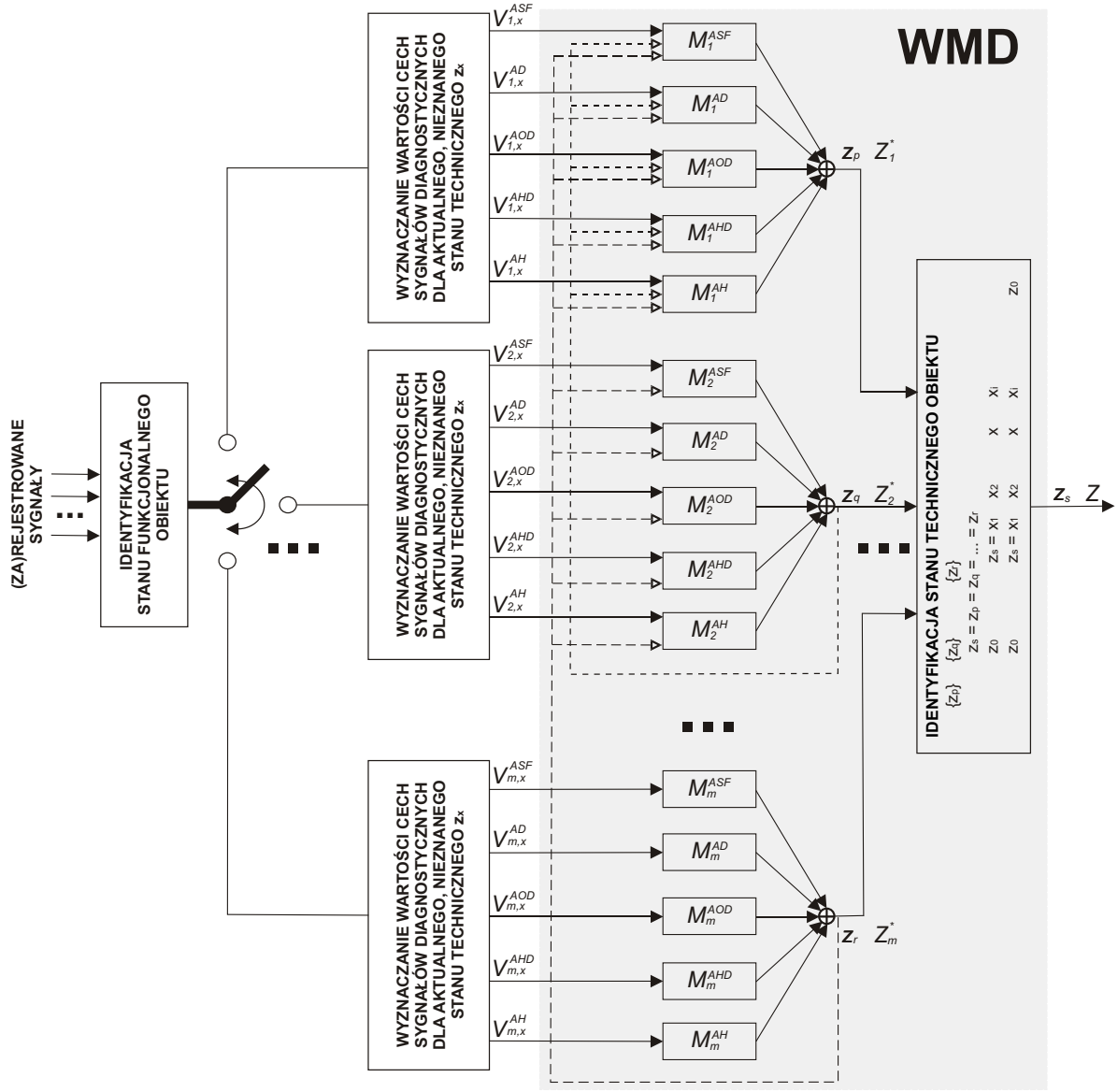
Jeżeli opracowany model działa poprawnie, to określony na jego podstawie stan techniczny $z_k$ odpowiada rzeczywistemu stanowi $z_x$ $(x = k)$, dla którego wyznaczone zostały zbiory wartości cech sygnałów diagnostycznych $V_{j,x}^{ASF}$, $V_{j,x}^{AD}$, $V_{j,x}^{AOD}$, $V_{j,x}^{AHD}$, $V_{j,x}^{AH}$.

## 4.6. Postać ogólna modelu wieloaspektowego

Przedstawiony na rys. 4.2 zbiór powiązanych ze sobą modeli aspektowych może być traktowany jako szczególna postać wieloaspektowego modelu diagnostycznego. Sytuacja ta ma miejsce wtedy, gdy działanie obiektu opisuje jeden stan funkcjonalny $(m = 1)$.

Jeżeli w działaniu obiektu rozróżniane są co najmniej dwa stany funkcjonalne, to konieczne jest rozważenie możliwości zmiany konkluzji sformułowanych dla danego stanu funkcjonalnego na podstawie otrzymanych później konkluzji dotyczących innego stanu funkcjonalnego. Przykład: na podstawie obserwacji działania obiektu w drugim stanie funkcjonalnym sformułowana została diagnoza wskazująca **prawdopodobną** niesprawność grzałki, natomiast w trzecim stanie funkcjonalnym stwierdzono **z całkowitą pewnością**, iż grzałka jest sprawna. W takim wypadku można przyjąć, że była ona sprawna także w drugim stanie funkcjonalnym. Po wprowadzeniu tej informacji do modeli diagnostycznych dotyczących drugiego stanu funkcjonalnego następuje zmiana sformułowanych wcześniej dla tego stanu konkluzji, przy czym można oczekiwać, że trafność diagnozy wzrośnie.

Ogólną postać wieloaspektowego modelu diagnostycznego (WMD) wraz z ideą jego zastosowania ilustruje rys. 4.3. Możliwość zmiany konkluzji reprezentowana jest w postaci linii przerywanych. W celu zwiększenia czytelności rysunku, nie przedstawiono na nim przypadku, gdy rozpatrywany obiekt techniczny znajduje się w danym stanie funkcjonalnym więcej niż jeden raz.




Rys. 4.3: Postać ogólna wieloaspektowego modelu diagnostycznego (WMD) wraz z ideą jego zastosowania

# Rozdział 5

# Przykład zastosowania opracowanej metody

Prezentowany przykład zastosowania opracowanej metody tworzenia wieloaspektowego modelu diagnostycznego dotyczy obiektu, który spełnia wymagania przedstawione w punkcie 3.1.3. W działaniu obiektu wyodrębniono i szczegółowo opisano 9 stanów funkcjonalnych. Zidentyfikowano zbiór możliwych do rozpoznania stanów technicznych obiektu, przy czym uwzględniano zarówno proste jak i złożone stany techniczne. Przedstawiono sygnały, które stanowią wystarczający nośnik informacji o rozpatrywanych stanach technicznych obiektu.

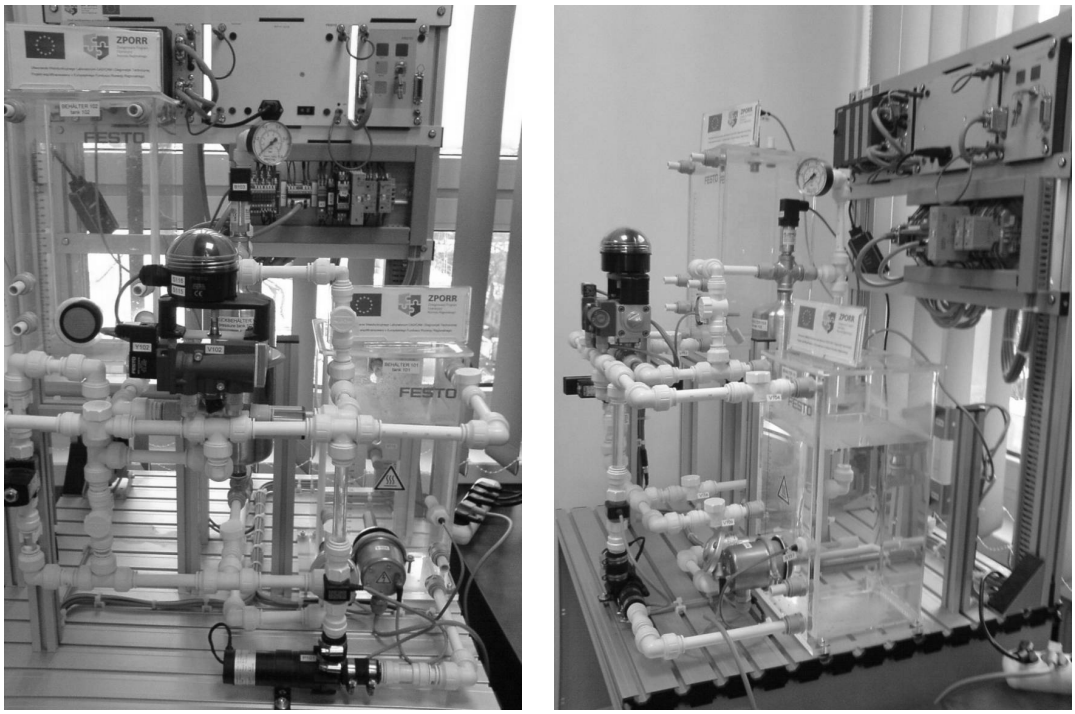
Istotną częścią niniejszego rozdziału jest punkt, w którym pokazano zbiór diagramów UML opisujących działanie obiektu z uwzględnieniem wyróżnionych aspektów. Identyfikacji zbioru cech sygnałów diagnostycznych dokonano na podstawie wiedzy o działaniu obiektu reprezentowanej w postaci opracowanych diagramów UML.

W wyniku przeprowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych pozyskano zbiory danych uczących, które umożliwiły skonstruowanie modeli aspektowych. Wszystkie modele aspektowe reprezentowano w postaci sieci przekonań, przy czym strukturę i parametry większości modeli określono z zastosowaniem odpowiednich algorytmów.

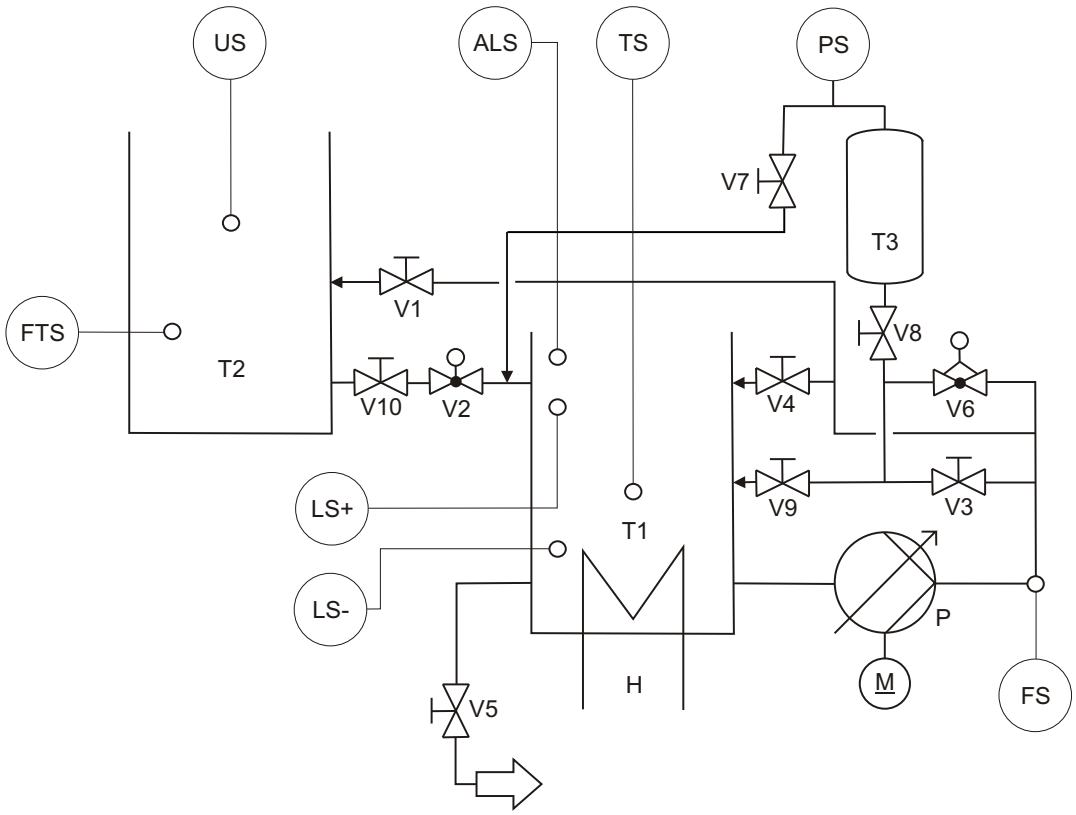
Przyjęty sposób reprezentacji modeli aspektowych umożliwił zastosowanie teorii funkcji przekonania, w celu wyznaczenia wyjścia wieloaspektowego modelu diagnostycznego. W ostatnim punkcie rozdziału przedstawiono postać opracowanego modelu.

## 5.1. Wybrany obiekt badań

Jako obiekt badań wybrano stanowisko *FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C* (rys. 5.1 i 5.2). Rozpatrywany obiekt umożliwia diagnostykę procesów ciągłych i stanowi fizyczną miniaturyzację instalacji przemysłowej, stosowanej, np. w przemyśle chemicznym, spożywczym itp.




Rys. 5.1: FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C




Rys. 5.2: Schemat rozpatrywanego obiektu technicznego (na podstawie [33])

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;
Vi — zawory ręczne (i = 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10; V5 — zawór spustowy).

Rys. 5.2 przedstawia w sposób schematyczny budowę obiektu, przy czym na rysunku nie pokazano: panelu sterowania, programowalnego sterownika logicznego (ang. *Programmable Logic Controller*, PLC), przyłączy wejść/wyjść cyfrowych i analogowych, przetworników sygnałów prąd–napięcie, częstotliwość–napięcie, termopara–napięcie.

Wymienione elementy, stanowiące układ sterowania działaniem obiektu, umożliwiają regulację jednej z czterech obserwowanych 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 Vi.

## 5.2. Działanie rozpatrywanego obiektu

Działanie obiektu sterowane jest opracowanym przez autora programem, który wykonywany jest przez sterownik PLC. Program umożliwia regulację dwóch spośród czterech wymienionych wcześniej zmiennych procesowych (chcąc skrócić czas prowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych, zrezygnowano z możliwości regulacji temperatury cieczy w zbiorniku T1 z powodu czasochłonności procesu studzenia oraz zrezygnowano z możliwości regulacji poziomu cieczy w zbiorniku T2). Ponieważ strukturę każdego układu, umożliwiającego regulację danej zmiennej procesowej uzyskuje się poprzez odpowiednią kombinację otwarcia/zamknięcia zaworów ręcznych, zatem w trakcie działania obiektu czynności te musi wykonywać operator.

W działaniu obiektu wyodrębniono 9 stanów funkcjonalnych stanowiących zbiór

$$\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \ldots, \phi_9\}\,. \tag{5.1}$$

### 5.2.1. Stan funkcjonalny $\phi_1$

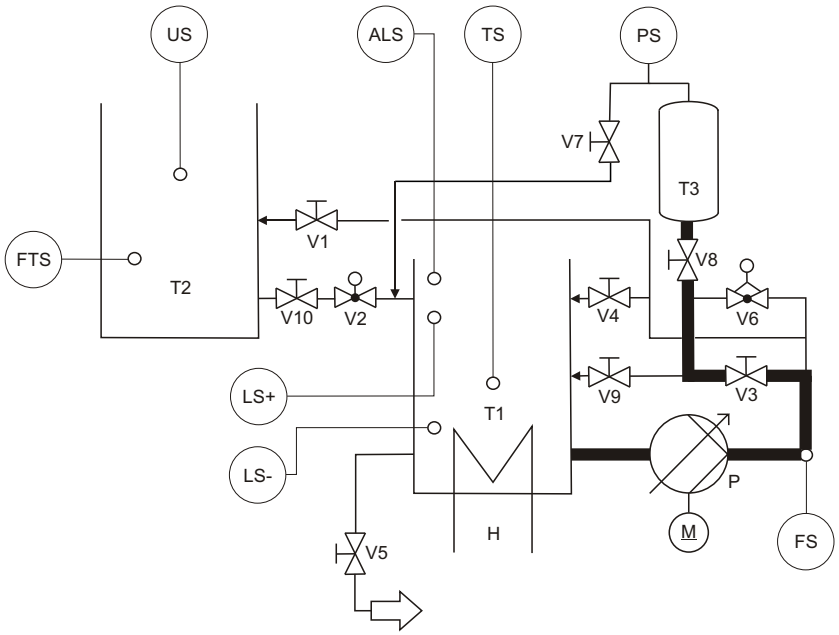
Stan funkcjonalny $\phi_1$ to stan postoju obiektu, przy czym początkowo charakteryzuje się on następującymi cechami:

- 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 $155 \pm 5$ 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.

### 5.2.2. Stan funkcjonalny $\phi_2$

Po sprawdzeniu, że obiekt znajduje się w początkowym stanie postoju, operator obiektu otwiera zawory ręczne V3 i V8 (rys. 5.3) 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 regula-



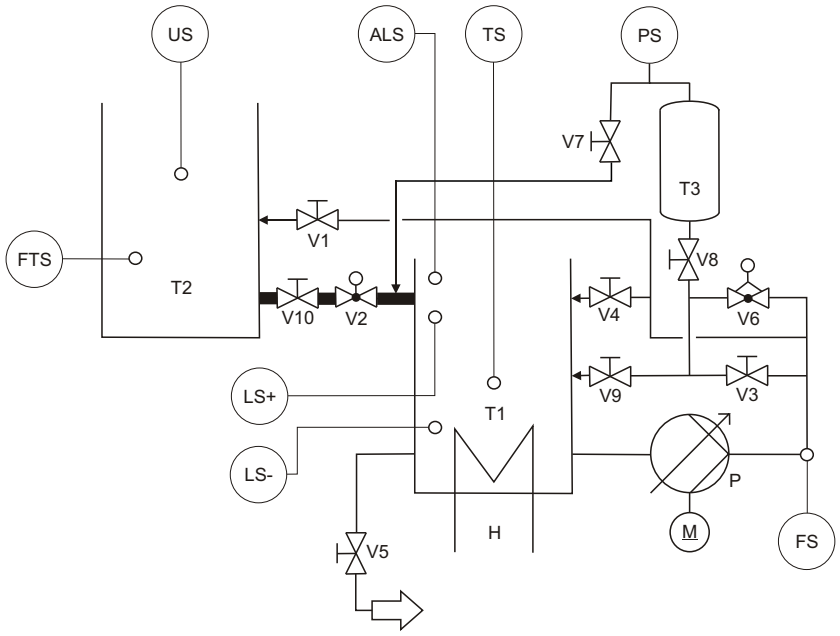

Rys. 5.3: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_2$

tor proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (ang. *Proportional-Integral-Derivative controller*, PID), o współczynniku wzmocnienia (proporcjonalności) $k_p = 1$, czasie zdwojenia (całkowania) $t_i = 1s$ i czasie wyprzedzenia (różniczkowania) $t_d = 1s$.

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 wstrzymanie działania obiektu na czas 5 sekund. W trakcie przerwy operator obiektu powinien zamknąć zawór ręczny V3. Obiekt przechodzi do trzeciego stanu funkcjonalnego.

### 5.2.3. Stan funkcjonalny $\phi_3$

Po otwarciu zaworu kulowego V2 następuje przepływ cieczy ze zbiornika T2 do T1 (rys. 5.4). Gdy słup cieczy w zbiorniku T2, mierzony za pomocą czujnika US, będzie miał wysokość równą 100 mm, zawór kulowy V2 jest zamykany. Wówczas w zbiorniku T1 znajduje się wymagana ilość cieczy. Od tego momentu operator obiektu ma 5 sekund czasu na otwarcie zaworu ręcznego V4. Obiekt przechodzi do kolejnego stanu funkcjonalnego.




Rys. 5.4: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_3$

### 5.2.4. Stan funkcjonalny $\phi_4$

Mieszanie cieczy w zbiorniku T1 rozpoczyna się z chwilą uruchomienia pompy P. Następuje przepływ cieczy od zbiornika T1 przez zawór ręczny V4 z powrotem do zbiornika T1 (rys. 5.5), przy czym wymagane natężenie przepływu wynosi 2 l/min. Wartość ta stabilizowana jest za pomocą regulatora o następujących nastawach: $k_p = 2$, $t_i = 2s$, $t_d = 0s$ (regulator PI). Proces ten trwa 30 sekund.

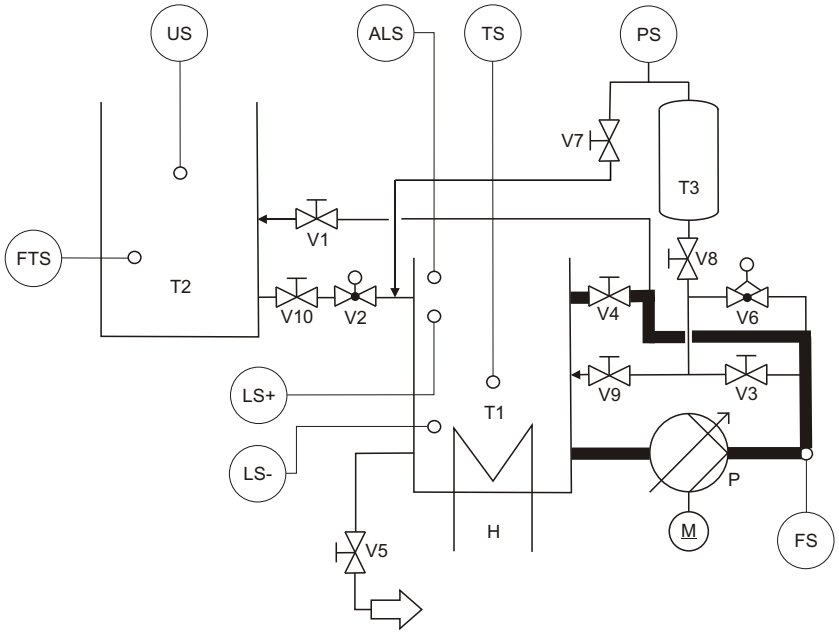
Po tym czasie pompa P jest wyłączana i następuje 5 sekundowa przerywa, w czasie której operator obiektu powinien zamknąć zawór ręczny V4 oraz, tuż przed jej zakończeniem, otworzyć zawór ręczny V1. Obiekt przechodzi do kolejnego stanu funkcjonalnego.

### 5.2.5. Stan funkcjonalny $\phi_5$

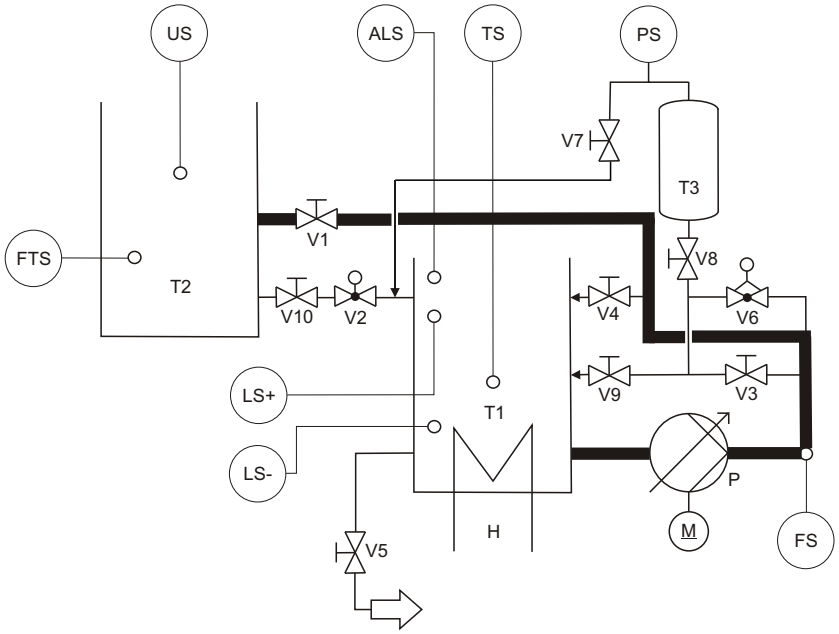
Po uruchomieniu pompy P zbiornik T2 napełniany jest cieczą pochodzącą ze zbiornika T1 (rys. 5.6). Proces ten trwa do momentu, gdy słup cieczy w zbiorniku T2 osiągnie wymaganą wysokość równą 225 mm. Wówczas pompa P jest wyłączana. Natychmiast po tym operator powinien zamknąć zawór ręczny V1. Obiekt przechodzi do kolejnego stanu funkcjonalnego.

### 5.2.6. Stan funkcjonalny $\phi_6$

Operator obiektu otwiera zawór ręczny V9 a następnie V8. W wyniku tej czynności ciecz znajdująca się w zbiorniku ciśnieniowym T3 przepływa gwałtownie do zbiornika T1 (rys. 5.7). Jest to spowodowane nadciśnieniem powietrza panującym w zbiorniku T3. Po rozprężeniu gazu operator

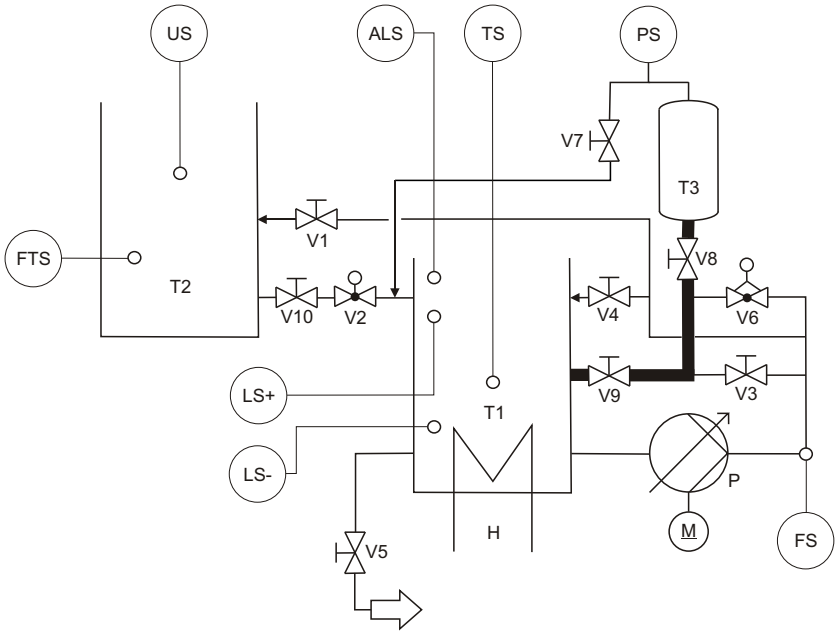



Rys. 5.5: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_4$




Rys. 5.6: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_5$

otwiera zawór ręczny V7 w celu umożliwienia przepływu resztek cieczy ze zbiornika ciśnieniowego do zbiornika dolnego T1, a następnie zamyka zawór ręczny V8. Realizacja powyższych czynności powinna zakończyć się przed upływem 20. sekund, tzn. zanim obiekt przejdzie do kolejnego stanu funkcjonalnego.




Rys. 5.7: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_6$

### 5.2.7. Stan funkcjonalny $\phi_7$

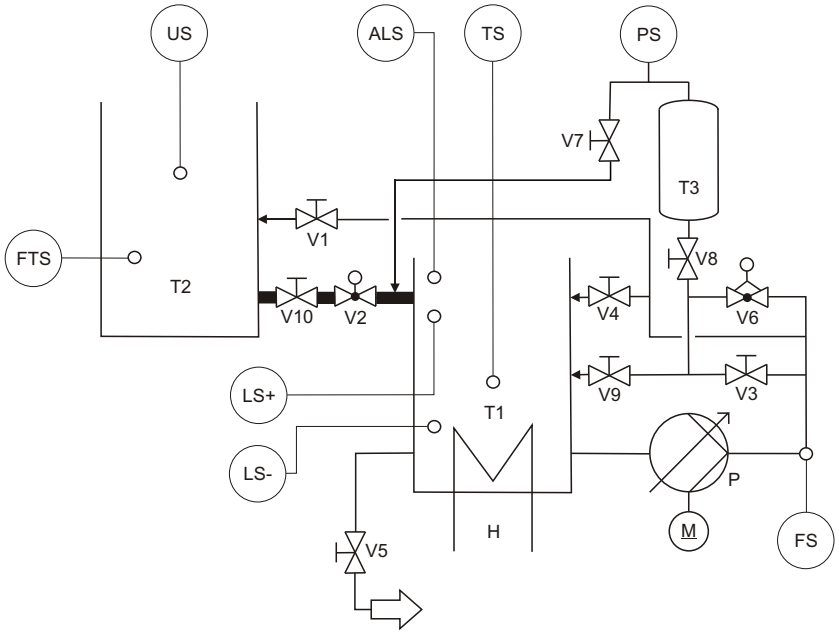
W wyniku otwarcia zaworu kulowego V2 następuje napełnianie zbiornika T1 cieczą pochodzącą ze zbiornika T2 (rys. 5.8) aż do aktywacji czujnika zbliżeniowego dolnego LS-. Wówczas zawór kulowy V2 jest zamykany. Zanim obiekt znajdzie się w kolejnym stanie funkcjonalnym, wstrzymuje swoje działanie na czas 5 sekund.

### 5.2.8. Stan funkcjonalny $\phi_8$

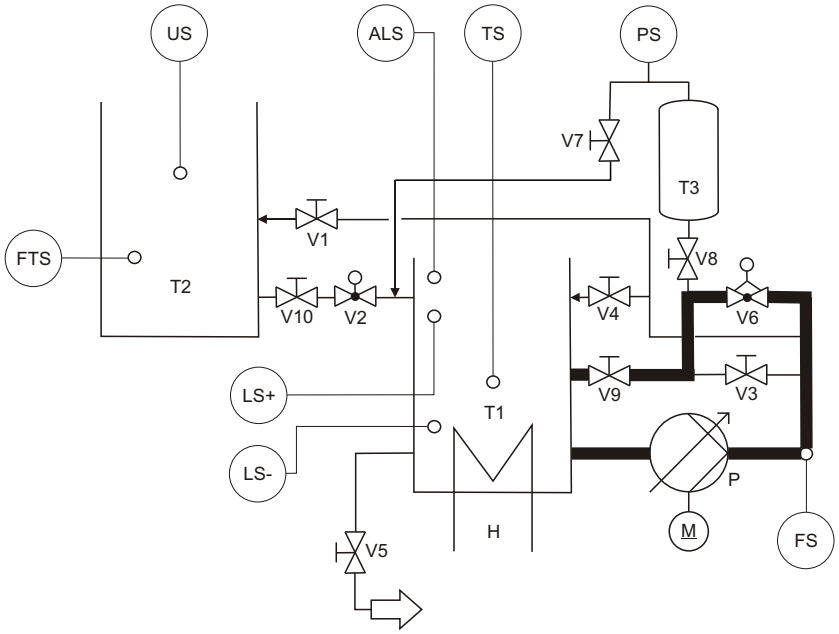
Po otwarciu zaworu proporcjonalnego V6 i uruchomieniu pompy P następuje przepływ cieczy ze zbiornika T1 przez zawór proporcjonalny V6 z powrotem do zbiornika T1 (rys. 5.9). Wymagana wartość natężenia przepływu, równa 2 l/min, stabilizowana jest za pomocą regulatora o identycznych nastawach jak dla stanu funkcjonalnego opisanego w punkcie 5.2.4, przy czym w tym wypadku elementem wykonawczym jest zawór V6. Tak samo jak poprzednio proces ten trwa 30 sekund. Z chwilą upłynięcia tego czasu pompa P jest wyłączana oraz zamykany jest zawór proporcjonalny V6. Obiekt przerywa działanie na 5 sekund po to aby umożliwić operatorowi przygotowanie obiektu do przejścia w ostatni stan funkcjonalny. Czynności operatora sprowadzają się do zamknięcia zaworu ręcznego V9 oraz otwarcia zaworu ręcznego V1 tuż przed upływem 5 sekundowej przerwy.

### 5.2.9. Stan funkcjonalny $\phi_9$

W ostatnim stanie funkcjonalnym wypompowywany jest słup cieczy o wysokości 50 mm ze zbiornika T1 do zbiornika T2 (rys. 5.10). Realizowane jest to w następujący sposób: za pomocą ultradźwiękowego czujnika poziomu US dokonywany jest pomiar aktualnego poziomu cieczy w zbiorniku

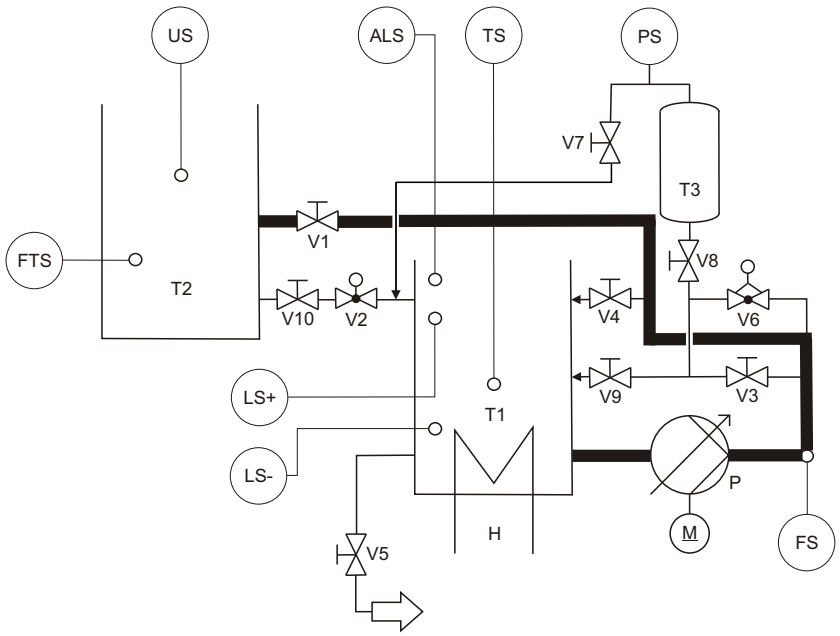



Rys. 5.8: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_7$




Rys. 5.9: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_8$

T2. Wartość jest zapamiętywana. W celu zwiększenia poziomu cieczy w zbiorniku T2 o 50 mm uruchamiana jest pompa P. Po osiągnięciu wymaganego poziomu cieczy w zbiorniku T2 pompa P jest wyłączana. Natychmiast po tym operator obiektu powinien zamknąć zawór ręczny V1.




Rys. 5.10: Schemat przepływu cieczy w stanie funkcjonalnym $\phi_9$

## 5.3. Konstruowanie modelu wieloaspektowego

Opracowywanie wieloaspektowego modelu diagnostycznego według opisanej w rozdziale 4. metody należy rozpocząć od określenia zbioru możliwych do detekcji stanów technicznych obiektu.

### 5.3.1. Identyfikacja zbioru stanów technicznych obiektu

Na podstawie analizy działania rozpatrywanego obiektu zidentyfikowano i przedstawiono w tab. 5.1 zbiór 19 prostych stanów technicznych (oprócz stanu bazowego wszystkie pozostałe stany techniczne dotyczą tylko jednego elementu obiektu). Możliwe jest jednak wystąpienie złożonego stanu technicznego, tzn. przypadku gdy w tym samym czasie niesprawne lub uszkodzone są co najmniej dwa elementy obiektu. Zatem istnieje potrzeba uwzględnienia kombinacji opisanych prostych stanów technicznych.

Tab. 5.1: 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 kanału pomiędzy zbiornikiem T1 i zbiornikiem ciśnieniowym T3 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite otwarcie zaworu ręcznego V9) |
| 5. | Nieszczelność zbiornika T3 (symulowana poprzez otwarcie zaworu ręcznego V7) |
| 6. | Czujnik ciśnienia PS nie działa poprawnie (nie wskazuje znaczących zmian wartości względnego ciśnienia powietrza w zbiorniku T3; symulowane poprzez modyfikację programu) |
| 7. | Przytkanie kanału pomiędzy zbiornikiem T1 i zbiornikiem T2 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite zamknięcie zaworu ręcznego V10) |
| 8. | Zawór kulowy V2 nie działa (nie otwiera się lub nie zamyka; symulowane poprzez modyfikację programu) |
| 9. | Czujnik poziomu cieczy US nie działa poprawnie (nie wskazuje znaczących zmian wartości poziomu cieczy w zbiorniku T2; symulowane poprzez modyfikację programu) |
| 10. | Przytkanie kanału zbiornik T1 — pompa P — zbiornik T1 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite zamknięcie zaworu ręcznego V4) |
| 11. | Nieszczelność kanału zbiornik T1 — pompa P — zbiornik T1 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite otwarcie zaworu ręcznego V1) |
| 12. | Przytkanie kanału pomiędzy zbiornikiem T1 i zbiornikiem T2 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite zamknięcie zaworu ręcznego V1) |
| 13. | Nieszczelność kanału pomiędzy zbiornikiem T1 i zbiornikiem T2 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite otwarcie zaworu ręcznego V4) |
| 14. | Nieszczelność zbiornika T2 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite otwarcie zaworu ręcznego V1, przy wyłączonej pompie P) |
| 15. | Czujnik zbliżeniowy dolny LS- nie działa poprawnie (nieaktywny lub aktywny przez cały czas; symulowane poprzez modyfikację programu) |
| 16. | Zawór proporcjonalny V6 nie działa (zamknięty i zablokowany lub otwarty i zablokowany; symulowane poprzez modyfikację programu) |
| 17. | Przytkanie kanału zbiornik T1 — zawór proporcjonalny V6 — zbiornik T1 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite zamknięcie zaworu ręcznego V9) |
| 18. | Nieszczelność kanału zbiornik T1 — zawór proporcjonalny V6 — zbiornik T1 (dwa warianty, symulowane poprzez częściowe lub całkowite otwarcie zaworu ręcznego V3) |
| 19. | Czujnik natężenia przepływu cieczy FS nie działa poprawnie (nie wskazuje znaczących zmian wartości natężenia przepływu cieczy; symulowane poprzez modyfikację programu) |

Przyjęto, że rozpatrywane będą wyłącznie sytuacje, dla których co najwyżej trzy elementy obiektu znajdują się w stanie technicznym niedopuszczalnym. Wynika to z potrzeby zapewnienia odpowiedniego stopnia pewności formułowanej diagnozy [46]. W związku z tym liczba $L$ możliwych do detekcji prostych i złożonych stanów technicznych obiektu wynosi

$$L = 1 + \sum_{i=1}^{m=3} \frac{18!}{(18-i)!i!} = 1 + 18 + 153 + 816 = 988 \tag{5.2}$$

przy czym nie uwzględnia ona wariantów niektórych prostych stanów technicznych.

Wydaje się, że dla rozpatrywanego obiektu branie pod uwagę wszystkich układów nie jest konieczne. Sytuacja ta ma miejsce wtedy, gdy dwa lub trzy różne elementy obiektu, znajdujące się w stanie

technicznym niedopuszczalnym, działają w różnych stanach funkcjonalnych (np. pompa P nie pompuje, zawór kulowy V2 zamknięty i zablokowany, działające odpowiednio w stanie funkcjonalnym $\phi_2$ oraz $\phi_3$). W danej chwili obiekt znajduje się zawsze w jednym, konkretnym stanie funkcjonalnym, np. $\phi_3$. Niesprawność zaworu kulowego V2 nie zależy od stanu technicznego pompy P, zatem niektóre złożone stany techniczne (w przykładzie niesprawność pompy P i zaworu kulowego V2) mogą być traktowane jako superpozycja prostych stanów technicznych.

Wobec powyższego dopuszczalne jest przyjęcie założenia, iż zbiór $Z$ możliwych do detekcji stanów technicznych obiektu może zostać określony nie wprost, tzn. jako suma zbiorów stanów technicznych identyfikowanych niezależnie dla wszystkich stanów funkcjonalnych obiektu (4.4). Wynikający z tego błąd, który polega na nieuwzględnieniu niektórych złożonych stanów technicznych obiektu nie powinien być duży, zwłaszcza, jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że prawdopodobieństwo niezależnego wystąpienia kilku niesprawności lub uszkodzeń, równe iloczynowi odpowiednich prawdopodobieństw, jest zazwyczaj niewielkie.

Chcąc jeszcze bardziej zredukować liczbę uwzględnianych układów przyjęto, że w danej chwili dowolny kanał może być albo przytkany, albo nieszczelny. Ponadto zdecydowano, że opracowywany model diagnostyczny nie będzie uwzględniał stanu funkcjonalnego $\phi_1$, tzn. stanu postoju obiektu, ponieważ stan ten jest oceniany przez operatora (m.in. weryfikacja zamknięcia odpowiednich zaworów ręcznych) zanim obiekt zostanie uruchomiony.

Zidentyfikowane zbiory stanów technicznych obiektu dla kolejnych stanów funkcjonalnych przedstawiono w tab. A-1 do A-7 (patrz dodatek A), przy czym w odniesieniu do ostatniego stanu funkcjonalnego odpowiedni zbiór przedstawia tab. A-4. Szczegółowy opis rozpatrywanych stanów technicznych obiektu zamieszczono w dodatku B.

Zbiór $Z$ wszystkich badanych stanów technicznych obiektu można opisać następującym równaniem:

$$Z = \bigcup_{j=2}^{8} Z_j^* = \{z_i : i = 0, 1, 2, \ldots 184\} \tag{5.3}$$

Pozyskanie informacji o rozpatrywanych stanach technicznych obiektu jest możliwe m.in. poprzez pomiar przebiegu określonych wielkości fizycznych. Przedstawione na rys. 5.2 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. 5.2 przedstawiono te sygnały, które powinny stanowić wystarczający nośnik informacji o rozważanych stanach technicznych badanego obiektu.

Tab. 5.2: Zbiór rozpatrywanych sygnałów

| L.p. | RODZAJ SYGNAŁU |
|---|---|
| 1. | sygnał analogowy zmian wielkości sterowanej (prędkość obrotowa wirnika pompy P lub stopień otwarcia zaworu proporcjonalnego V6) |
| 2. | sygnał analogowy zmian ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 (uzyskiwany z czujnika ciśnienia PS) |
| 3. | sygnał analogowy zmian poziomu cieczy w zbiorniku T2 (uzyskiwany z ultradźwiękowego czujnika poziomu US) |
| 4. | sygnał binarny określający stan funkcjonalny czujnika LS- (tzn. aktywny lub nieaktywny) |
| 5. | sygnał binarny określający stan funkcjonalny zaworu kulowego V2 (tzn. otwarty lub zamknięty) |
| 6. | sygnał analogowy zmian natężenia przepływu cieczy (uzyskiwany z czujnika natężenia przepływu cieczy FS) |

### 5.3.2. Opis działania obiektu w języku UML

Rysunki zamieszczone w dodatku C przedstawiają powiązane ze sobą diagramy UML opisujące działanie rozpatrywanego obiektu technicznego oraz pozostałe wyodrębnione punkty widzenia. Przyjęto założenie, że nie jest znana historia wszystkich elementów obiektu. Wyjątek stanowi zawór kulowy V2, który jest zamykany i otwierany przez siłownik pneumatyczny. Wiadomo, że kompresor doprowadzający sprężone powietrze do odpowiedniej komory siłownika był wielokrotnie odłączany. Ilustruje to rys. C-1, z którego ponadto wynika, że operator ani razu nie sprawdził działania zaworu kulowego V2 po podłączeniu kompresora.

### 5.3.3. Identyfikacja zbioru cech sygnałów diagnostycznych

Zidentyfikowane na podstawie odpowiednich diagramów zbiory rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla kolejnych stanów funkcjonalnych przedstawiono w tabelach od numeru D-1 do D-8 (patrz dodatek D). Kolumna o nagłówku „**RYS.**" wskazuje numery rysunków, na podstawie których określono rozpatrywane cechy sygnałów diagnostycznych. W ostatniej kolumnie podano nazwę zbioru (wg punktu 4.3), do którego należy dana cecha.

### 5.3.4. Tworzenie modeli aspektowych

Biorąc pod uwagę zalety sieci bayesowskich, zdecydowano, że modele aspektowe będą reprezentowane właśnie w tej postaci. W rozpatrywanym przykładzie należy opracować 40 modeli aspektowych. Tworzenie modelu reprezentowanego w postaci sieci przekonań polega na zdefiniowaniu zmiennych i relacji między nimi (określenie struktury sieci) oraz przyjęciu odpowiednich prawdopodobieństw a priori i prawdopodobieństw warunkowych (punkt 2.2.2).

Poniżej przedstawiono sposób tworzenia modeli aspektowych dla rozpatrywanego obiektu technicznego. Przyjęto, że sieci przekonań dotyczące trzech aspektów, tzn. stanów funkcjonalnych obiektu, działania elementów obiektu i harmonogramu działania elementów obiektów będą konstruowane w sposób automatyczny. Sieci przekonań dotyczące aspektu ograniczeń działania elementów obiektu oraz aspektu historii elementów obiektu skonstruowano „ręcznie", tzn. nie zastosowano żadnego z ww. algorytmów.

#### Opracowanie zbioru danych

W wyniku przeprowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych, które polegały na zarejestrowaniu sygnałów przedstawionych w tab. 5.2 dla wszystkich rozpatrywanych w danym stanie funkcjonalnym stanów technicznych obiektu (tab. A-1 do A-7), otrzymano zbiór przykładów, po jednym dla każdego stanu technicznego (wyjątkiem jest stan bazowy $z_0$, dla którego zgromadzono osiem przykładów).

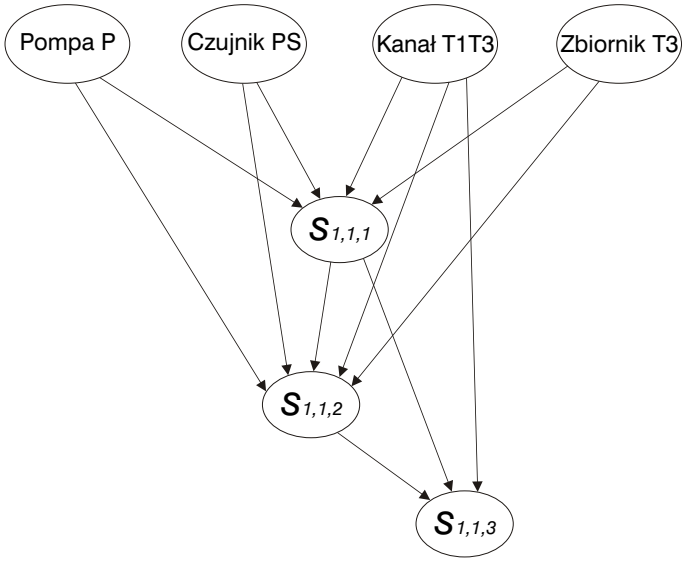
Poszczególne przykłady zostały powielone proporcjonalnie do określonego w sposób subiektywny prawdopodobieństwa zaistnienia stanu technicznego obiektu, którego dotyczył dany przykład. Tak przygotowany zbiór danych stanowił podstawę do konstruowania w sposób automatyczny wybranych sieci przekonań.

#### Określanie struktur sieci przekonań

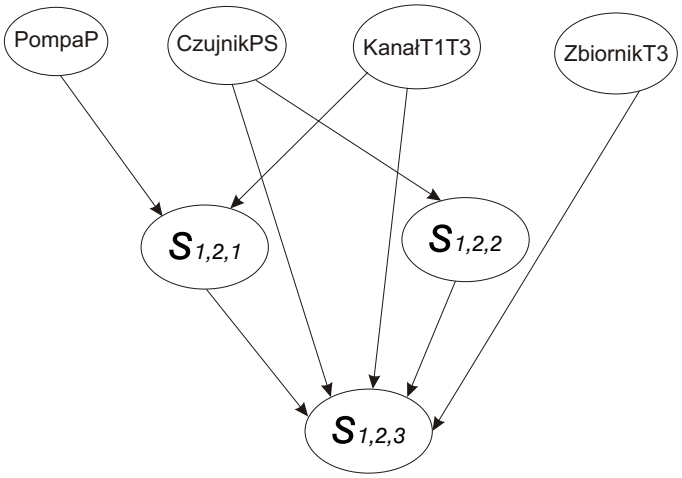
Węzły sieci przekonań dotyczące stanów technicznych obiektu określono na podstawie tab. B-1 do B-7 (patrz dodatek B), natomiast węzły dotyczące rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych wyznaczono w oparciu o tab. D-1 do D-8 (patrz dodatek D).

Po zidentyfikowaniu zmiennych, skonstruowano struktury sieci przekonań z zastosowaniem algorytmu K2 dla odpowiednich zbiorów danych. Założono, że dowolny węzeł sieci może mieć co najwyżej pięciu przodków. Ponadto, w celu ułatwienia interpretacji prawdopodobieństw przyjęto, że nie są dopuszczalne połączenia wychodzące z węzła reprezentującego cechę sygnału diagnostycznego do węzła

reprezentującego stan techniczny wybranego elementu obiektu. Rozpatrywano różne permutacje kolejności węzłów sieci. Dwie przykładowe struktury sieci, które zostały zidentyfikowane automatycznie dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$ przedstawiono na rys. 5.11 i 5.12.




Rys. 5.11: Struktura sieci bayesowskiej dotycząca stanu funkcjonalnego $\phi_2$ i aspektu stanów funkcjonalnych obiektu




Rys. 5.12: Struktura sieci bayesowskiej dotycząca stanu funkcjonalnego $\phi_2$ i aspektu działania elementów obiektu

### Określanie wartości prawdopodobieństw warunkowych

Wartości prawdopodobieństw a priori zostały określone w sposób subiektywny podczas opracowywania zbioru danych. Wstępne oszacowanie wartości prawdopodobieństw warunkowych przeprowadzono w oparciu o rozkład Dirichleta, zakładając brak jakiejkolwiek wiedzy. Następnie zaktualizowano te wartości stosując algorytm junction tree dla odpowiednich zbiorów przykładów.

### 5.3.5. Określenie wyjścia modelu wieloaspektowego

Z przyjętej postaci modeli aspektowych wynika, że ich wyjście, tzn. węzły sieci (zmienne) dotyczące stanu technicznego elementów obiektu (np. „Pompa P", „Czujnik PS", „Kanał T1T3" i „Zbiornik T3" z rys. 5.11 oraz 5.12), reprezentowane jest w postaci zbiorów stopni przekonań (np. zbiór odnoszący się do zmiennej „Pompa P": pompuje — stopień przekonania równy 0.8; nie pompuje — stopień przekonania równy 0.2). W dowolnym stanie funkcjonalnym rozpatrywanych jest pięć modeli aspektowych, zatem danej zmiennej przypisanych jest pięć zbiorów stopni przekonań, w ogólnym wypadku o różnych wartościach.

Wobec powyższego zdecydowano, że wyjście modelu wieloaspektowego w danym stanie funkcjonalnym zostanie uzyskane w wyniku agregacji stopni przekonań za pomocą reguły kombinacji Dempstera (2.29). Przykładowo, jeśli z czterech modeli aspektowych otrzymane zostaną stopnie przekonania o stanie zmiennej „Pompa P" jak poniżej,

$$\begin{aligned} m_{ASF}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.8 \\ m_{ASF}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{AD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.8 \\ m_{AD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{AHD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.2 \\ m_{AHD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{AOD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.5 \\ m_{AOD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.5 \end{aligned}$$

to w rezultacie zastosowania reguły Dempstera dla wybranych par, otrzymane nowe wartości stopni przekonań wynoszą

$$\begin{aligned} m_{ASF,AD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.94 \\ m_{ASF,AD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.06 \end{aligned}$$

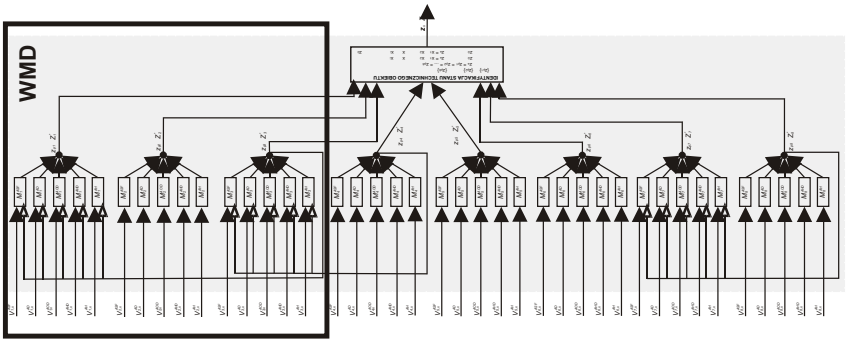
$$\begin{aligned} m_{ASF,AHD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.5 \\ m_{ASF,AHD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.5 \end{aligned}$$

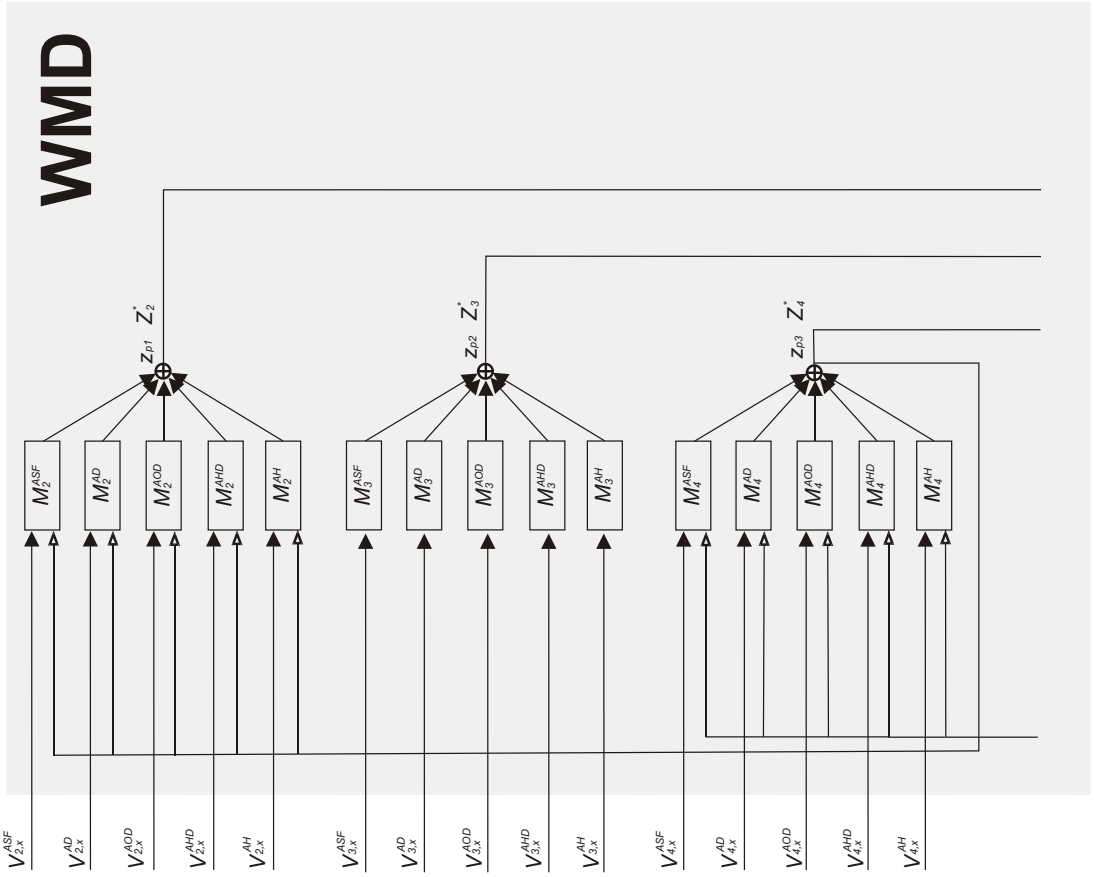
$$\begin{aligned} m_{ASF,AOD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.8 \\ m_{ASF,AOD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.2 \end{aligned}$$

natomiast stopnie przekonania uzyskane w wyniku pełnej agregacji (kolejność działań nie ma znaczenia) są następujące:

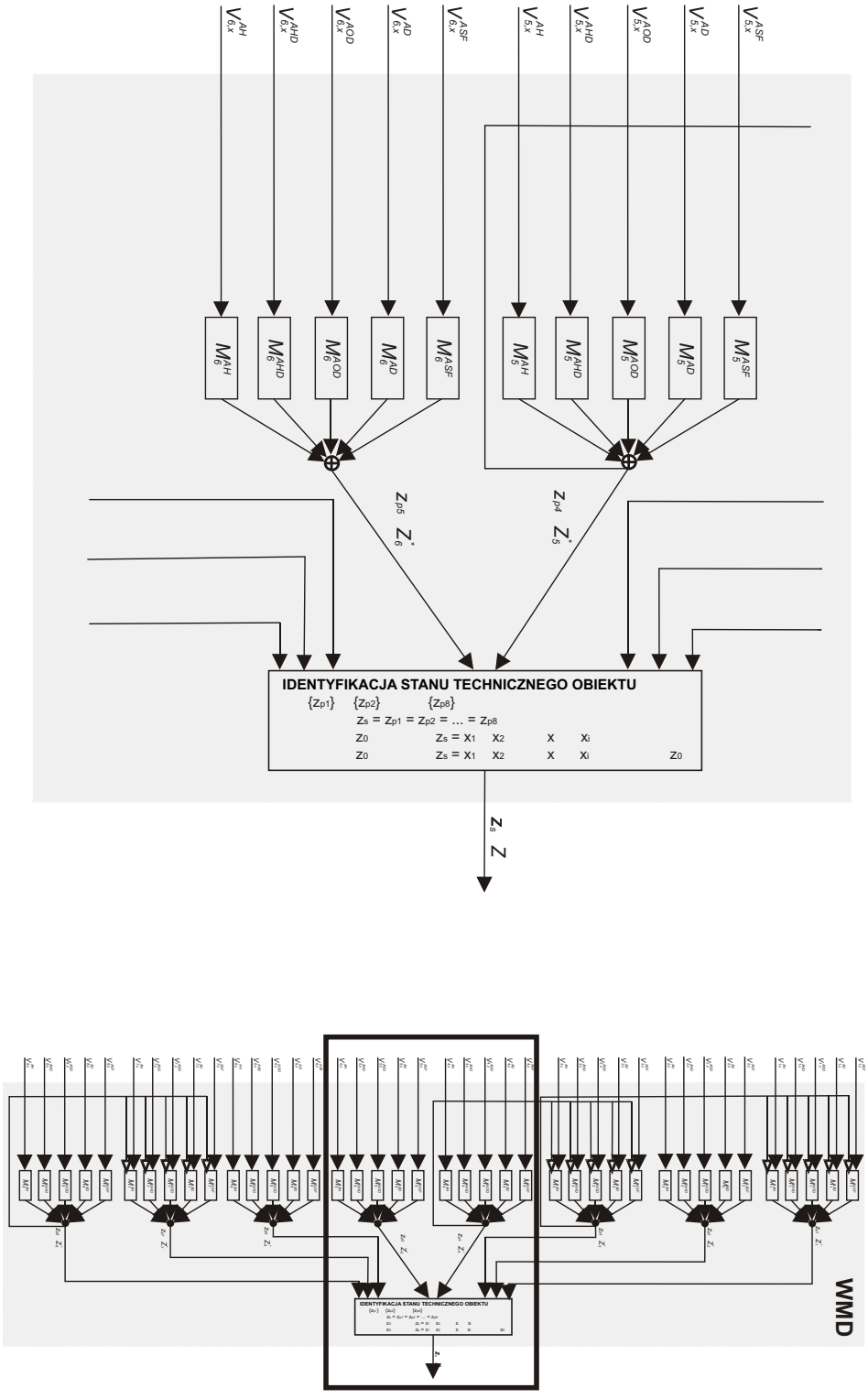
$$\begin{aligned} m_{ASF,AD,AHD,AOD}\left(PompaP : pompuje\right) &= 0.8 \\ m_{ASF,AD,AHD,AOD}\left(PompaP : nie\ pompuje\right) &= 0.2 \end{aligned}$$

Jak widać uzyskane wyniki są zgodne z intuicją.

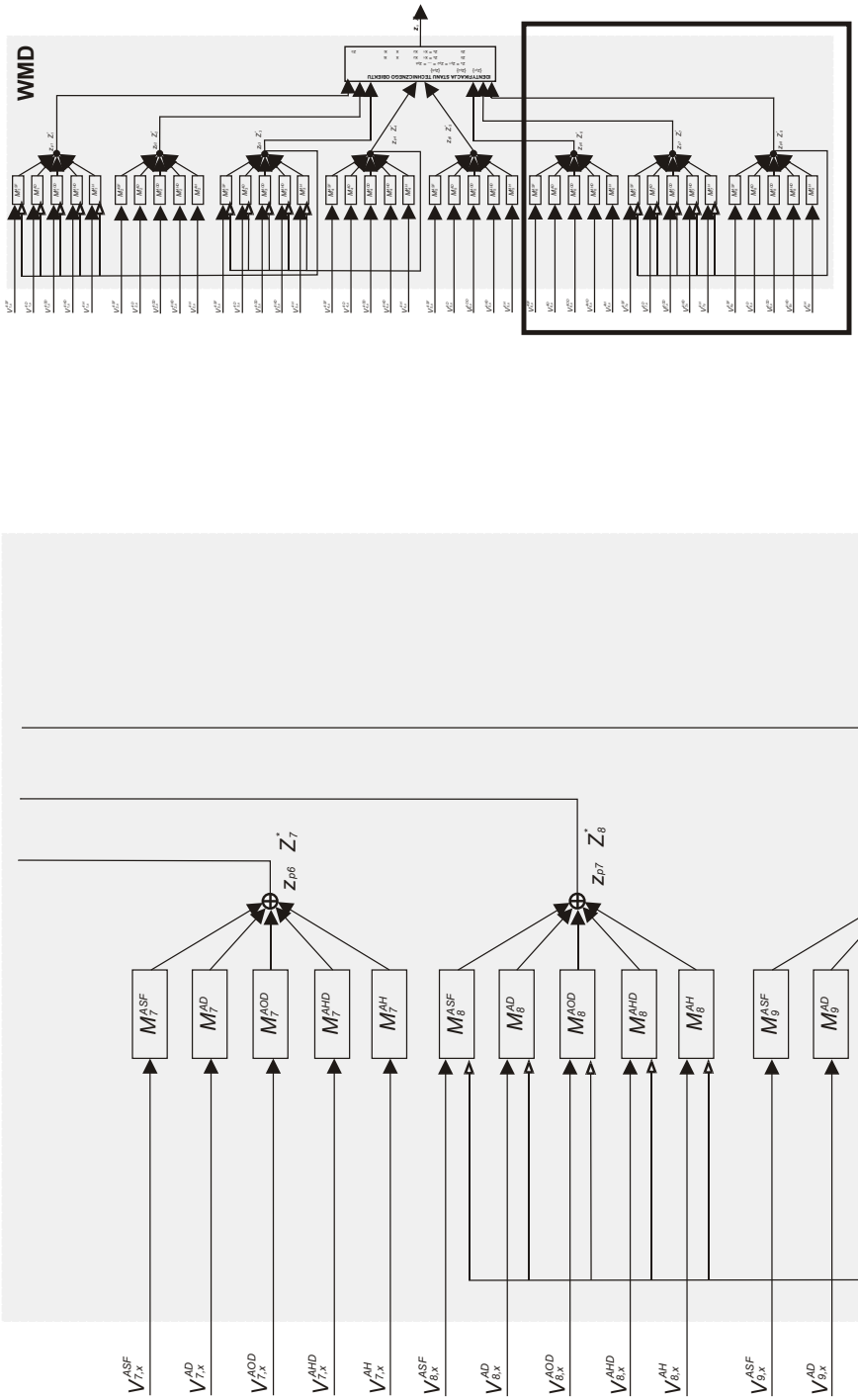



Rys. 5.13: Końcowa postać opracowanego wieloaspektowego modelu diagnostycznego (1/3)




Rys. 5.14: Końcowa postać opracowanego wieloaspektowego modelu diagnostycznego (2/3)




Rys. 5.15: Końcowa postać opracowanego wieloaspektowego modelu diagnostycznego (3/3)

### 5.3.6. Postać opracowanego modelu wieloaspektowego

W opisywanym przykładzie konstruowanie wieloaspektowego modelu diagnostycznego zostanie zakończone wtedy, gdy zagregowane modele aspektowe, ze wszystkich rozpatrywanych stanów funkcjonalnych, zostaną zintegrowane. Wówczas możliwa jest identyfikacja stanu technicznego obiektu w przestrzeni wszystkich rozpatrywanych stanów technicznych. Rys. 5.13 do 5.15 przedstawiają końcową postać opracowanego modelu diagnostycznego (WMD).

Można zauważyć, że w modelu uwzględniono możliwość zmiany sformułowanych wcześniej konkluzji (linie zakończone niewypełnionym grotem). Dzięki temu wzrosła trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$, $\phi_4$ i $\phi_8$ (patrz rozdział 6).

# Rozdział 6

# Weryfikacja opracowanego modelu

Weryfikację opracowanego modelu diagnostycznego przeprowadzono z użyciem danych, które zostały zgromadzone w wyniku czynnych eksperymentów diagnostycznych. Dla pierwszego stanu funkcjonalnego obiektu zebrano po 2 przykłady odnoszące się do każdego stanu technicznego przedstawionego w tab. A-1 (przykłady te nie były stosowane podczas identyfikacji modeli aspektowych).

W trakcie prowadzenia badań zauważono, że wyznaczone dla tych przykładów wartości cech sygnałów diagnostycznych są identyczne lub prawie identyczne jak w przykładach rozpatrywanych podczas identyfikacji modeli aspektowych. Może to wynikać z niewielkiego (nieistotnego) wpływu czynników zakłócających działanie obiektu.

Po przeprowadzeniu wyrywkowych prób dla kolejnych stanów funkcjonalnych stwierdzono taką samą sytuację. Wprowadzenie do danych odpowiedniego szumu stwarza trudności i w związku z tym zdecydowano, że w tym wypadku weryfikację opracowanego modelu diagnostycznego można przeprowadzić z zastosowaniem metody resubstytucji. Zazwyczaj konsekwencją takiej decyzji jest zwiększone prawdopodobieństwo zawyżenia wyników oceny jakości modelu. W opisywanych badaniach liczba przykładów jest znacznie większa od liczby parametrów każdego z identyfikowanych modeli co oznacza, że możliwości nadmiernego dopasowania modeli do danych są niewielkie.

Przyjęty sposób klasyfikowania diagnozy, tzn. określanie czy jest ona trafna lub błędna, można zilustrować posługując się danymi, które przedstawiono w tab. 6.1 (dotyczy wyników uzyskanych z modelu, w którym nie uwzględniano możliwości zmiany konkluzji). Kolumny 2 do 6 zawierają stopnie przekonań o stanie technicznym pompy P uzyskane z poszczególnych modeli aspektowych. W 7. kolumnie przedstawiono diagnozę sformułowaną w wyniku zastosowania reguły kombinacji Dempstera (odpowiedź wieloaspektowego modelu diagnostycznego, WMD). Ostatnia kolumna dotyczy wzorcowych wartości stopni przekonań.

Tab. 6.1: Stopnie przekonania o stanie technicznym pompy P

| | **MODEL ASF** | **MODEL AD** | **MODEL AHD** | **MODEL AOD** | **MODEL AH** | **WMD** | **W** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| „stan zdatny" | 0.5451 | 0.1837 | 0.6770 | 0.5 | 0.5 | 0.3610 | 0 |
| „stan niezdatny" | 0.4549 | 0.8163 | 0.3230 | 0.5 | 0.5 | 0.6390 | 1 |

Z tab. 6.1 wynika, że diagnoza reprezentowana jest w postaci wektora stopni przekonań o stanie technicznym danego elementu obiektu. W omawianym przykładzie rozpatrywanym elementem obiektu jest „pompa P", a wektor stopni przekonań jest w tym wypadku równy $\underline{b} = [0.3610 \quad 0.6390]^T$. Diagnoza dotycząca danego elementu obiektu jest uważana za trafną wtedy, gdy spełnione są 2 następujące kryteria:

- $\mathbf{K1}(\underline{b})$ — maksymalny stopień przekonania wektora $\underline{b}$ dotyczy tego stanu, który poprawnie wskazuje aktualny stan techniczny rozpatrywanego elementu obiektu;
- $\mathbf{K2}(\underline{b})$ — stopnie przekonania o pozostałych stanach technicznych danego elementu obiektu są co najmniej $k$-razy mniejsze od maksymalnego stopnia przekonania.

Wartość współczynnika $k$ w kryterium $\mathbf{K2}(\underline{b})$ decyduje w istotny sposób o przyporządkowaniu diagnozy do klasy trafna lub błędna. W opisywanych badaniach weryfikacyjnych przyjęto w sposób arbitralny, że $k = 1.5$. Wówczas w rozpatrywanym przykładzie spełnione jest zarówno kryterium $\mathbf{K1}(\underline{b})$ jak i $\mathbf{K2}(\underline{b})$. Gdyby sformułowaną diagnozę reprezentował wektor $\underline{b} = [0.6390 \quad 0.3610]^T$, to niespełnione byłoby kryterium $\mathbf{K1}(\underline{b})$. Jeżeli z opracowanego modelu otrzymany zostałby następujący wektor stopni przekonań $\underline{b} = [0.410 \quad 0.590]^T$, to spełnione jest kryterium $\mathbf{K1}(\underline{b})$ ale nie jest spełnione kryterium $\mathbf{K2}(\underline{b})$. W obydwu wypadkach diagnoza jest uważana za błędną, przy czym błędy podzielono na dwa rodzaje:

- **B1** — błąd polega na niewskazaniu istniejącej niesprawności (tab. 6.2; dotyczy wyników uzyskanych z modelu, w którym nie uwzględniano możliwości zmiany konkluzji);
- **B2** — błąd polega na wskazaniu nieistniejącej niesprawności (tab. 6.3; dotyczy wyników uzyskanych z modelu, w którym nie uwzględniano możliwości zmiany konkluzji).

Tab. 6.2: Stopnie przekonania o stanie technicznym kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3 (przyjęto założenie, że w danej chwili kanał może być albo przytkany, albo nieszczelny; patrz punkt 5.3.1)

| | MODEL ASF | MODEL AD | MODEL AHD | MODEL AOD | MODEL AH | WMD | W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| „prawidłowy" | 0.4618 | 0.5714 | 0.6178 | 0.2 | 0.2 | 0.9646 | 0 |
| „częściowo przytkany" | 0.1865 | 0.1225 | 0.1324 | 0.2 | 0.2 | 0.0179 | 0 |
| „całkowicie przytkany" | 0.1137 | 0.2041 | 0.0808 | 0.2 | 0.2 | 0.0111 | 1 |
| „niewielki wyciek" | 0.1243 | 0.0817 | 0.0882 | 0.2 | 0.2 | 0.0053 | 0 |
| „duży wyciek" | 0.1137 | 0.0203 | 0.0808 | 0.2 | 0.2 | 0.0011 | 0 |

Tab. 6.3: Stopnie przekonania o stanie technicznym pompy P wtedy, gdy kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 był całkowicie przytkany a pompa P działała poprawnie

| | MODEL ASF | MODEL AD | MODEL AHD | MODEL AOD | MODEL AH | WMD | W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| „stan zdatny" | 0.5451 | 0.1837 | 0.6770 | 0.5 | 0.5 | 0.3610 | 1 |
| „stan niezdatny" | 0.4549 | 0.8163 | 0.3230 | 0.5 | 0.5 | 0.6390 | 0 |

W tab. 6.4 przedstawiono procentową trafność określania stanu technicznego tych elementów obiektu, które są rozpatrywane w stanie funkcjonalnym $\phi_2$ (wyniki zostały zaokrąglone „w dół" i dotyczą modelu, w którym nie uwzględniano możliwości zmiany konkluzji). Kolumna **N** określa liczbę niesprawnych elementów obiektu.

Generalnie można stwierdzić, że w odniesieniu do stanu funkcjonalnego $\phi_2$ skonstruowany model dobrze rozpoznaje proste stany techniczne i niektóre stany złożone. Wraz ze wzrostem liczby niesprawnych elementów obiektu trafność diagnozy maleje (wyjątek stanowi pompa P), zwłaszcza w przypadku kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3. Zmniejszona trafność diagnozy dotycząca złożonych stanów technicznych obiektu wynika z faktu występowania identycznych symptomów jak dla

Tab. 6.4: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$ (nie uwzględniano możliwości zmiany konkluzji)

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik PS | Kanał T1T3 | Zbiornik T3 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 86 | 86 | 71 | 100 | 11 | 4 |
| 2 | 87 | 60 | 20 | 60 | 43 | 3 |
| 3 | 92 | 31 | 8 | 31 | 58 | 2 |

określonych stanów prostych. Obecnie nie jest znana ogólna metoda, która umożliwiałaby rozróżnianie takich stanów. Na ogół formułowana diagnoza powinna wskazywać stan techniczny, którego wystąpienie jest najbardziej prawdopodobne, a więc najczęściej na prosty stan techniczny.

Zadowalające wyniki dotyczące pompy P związane są przede wszystkim z tym, że jej ewentualna niesprawność w większości przypadków jest wykrywana (zależy to istotnie od wartości współczynnika $k$ przyjętego w kryterium $\mathbf{K2}(\underline{b})$). Wykrycie innych niesprawności, przy niesprawnej pompie P, jest praktycznie niemożliwe na podstawie dostępnych sygnałów diagnostycznych. Oznacza to istotny wzrost wartości błędu pierwszego rodzaju (błąd **B1**) i jednoczesne zmniejszenie błędu drugiego rodzaju (błąd **B2**; błędy zaokrąglano „w górę").

Błąd **B2** występuje m.in. w stanie technicznym $z_4$ (tab. A-1), tzn. wtedy, gdy kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany. Uzyskane w tym wypadku stopnie przekonania dla zmiennej „pompa P" (tab. 6.3) wskazują wystąpienie nieistniejącej niesprawności.

Ten i niektóre inne błędy drugiego rodzaju można wyeliminować poprzez uwzględnienie możliwości zmiany konkluzji (patrz punkt 4.6). Przykładowo: jeżeli na podstawie obserwacji działania obiektu w stanie funkcjonalnym $\phi_2$ sformułowana została diagnoza wskazująca prawdopodobną niesprawność pompy P, a w stanie funkcjonalnym $\phi_4$ stwierdzono z całkowitą pewnością, iż pompa P jest sprawna, to można przyjąć, że była ona również sprawna wcześniej. Wprowadzenie tej informacji do wszystkich modeli aspektowych w stanie funkcjonalnym $\phi_2$ eliminuje błąd **B2** oraz powoduje zmianę konkluzji o stanie technicznym pozostałych elementów obiektu. Wówczas trafność formułowanych diagnoz wzrasta (tab. 6.5).

Tab. 6.5: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$ (uwzględnienie możliwości zmiany konkluzji)

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik PS | Kanał T1T3 | Zbiornik T3 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 85 | 85 | 100 | 7 | 0 |
| 2 | 100 | 60 | 33 | 60 | 37 | 0 |
| 3 | 100 | 30 | 15 | 30 | 56 | 0 |

Tab. 6.6 do 6.12 przedstawiają procentową trafność formułowanych diagnoz o stanie technicznym elementów obiektu dla kolejnych stanów funkcjonalnych. Wyniki dotyczą modelu diagnostycznego, w którym uwzględniono możliwość zmiany konkluzji (rys. 5.13 do 5.15). Trafność diagnoz zaokrąglano „w dół", natomiast błędy „w górę".

Tab. 6.6: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 75 | 87 | 62 | 25 | 0 |
| 3 | 25 | 50 | 25 | 67 | 0 |

Tab. 6.7: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik FS | Kanał T1-P-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 83 | 6 | 0 |
| 2 | 100 | 88 | 22 | 30 | 0 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

Tab. 6.8: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego obiektu $\phi_5$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 100 | 83 | 6 | 6 |
| 2 | 88 | 77 | 11 | 37 | 4 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

Tab. 6.9: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Kanał T3T1 | Zbiornik T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 80 | 80 | 13 | 0 |
| 2 | 100 | 50 | 62 | 17 | 13 |
| 3 | 100 | 0 | 50 | 34 | 17 |

Tab. 6.10: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik LS- | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 83 | 66 | 66 | 28 | 0 |
| 3 | 62 | 25 | 25 | 63 | 0 |

Tab. 6.11: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Zawór V6 | Czujnik FS | Kanał T1-V6-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 87 | 62 | 87 | 62 | 25 | 0 |
| 2 | 66 | 38 | 66 | 28 | 50 | 0 |
| 3 | 36 | 36 | 36 | 9 | 74 | 0 |

Tab. 6.12: Trafność formułowanych diagnoz dla stanu funkcjonalnego $\phi_9$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 100 | 50 | 17 | 6 |
| 2 | 88 | 77 | 11 | 38 | 4 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

# Rozdział 7

# Porównanie wyników

Chcąc określić jakość opracowanego modelu wieloaspektowego dokonano porównania uzyskanych wyników z wynikami otrzymanymi z modelu diagnostycznego, który nie był wielomodelem. Rozpatrywano trzy modele globalne. Pierwszą i drugą wersję modelu globalnego reprezentowano w postaci sieci przekonań. Sieci te konstruowano według różnych metod, tzn. z zastosowaniem i bez zastosowania algorytmów umożliwiających wyznaczenie struktury sieci oraz tablic prawdopodobieństw warunkowych.

Reprezentacja modelu globalnego w postaci sieci przekonań ułatwia porównywanie wyników, ponieważ mają one taką samą postać jak wyniki otrzymane z opracowanego modelu wieloaspektowego. Niestety liczba parametrów takiej sieci znacznie przekracza liczbę przykładów zawartych w zbiorze danych uczących. Oznacza to, że w tym wypadku model globalny zostanie nadmiernie dopasowany do danych. Warto jednak zauważyć, że zgromadzony liczny zbiór przykładów powinien umożliwić rozpoznawanie wielu stanów technicznych obiektu, także tych, których wystąpienie jest mało prawdopodobne. Wobec powyższego wydaje się, że wspomniany błąd polegający na nadmiernym dopasowaniu modelu globalnego do danych nie powinien w tym wypadku znacząco ograniczać możliwości zastosowania takiego modelu.

Biorąc pod uwagę fakt, iż wpływ czynników zakłócających działanie badanego obiektu jest niewielki (nieistotny), zdecydowano, że model globalny w wersji trzeciej będzie reprezentowany w postaci tablicy stanów.

## 7.1. Globalny model diagnostyczny w wersji 1.

Pierwszą wersję globalnego modelu diagnostycznego reprezentuje sieć bayesowska o opracowanej przez autora dwuwarstwowej strukturze składającej się ze 122 węzłów. W górnej warstwie znajduje się 26 węzłów reprezentujących stan techniczny elementów obiektu natomiast dolna warstwa zawiera 96 węzłów, które dotyczą rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych. Tego typu struktura sieci jest z powodzeniem stosowana w systemach doradczych (ekspertowych) [49] dotyczących diagnostyki medycznej [71, 72] i technicznej [6].

Identyfikacji modelu diagnostycznego dokonano z zastosowaniem algorytmu junction tree. W tab. 7.1 do 7.8 przedstawiono procentową trafność formułowanych diagnoz o stanie technicznym elementów obiektu dla przykładów odnoszących się do kolejnych stanów funkcjonalnych. Podobnie jak poprzednio trafność diagnoz zaokrąglano „w dół", natomiast błędy „w górę" (błąd **B1** polega na niewskazaniu istniejącej niesprawności, natomiast błąd **B2** polega na wskazaniu nieistniejącej niesprawności).

Tab. 7.1: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_2$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik PS | Kanał T1T3 | Zbiornik T3 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 85 | 85 | 100 | 7 | 0 |
| 2 | 100 | 60 | 33 | 60 | 37 | 0 |
| 3 | 100 | 30 | 15 | 30 | 56 | 0 |

Tab. 7.2: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 80 | 100 | 7 | 0 |
| 2 | 75 | 87 | 75 | 21 | 0 |
| 3 | 25 | 50 | 50 | 59 | 0 |

Tab. 7.3: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik FS | Kanał T1-P-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 83 | 66 | 17 | 6 |
| 2 | 66 | 55 | 22 | 41 | 12 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

Tab. 7.4: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 100 | 83 | 6 | 6 |
| 2 | 88 | 77 | 33 | 30 | 4 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

Tab. 7.5: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Kanał T3T1 | Zbiornik T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 80 | 100 | 7 | 0 |
| 2 | 100 | 50 | 100 | 17 | 0 |
| 3 | 100 | 0 | 100 | 34 | 0 |

Tab. 7.6: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik LS- | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 83 | 66 | 66 | 28 | 0 |
| 3 | 62 | 25 | 25 | 63 | 0 |

Tab. 7.7: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Zawór V6 | Czujnik FS | Kanał T1-V6-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 50 | 87 | 87 | 62 | 29 | 0 |
| 2 | 23 | 61 | 66 | 33 | 54 | 0 |
| 3 | 18 | 36 | 54 | 9 | 71 | 0 |

Tab. 7.8: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_9$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 100 | 33 | 22 | 6 |
| 2 | 88 | 77 | 11 | 38 | 4 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

## 7.2. Globalny model diagnostyczny w wersji 2.

Drugą wersję globalnego modelu diagnostycznego reprezentuje sieć bayesowska składająca się ze 122 węzłów o strukturze wyznaczonej za pomocą algorytmu K2. Identyfikacji modelu diagnostycznego dokonano z zastosowaniem algorytmu junction tree. W tab. 7.9 do 7.16 przedstawiono procentową trafność formułowanych diagnoz o stanie technicznym elementów obiektu dla przykładów odnoszących się do kolejnych stanów funkcjonalnych.

Tab. 7.9: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_2$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik PS | Kanał T1T3 | Zbiornik T3 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 85 | 85 | 100 | 7 | 0 |
| 2 | 100 | 60 | 33 | 60 | 37 | 0 |
| 3 | 100 | 30 | 15 | 30 | 56 | 0 |

Tab. 7.10: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 80 | 100 | 60 | 14 | 7 |
| 2 | 62 | 75 | 37 | 38 | 5 |
| 3 | 25 | 50 | 25 | 67 | 0 |

Tab. 7.11: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik FS | Kanał T1-P-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 50 | 17 | 0 |
| 2 | 100 | 100 | 11 | 30 | 0 |
| 3 | 100 | 100 | 0 | 34 | 0 |

Tab. 7.12: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 66 | 83 | 50 | 28 | 6 |
| 2 | 22 | 44 | 11 | 75 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 |

Tab. 7.13: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Kanał T3T1 | Zbiornik T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 60 | 100 | 14 | 0 |
| 2 | 100 | 0 | 100 | 34 | 0 |
| 3 | 100 | 50 | 100 | 17 | 0 |

Tab. 7.14: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik LS- | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 83 | 83 | 12 | 0 |
| 2 | 83 | 66 | 58 | 31 | 0 |
| 3 | 62 | 25 | 12 | 67 | 0 |

Tab. 7.15: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Zawór V6 | Czujnik FS | Kanał T1-V6-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 87 | 87 | 50 | 19 | 0 |
| 2 | 100 | 76 | 66 | 23 | 34 | 0 |
| 3 | 100 | 54 | 54 | 9 | 46 | 0 |

Tab. 7.16: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_9$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 66 | 83 | 33 | 28 | 12 |
| 2 | 55 | 44 | 11 | 49 | 15 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

## 7.3. Globalny model diagnostyczny w wersji 3.

Zdecydowano, że globalny model diagnostyczny w wersji 3. będzie reprezentowany w postaci tablicy stanów. W wyniku przeprowadzenia czynnych eksperymentów diagnostycznych pozyskano dane, które umożliwiły określenie sygnatur dla wszystkich rozpatrywanych stanów technicznych badanego obiektu. W tab. 7.17 przedstawiono zbiory nierozróżnialnych stanów technicznych (identyczne sygnatury) dla wybranych stanów funkcjonalnych obiektu.

Tab. 7.17: Zbiory nierozróżnialnych stanów technicznych dla wybranych stanów funkcjonalnych

| STAN FUNKCJONALNY OBIEKTU | ZBIORY NIEROZRÓŻNIALNYCH STANÓW TECHNICZNYCH OBIEKTU |
|---|---|
| $\phi_3$ | $\{z_{37}, z_{46}, z_{52}\}$<br>$\{z_{38}, z_{39}, z_{40}, z_{47}, z_{48}, z_{49}\}$<br>$\{z_{44}, z_{50}\}$<br>$\{z_{45}, z_{51}\}$ |
| $\phi_4$ | $\{z_{62}, z_{63}, z_{64}, z_{65}, z_{66}\}$<br>$\{z_{67}, z_{68}, z_{69}, z_{70}, z_{71}\}$ |
| $\phi_5$ | $\{z_{81}, z_{82}, z_{83}, z_{84}, z_{85}, z_{86}, z_{87}, z_{88}, z_{89}, z_{90}\}$ |
| $\phi_7$ | $\{z_{109}, z_{115}, z_{118}, z_{124}\}$<br>$\{z_{110}, z_{111}, z_{112}, z_{119}, z_{120}, z_{121}\}$ |
| $\phi_7$ | $\{z_{116}, z_{122}\}$<br>$\{z_{117}, z_{123}\}$<br>$\{z_{125}, z_{126}, z_{127}, z_{128}, z_{129}, z_{130}, z_{131}, z_{132}, z_{133}\}$ |
| $\phi_8$ | $\{z_{135}, z_{138}, z_{139}, z_{140}, z_{141}, z_{142}\}$<br>$\{z_{143}, z_{144}, z_{145}, z_{146}, z_{147}, z_{148}, z_{149}, z_{150}, z_{151}, z_{152}\}$<br>$\{z_{155}, z_{158}, z_{159}, z_{160}, z_{161}, z_{162}\}$<br>$\{z_{163}, z_{164}, z_{165}, \ldots, z_{184}\}$ |

Jak wspomniano wcześniej wpływ czynników zakłócających działanie badanego obiektu jest niewielki (nieistotny) a wprowadzenie do danych odpowiedniego szumu stwarza trudności. W związku z tym stwierdzono, że w tym wypadku weryfikację opracowanego modelu diagnostycznego można przeprowadzić z zastosowaniem metody resubstytucji.

W tab. 7.18 do 7.24 przedstawiono procentową trafność formułowanych diagnoz o stanie technicznym elementów obiektu dla przykładów odnoszących się do wybranych stanów funkcjonalnych. Rozpoznawanie stanu technicznego badanego obiektu realizowano stosując wnioskowanie równoległe. Stan techniczny obiektu identyfikowany jest przez zbiór niesprawnych elementów obiektu. W sytuacji, gdy sformułowana diagnoza wskazywała zbiór nierozróżnialnych stanów technicznych obiektu, diagnozę dotyczącą danego elementu obiektu uważano za trafną, jeżeli była ona identyczna we wszystkich wskazanych, nierozróżnialnych stanach technicznych. W przeciwnym wypadku jako ostateczną diagnozę wybierano tę, która dotyczyła stanu technicznego określonego przez najmniejszą liczbę niesprawnych elementów (najbardziej prawdopodobny stan). Podobnie jak poprzednio trafność diagnoz zaokrąglano „w dół", natomiast błędy „w górę".

Tab. 7.18: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik US | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 75 | 87 | 75 | 21 | 0 |
| 3 | 25 | 50 | 50 | 59 | 0 |

Tab. 7.19: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik FS | Kanał T1-P-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 100 | 100 | 44 | 15 | 0 |
| 3 | 100 | 100 | 0 | 34 | 0 |

Tab. 7.20: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 100 | 88 | 55 | 19 | 0 |
| 3 | 100 | 0 | 0 | 67 | 0 |

Tab. 7.21: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik PS | Kanał T3T1 | Zbiornik T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 3 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |

Tab. 7.22: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Czujnik LS- | Zawór V2 | Kanał T2T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 90 | 60 | 60 | 30 | 0 |
| 3 | 62 | 25 | 25 | 63 | 0 |

Tab. 7.23: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Zawór V6 | Czujnik FS | Kanał T1-V6-T1 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 87 | 87 | 4 | 4 |
| 2 | 100 | 90 | 67 | 42 | 24 | 2 |
| 3 | 100 | 54 | 36 | 13 | 49 | 0 |

Tab. 7.24: Trafność formułowanych diagnoz dla przykładów dotyczących stanu funkcjonalnego $\phi_9$

| N | TRAFNOŚĆ DIAGNOZY, % | | | B1, % | B2, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Pompa P | Czujnik US | Kanał T1T2 | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1 | 83 | 100 | 50 | 17 | 6 |
| 2 | 44 | 77 | 22 | 52 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 25 | 92 | 0 |

## 7.4. Omówienie uzyskanych wyników

Dokonując analizy porównawczej wyników uzyskanych z wieloaspektowego modelu diagnostycznego z wynikami, które otrzymano po zastosowaniu modeli globalnych, można stwierdzić, że trafność formułowanych diagnoz w odniesieniu do modelu wieloaspektowego i modelu globalnego w wersji 1. jest porównywalna. Nieco gorsze rezultaty osiągnięto dla modelu globalnego w wersji 2. Zdecydowanie najlepsze wyniki otrzymano po zastosowaniu modelu diagnostycznego, który był reprezentowany w postaci tablicy stanów.

Warto zauważyć, że wśród modeli reprezentowanych w postaci sieci przekonań, sumaryczny odsetek przykładów, dla których nie wskazano istniejącej niesprawności (błąd **B1**), jest najmniejszy w odniesieniu do modelu wieloaspektowego. Ponadto stopnie przekonań uzyskiwane z obydwu globalnych sieci przekonań często nie pozwalały określić bieżącego stanu technicznego elementów obiektu, a więc w takich wypadkach modele te nie spełniają swojego zadania.

Niestety, jeżeli chodzi o błąd polegający na wskazywaniu nieistniejącej niesprawności (błąd **B2**), skonstruowany model wieloaspektowy wypada gorzej w porównaniu z modelami globalnymi. Spowodowane jest to przede wszystkim przez modele aspektowe, które dotyczą stanu funkcjonalnego $\phi_6$. Gdyby nie brać pod uwagę przykładów odnoszących się do tego stanu, to sumaryczny błąd **B2** dla modelu wieloaspektowego byłby ponownie mniejszy od błędów dotyczących globalnych sieci przekonań. W związku z tym konieczne jest poprawienie odpowiednich modeli aspektowych. Zadanie

to nie powinno stwarzać większych trudności, ponieważ modele te są konstruowane niezależnie od pozostałych.

W przeciwieństwie do wielomodelu konstruowanie i poprawianie modelu globalnego jest znacznie bardziej kłopotliwe, zwłaszcza jeżeli dotyczy on złożonego obiektu technicznego. W opisywanym przykładzie opracowano dwie sieci bayesowskie składające się ze 122 węzłów. Przygotowanie i przetworzenie odpowiedniego zbioru danych jest w tym wypadku bardzo czasochłonne. Należy również podkreślić, że wyszukiwanie za pomocą algorytmu K2 optymalnej struktury dla globalnej sieci przekonań jest trudne ze względu na konieczność określenia porządku węzłów. Można przypuszczać, że wyniki uzyskane z modelu globalnego w wersji 2. są gorsze od wyników uzyskanych z 1. wersji modelu właśnie z powodu nieoptymalnej struktury sieci.

Z przeprowadzonych badań wynika, że problem rozpoznawania stanu technicznego badanego obiektu można skutecznie rozwiązać stosując tablicę stanów. Wynika to przede wszystkim z niewielkiej niepewności wyznaczania wartości cech sygnałów diagnostycznych. Zalety modeli reprezentowanych w postaci sieci przekonań powinny się ujawnić w sytuacji, gdy wpływ czynników zakłócających działanie obiektu będzie istotny. Ponadto warto zauważyć, że stosując sieci przekonań dysponuje się zawsze jakąś diagnozą, natomiast korzystanie z tablicy stanów staje się kłopotliwe wtedy, gdy sygnatura dla aktualnego stanu technicznego obiektu nie występuje w tej tablicy. Uwzględnienie takiego przypadku realizuje się poprzez wprowadzenie wskaźnika niezgodności [46].

# Rozdział 8

# Podsumowanie

Celem niniejszej rozprawy było opracowanie metody umożliwiającej wnioskowanie o stanie technicznym obiektu na podstawie modelu wieloaspektowego, występującego w postaci zbioru sprzężonych modeli diagnostycznych uwzględniających różne aspekty działania badanego obiektu.

Jak do tej pory idea modelu wieloaspektowego nie została przeniesiona na grunt diagnostyki technicznej. Wydaje się, że proponowane podejście polegające na zastosowaniu języka UML do reprezentacji wiedzy o obiektach technicznych działających wg ustalonych procedur w zmiennych warunkach, pozwala zmodyfikować dotychczasowy proces jej pozyskiwania poprzez wydzielenie zagadnień, które mogą być rozpatrywane niezależnie od pozostałych, przy czym zapewniona jest spójność tak pozyskanej wiedzy.

Istotną zaletą opracowanej metody jest usystematyzowanie działań dotyczących konstruowania wieloaspektowego modelu diagnostycznego, a więc zmniejszenie prawdopodobieństwa przeoczenia lub pominięcia istotnej wiedzy o obiekcie. Podobne modele można konstruować intuicyjnie, rezygnując ze złożonego procesu tworzenia diagramów UML, jednakże w takim wypadku nie mamy pewności, że są one wystarczająco kompletne.

Wydaje się, że przedstawiona metoda ukazuje możliwości określania nowych procedur związanych z projektowaniem systemów nadzoru maszyn lub poprawę (uproszczenie) procedur już istniejących, zwłaszcza w odniesieniu do złożonych obiektów technicznych. Innymi słowy może stanowić podstawę do sformułowania nowych metod tworzenia modeli diagnostycznych lub uzupełnienie dla metod odnoszących się do analizy procesów resztkowych.

## 8.1. Wnioski

Poniżej przedstawiono najistotniejsze wnioski, które sformułowano na podstawie wyników z przeprowadzonych badań. Potwierdzają one słuszność stawianych tez.

1. Możliwe jest dokładne i jednoznaczne opisanie obiektów technicznych działających wg ustalonych procedur w zmiennych warunkach za pomocą języka UML.
2. Możliwe jest opracowanie modelu diagnostycznego na podstawie wiedzy o obiekcie technicznym, reprezentowanej za pomocą diagramów UML.
3. Możliwe jest wskazywanie relewantnych sygnałów diagnostycznych na podstawie wiedzy o obiekcie technicznym, reprezentowanej za pomocą diagramów UML.
4. Wieloaspektowy model diagnostyczny pozwala rozpoznawać złożone stany techniczne obiektu.
5. Diagnoza wskazywana przez wieloaspektowy model diagnostyczny jest zazwyczaj jednoznaczna.

## 8.2. Kierunki dalszych badań

Podstawowe zadania związane z tworzeniem wieloaspektowych modeli diagnostycznych można rozwiązać za pomocą metod i środków opracowanych oraz przedstawionych w niniejszej rozprawie. Jednak do rozwiązania pozostaje jeszcze wiele zagadnień, np.:

- zbadanie możliwości rozszerzenia języka UML o nowe elementy uwzględniające potrzeby badań diagnostycznych;
- określenie sposobu dyskretyzacji warunków działania obiektu technicznego, dla którego naturalne rozgraniczenie stanów funkcjonalnych jest trudne;
- opracowanie algorytmu automatyzacji procesu tworzenia modeli aspektowych na podstawie dokumentacji zapisanej w języku UML;
- określenie stopnia istotności rozpatrywanych aspektów.

# Dodatek A
# Zidentyfikowane zbiory stanów technicznych obiektu

Stan techniczny obiektu $z_i$ $(i = 0, 1, 2, \ldots 184)$ jest stanem prostym, jeżeli w wierszu odpowiedniej tabeli, który dotyczy tego stanu, występuje jeden i tylko jeden z następujących symboli: X, X', X" (dwa ostatnie symbole oznaczają warianty określonych prostych stanów technicznych — patrz dodatek B). Kolumna, w której umieszczony jest dany symbol identyfikuje rozpatrywany stan techniczny (patrz tab. 5.1). Stan techniczny $z_i$ jest stanem złożonym z prostych stanów technicznych, jeżeli w odpowiednim wierszu tabeli znajdują się co najmniej dwa symbole.

Tab. A-1: Zbiór $Z_2^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_1$ | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_2$ | | | X' | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_3$ | | | X' | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_4$ | | | X" | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_5$ | | | X" | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_6$ | | | | X' | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_7$ | | | | X' | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_8$ | | | | X" | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_9$ | | | | X" | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{10}$ | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{11}$ | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{12}$ | | | X' | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{13}$ | | | X' | | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{14}$ | | | X" | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{15}$ | | | X" | | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{16}$ | | | | X' | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{17}$ | | | | X' | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{18}$ | | | | X" | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{19}$ | | | | X" | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{20}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{21}$ | | X | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{22}$ | | X | X' | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{23}$ | | X | X' | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{24}$ | | X | X" | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. A-1: (ciąg dalszy)

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_{25}$ | | X | X" | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{26}$ | | X | | X' | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{27}$ | | X | | X' | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{28}$ | | X | | X" | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{29}$ | | X | | X" | X | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{30}$ | | X | | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{31}$ | | X | | | X | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{32}$ | | X | X' | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{33}$ | | X | X" | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{34}$ | | X | | X' | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{35}$ | | X | | X" | | X | | | | | | | | | | | | | |

Tab. A-2: Zbiór $Z_3^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{36}$ | | | | | | | X' | | | | | | | | | | | | |
| $z_{37}$ | | | | | | | X" | | | | | | | | | | | | |
| $z_{38}$ | | | | | | | | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{39}$ | | | | | | | X' | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{40}$ | | | | | | | X" | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{41}$ | | | | | | | | X" | | | | | | | | | | | |
| $z_{42}$ | | | | | | | X' | X" | | | | | | | | | | | |
| $z_{43}$ | | | | | | | X" | X" | | | | | | | | | | | |
| $z_{44}$ | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| $z_{45}$ | | | | | | | X' | | X | | | | | | | | | | |
| $z_{46}$ | | | | | | | X" | | X | | | | | | | | | | |
| $z_{47}$ | | | | | | | | X' | X | | | | | | | | | | |
| $z_{48}$ | | | | | | | X' | X' | X | | | | | | | | | | |
| $z_{49}$ | | | | | | | X" | X' | X | | | | | | | | | | |
| $z_{50}$ | | | | | | | | X" | X | | | | | | | | | | |
| $z_{51}$ | | | | | | | X' | X" | X | | | | | | | | | | |
| $z_{52}$ | | | | | | | X" | X" | X | | | | | | | | | | |

Tab. A-3: Zbiór $Z_4^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{53}$ | | | | | | | | | | X' | | | | | | | | | |
| $z_{54}$ | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | | |
| $z_{55}$ | | | | | | | | | | | X' | | | | | | | | |
| $z_{56}$ | | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | |
| $z_{57}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| $z_{58}$ | | | | | | | | | | X' | | | | | | | | | X |
| $z_{59}$ | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | | X |
| $z_{60}$ | | | | | | | | | | | X' | | | | | | | | X |
| $z_{61}$ | | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | X |
| $z_{62}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{63}$ | | X | | | | | | | | X' | | | | | | | | | |
| $z_{64}$ | | X | | | | | | | | X'' | | | | | | | | | |
| $z_{65}$ | | X | | | | | | | | | X' | | | | | | | | |
| $z_{66}$ | | X | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | |
| $z_{67}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| $z_{68}$ | | X | | | | | | | | X' | | | | | | | | | X |
| $z_{69}$ | | X | | | | | | | | X'' | | | | | | | | | X |
| $z_{70}$ | | X | | | | | | | | | X' | | | | | | | | X |
| $z_{71}$ | | X | | | | | | | | | X'' | | | | | | | | X |

Tab. A-4: Zbiór $Z_5^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{72}$ | | | | | | | | | | | | X' | | | | | | | |
| $z_{73}$ | | | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | |
| $z_{74}$ | | | | | | | | | | | | | X' | | | | | | |
| $z_{75}$ | | | | | | | | | | | | | X'' | | | | | | |
| $z_{76}$ | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| $z_{77}$ | | | | | | | | | X | | | X' | | | | | | | |
| $z_{78}$ | | | | | | | | | X | | | X'' | | | | | | | |
| $z_{79}$ | | | | | | | | | X | | | | X' | | | | | | |
| $z_{80}$ | | | | | | | | | X | | | | X'' | | | | | | |
| $z_{81}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{82}$ | | X | | | | | | | | | | X' | | | | | | | |
| $z_{83}$ | | X | | | | | | | | | | X'' | | | | | | | |
| $z_{84}$ | | X | | | | | | | | | | | X' | | | | | | |
| $z_{85}$ | | X | | | | | | | | | | | X'' | | | | | | |
| $z_{86}$ | | X | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| $z_{87}$ | | X | | | | | | | X | | | X' | | | | | | | |
| $z_{88}$ | | X | | | | | | | X | | | X'' | | | | | | | |

Tab. A-4: (ciąg dalszy)

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_{89}$ | | X | | | | | | | X | | | | X' | | | | | | |
| $z_{90}$ | | X | | | | | | | X | | | | X'' | | | | | | |

Tab. A-5: Zbiór $Z_6^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{91}$ | | | | | | | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{92}$ | | | | | | | | | | | | | | X'' | | | | | |
| $z_{93}$ | | | X' | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{94}$ | | | X' | | | | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{95}$ | | | X' | | | | | | | | | | | X'' | | | | | |
| $z_{96}$ | | | X'' | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{97}$ | | | X'' | | | | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{98}$ | | | X'' | | | | | | | | | | | X'' | | | | | |
| $z_{99}$ | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{100}$ | | | | | | X | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{101}$ | | | | | | X | | | | | | | | X'' | | | | | |
| $z_{102}$ | | | X' | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{103}$ | | | X' | | | X | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{104}$ | | | X' | | | X | | | | | | | | X'' | | | | | |
| $z_{105}$ | | | X'' | | | X | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{106}$ | | | X'' | | | X | | | | | | | | X' | | | | | |
| $z_{107}$ | | | X'' | | | X | | | | | | | | X'' | | | | | |

Tab. A-6: Zbiór $Z_7^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{108}$ | | | | | | | X' | | | | | | | | | | | | |
| $z_{109}$ | | | | | | | X'' | | | | | | | | | | | | |
| $z_{110}$ | | | | | | | | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{111}$ | | | | | | | X' | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{112}$ | | | | | | | X'' | X' | | | | | | | | | | | |
| $z_{113}$ | | | | | | | | X'' | | | | | | | | | | | |
| $z_{114}$ | | | | | | | X' | X'' | | | | | | | | | | | |
| $z_{115}$ | | | | | | | X'' | X'' | | | | | | | | | | | |
| $z_{116}$ | | | | | | | | | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{117}$ | | | | | | | X' | | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{118}$ | | | | | | | X'' | | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{119}$ | | | | | | | | X' | | | | | | | X' | | | | |

Tab. A-6: (ciąg dalszy)

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_{120}$ | | | | | | | X' | X' | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{121}$ | | | | | | | X'' | X' | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{122}$ | | | | | | | | X'' | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{123}$ | | | | | | | X' | X'' | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{124}$ | | | | | | | X'' | X'' | | | | | | | X' | | | | |
| $z_{125}$ | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{126}$ | | | | | | | X' | | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{127}$ | | | | | | | X'' | | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{128}$ | | | | | | | | X' | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{129}$ | | | | | | | X' | X' | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{130}$ | | | | | | | X'' | X' | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{131}$ | | | | | | | | X'' | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{132}$ | | | | | | | X' | X'' | | | | | | | X'' | | | | |
| $z_{133}$ | | | | | | | X'' | X'' | | | | | | | X'' | | | | |

Tab. A-7: Zbiór $Z_8^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_0$ | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{134}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | |
| $z_{135}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | |
| $z_{136}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | X' | |
| $z_{137}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | |
| $z_{138}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| $z_{139}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X |
| $z_{140}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | X |
| $z_{141}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X |
| $z_{142}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | X |
| $z_{143}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | | |
| $z_{144}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X' | | |
| $z_{145}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X'' | | |
| $z_{146}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X' | |
| $z_{147}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X'' | |
| $z_{148}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | | X |
| $z_{149}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X' | | X |
| $z_{150}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X'' | | X |
| $z_{151}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X' | X |
| $z_{152}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X'' | X |
| $z_{153}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | | |
| $z_{154}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | X' | | |
| $z_{155}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | X'' | | |
| $z_{156}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | X' | |
| $z_{157}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X'' | | X'' | |

Tab. A-7: (ciąg dalszy)

| OZN. | ID PROSTEGO STANU TECHNICZNEGO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $z_{158}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X" | | | X |
| $z_{159}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X" | X' | | X |
| $z_{160}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X" | X" | | X |
| $z_{161}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X" | | X' | X |
| $z_{162}$ | | | | | | | | | | | | | | | | X" | | X" | X |
| $z_{163}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $z_{164}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | X' | | |
| $z_{165}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | X" | | |
| $z_{166}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | X' | |
| $z_{167}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | X" | |
| $z_{168}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| $z_{169}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | X' | | X |
| $z_{170}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | X" | | X |
| $z_{171}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | X' | X |
| $z_{172}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | | | X" | X |
| $z_{173}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | | | |
| $z_{174}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | X' | | |
| $z_{175}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | X" | | |
| $z_{176}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | | X' | |
| $z_{177}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | | X" | |
| $z_{178}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X' | | | X |
| $z_{179}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | | | |
| $z_{180}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | X' | | |
| $z_{181}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | X" | | |
| $z_{182}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | | X' | |
| $z_{183}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | | X" | |
| $z_{184}$ | | X | | | | | | | | | | | | | | X" | | | X |

# Dodatek B
# Opisy rozpatrywanych stanów technicznych obiektu

Tab. B-1: Zbiór $Z_2^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_1$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_2$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_3$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_4$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_5$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_6$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_7$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_8$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_9$ | Pompa P pompuje, czujnik PS działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{10}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{11}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{12}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{13}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{14}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{15}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |

Tab. B-1: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{16}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{17}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{18}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{19}$ | Pompa P pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{20}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{21}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{22}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{23}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{24}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{25}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{26}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{27}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{28}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{29}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{30}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{31}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest prawidłowy, zbiornik T3 jest nieszczelny |
| $z_{32}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest częściowo przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{33}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T3 jest całkowicie przytkany, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{34}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |
| $z_{35}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik PS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T3, zbiornik T3 jest szczelny |

Tab. B-2: Zbiór $Z_3^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{36}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{37}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{38}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{39}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{40}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{41}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{42}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{43}$ | Czujnik US działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{44}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{45}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{46}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{47}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{48}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{49}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{50}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{51}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{52}$ | Czujnik US nie działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |

Tab. B-3: Zbiór $Z_4^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{53}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{54}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |

Tab. B-3: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{55}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{56}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{57}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{58}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{59}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{60}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{61}$ | Pompa P pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{62}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{63}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{64}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{65}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{66}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{67}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{68}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{69}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{70}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |
| $z_{71}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - pompa P - zbiornik T1 |

Tab. B-4: Zbiór $Z_5^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{72}$ | Pompa P pompuje, czujnik US działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest częściowo przytkany |
| $z_{73}$ | Pompa P pompuje, czujnik US działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest całkowicie przytkany |
| $z_{74}$ | Pompa P pompuje, czujnik US działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |

Tab. B-4: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{75}$ | Pompa P pompuje, czujnik US działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{76}$ | Pompa P pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest prawidłowy |
| $z_{77}$ | Pompa P pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest częściowo przytkany |
| $z_{78}$ | Pompa P pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest całkowicie przytkany |
| $z_{79}$ | Pompa P pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{80}$ | Pompa P pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{81}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest prawidłowy |
| $z_{82}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest częściowo przytkany |
| $z_{83}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest całkowicie przytkany |
| $z_{84}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{85}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{86}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest prawidłowy |
| $z_{87}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest częściowo przytkany |
| $z_{88}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T1 i T2 jest całkowicie przytkany |
| $z_{89}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |
| $z_{90}$ | Pompa P nie pompuje, czujnik US nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału pomiędzy zbiornikami T1 i T2 |

Tab. B-5: Zbiór $Z_6^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{91}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest prawidłowy, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{92}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest prawidłowy, duży wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{93}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, zbiornik T2 jest szczelny |
| $z_{94}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |

Tab. B-5: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{95}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, duży wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{96}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, zbiornik T2 jest szczelny |
| $z_{97}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{98}$ | Czujnik PS działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, duży wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{99}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest prawidłowy, zbiornik T2 jest szczelny |
| $z_{100}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest prawidłowy, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{101}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest prawidłowy, duży wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{102}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, zbiornik T2 jest szczelny |
| $z_{103}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{104}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest częściowo przytkany, duży wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{105}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, zbiornik T2 jest szczelny |
| $z_{106}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, niewielki wyciek ze zbiornika T2 |
| $z_{107}$ | Czujnik PS nie działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T3 i T1 jest całkowicie przytkany, duży wyciek ze zbiornika T2 |

Tab. B-6: Zbiór $Z_7^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{108}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{109}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{110}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{111}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{112}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{113}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{114}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |

Tab. B-6: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{115}$ | Czujnik LS- działa poprawnie, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{116}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{117}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{118}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{119}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{120}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{121}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{122}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{123}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{124}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{125}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{126}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{127}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 działa poprawnie, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{128}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{129}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{130}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 zamknięty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{131}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest prawidłowy |
| $z_{132}$ | Czujnik LS- jest aktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{133}$ | Czujnik LS- jest nieaktywny przez cały czas, zawór V2 otwarty i zablokowany, kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 jest całkowicie przytkany |

Tab. B-7: Zbiór $Z_8^*$ rozpatrywanych stanów technicznych obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_0$ | Stan bazowy (obiekt sprawny) |
| $z_{134}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |

Tab. B-7: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{135}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{136}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{137}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{138}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{139}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{140}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{141}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{142}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{143}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{144}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{145}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{146}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{147}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{148}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{149}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{150}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{151}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{152}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{153}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{154}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{155}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{156}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{157}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |

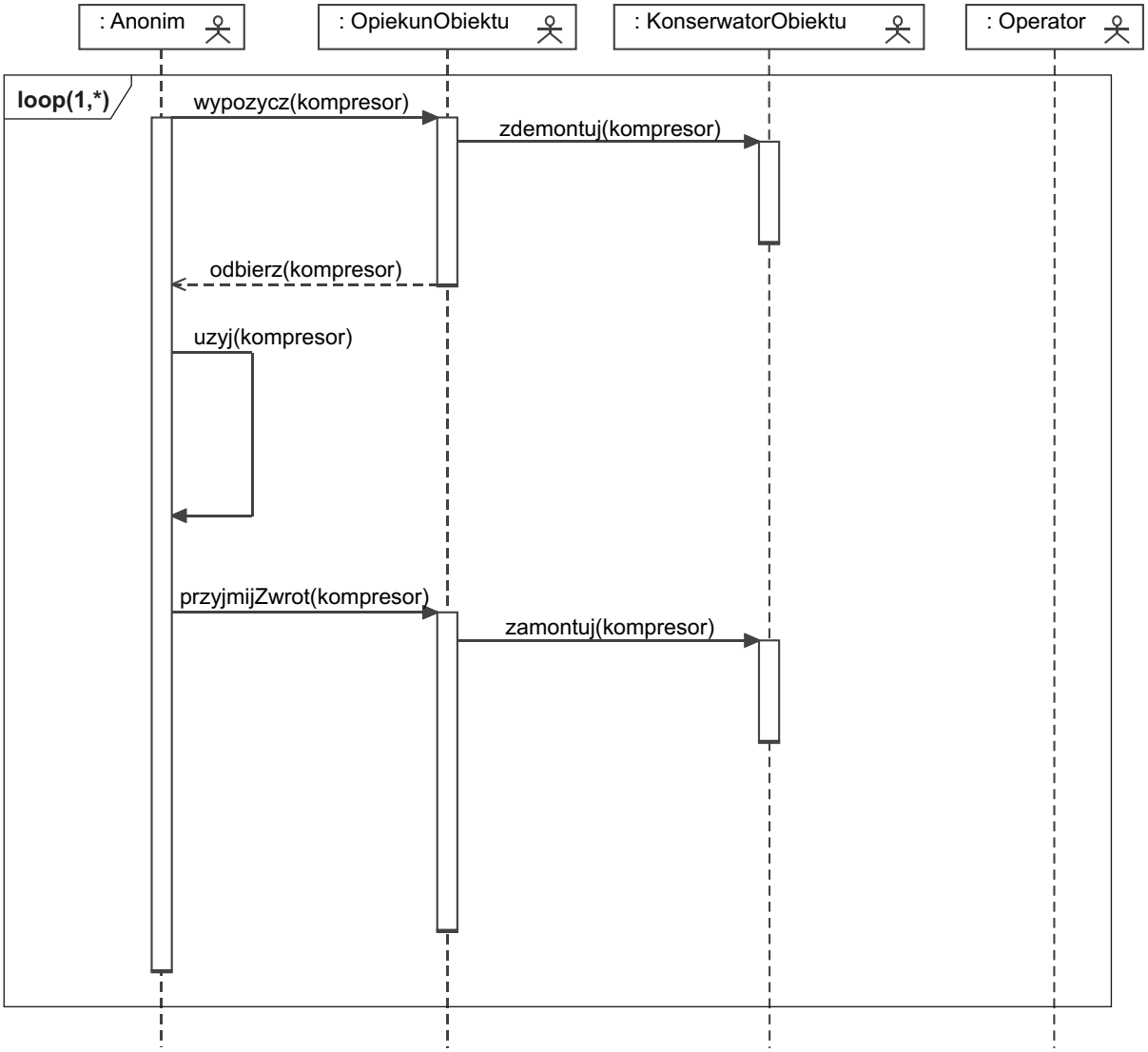
Tab. B-7: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{158}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{159}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{160}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{161}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{162}$ | Pompa P pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{163}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{164}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{165}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{166}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{167}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{168}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{169}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{170}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{171}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{172}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 działa poprawnie, czujnik FS nie działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{173}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{174}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |
| $z_{175}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{176}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{177}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{178}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 zamknięty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{179}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |
| $z_{180}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest częściowo przytkany |

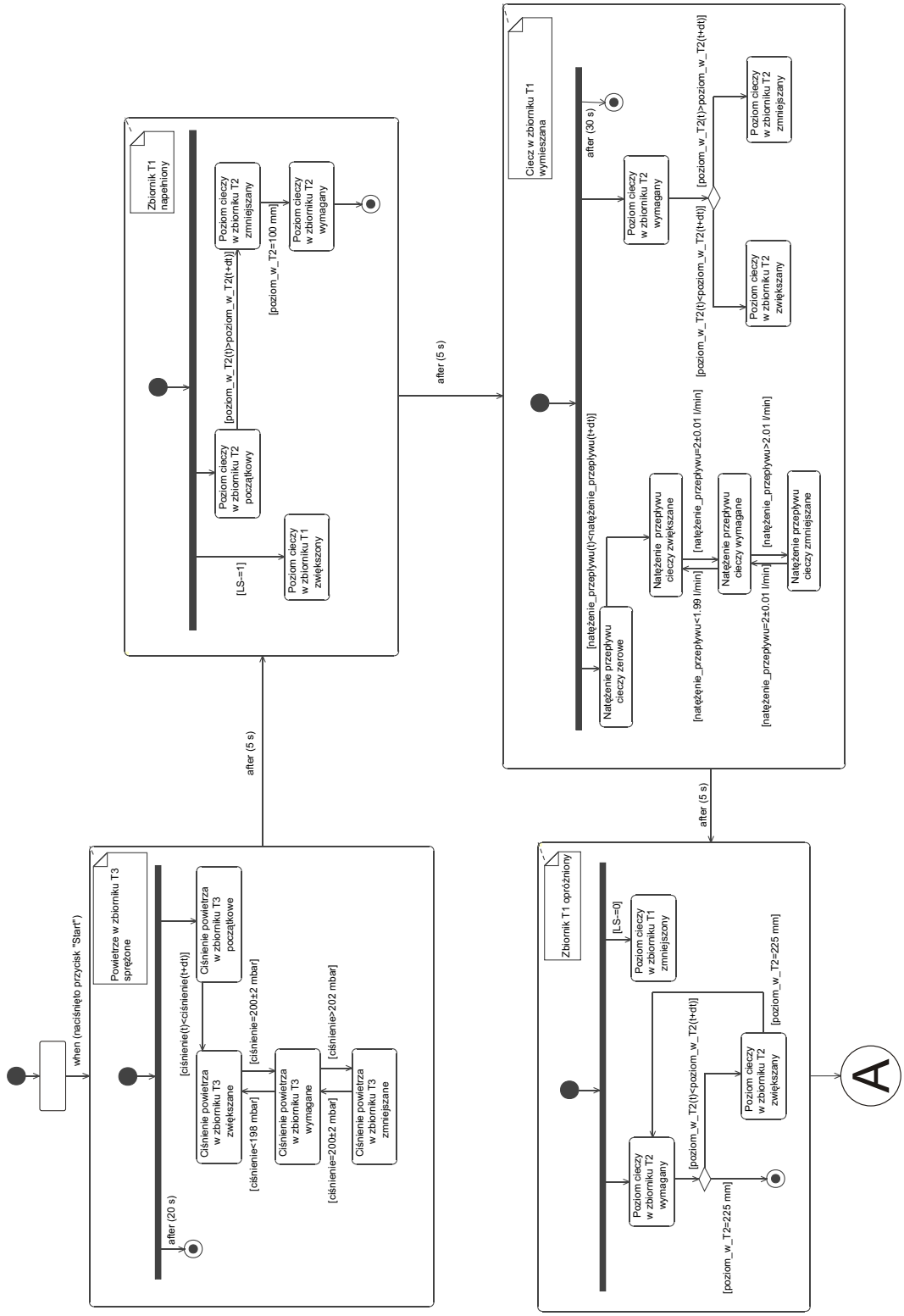
Tab. B-7: (ciąg dalszy)

| OZN. | OPIS STANU TECHNICZNEGO |
|---|---|
| $z_{181}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest całkowicie przytkany |
| $z_{182}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, niewielki wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{183}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS działa poprawnie, duży wyciek z kanału zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 |
| $z_{184}$ | Pompa P nie pompuje, zawór V6 otwarty i zablokowany, czujnik FS nie działa poprawnie, kanał zbiornik T1 - zawór V6 - zbiornik T1 jest prawidłowy |

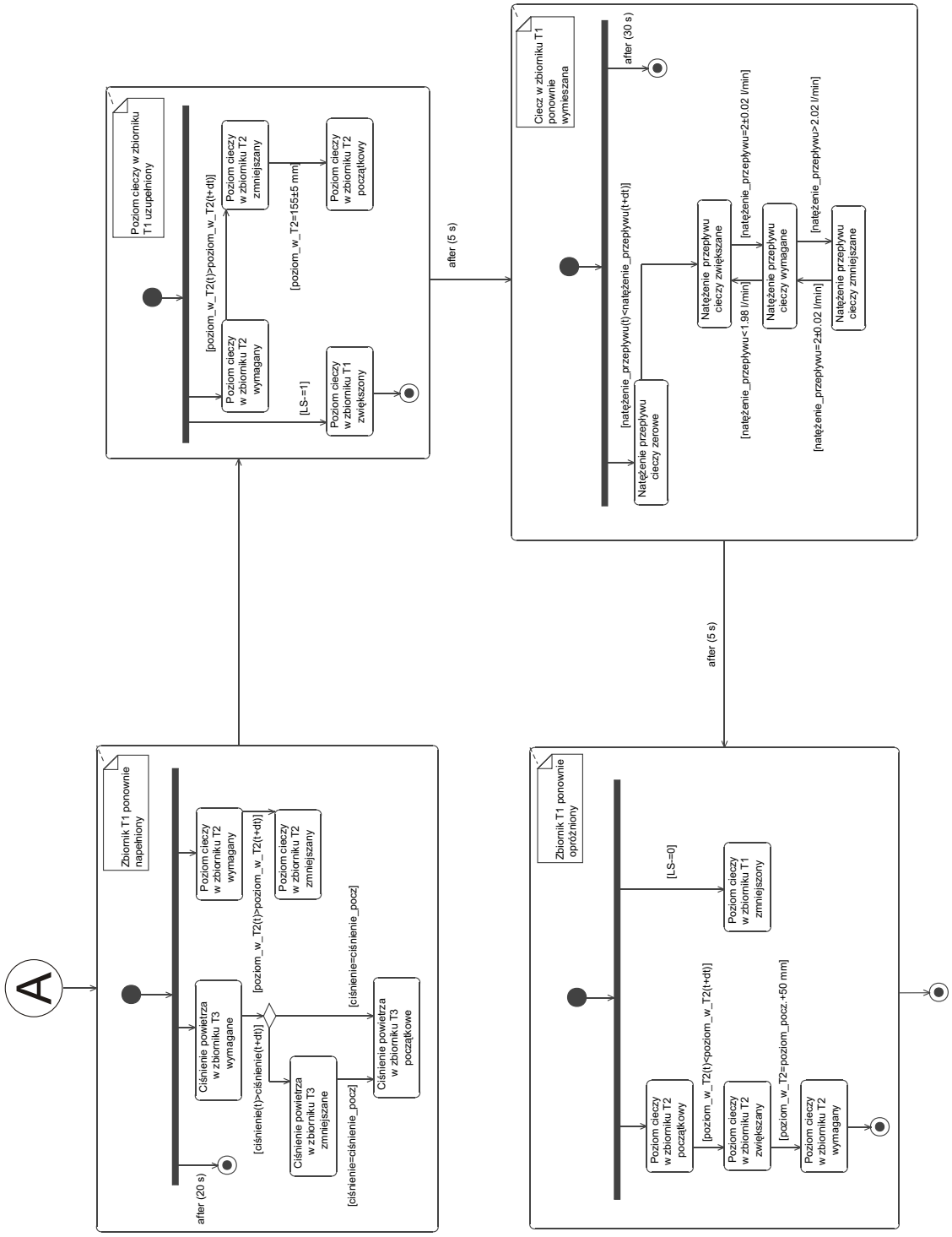
# Dodatek C
# Opis działania obiektu w języku UML



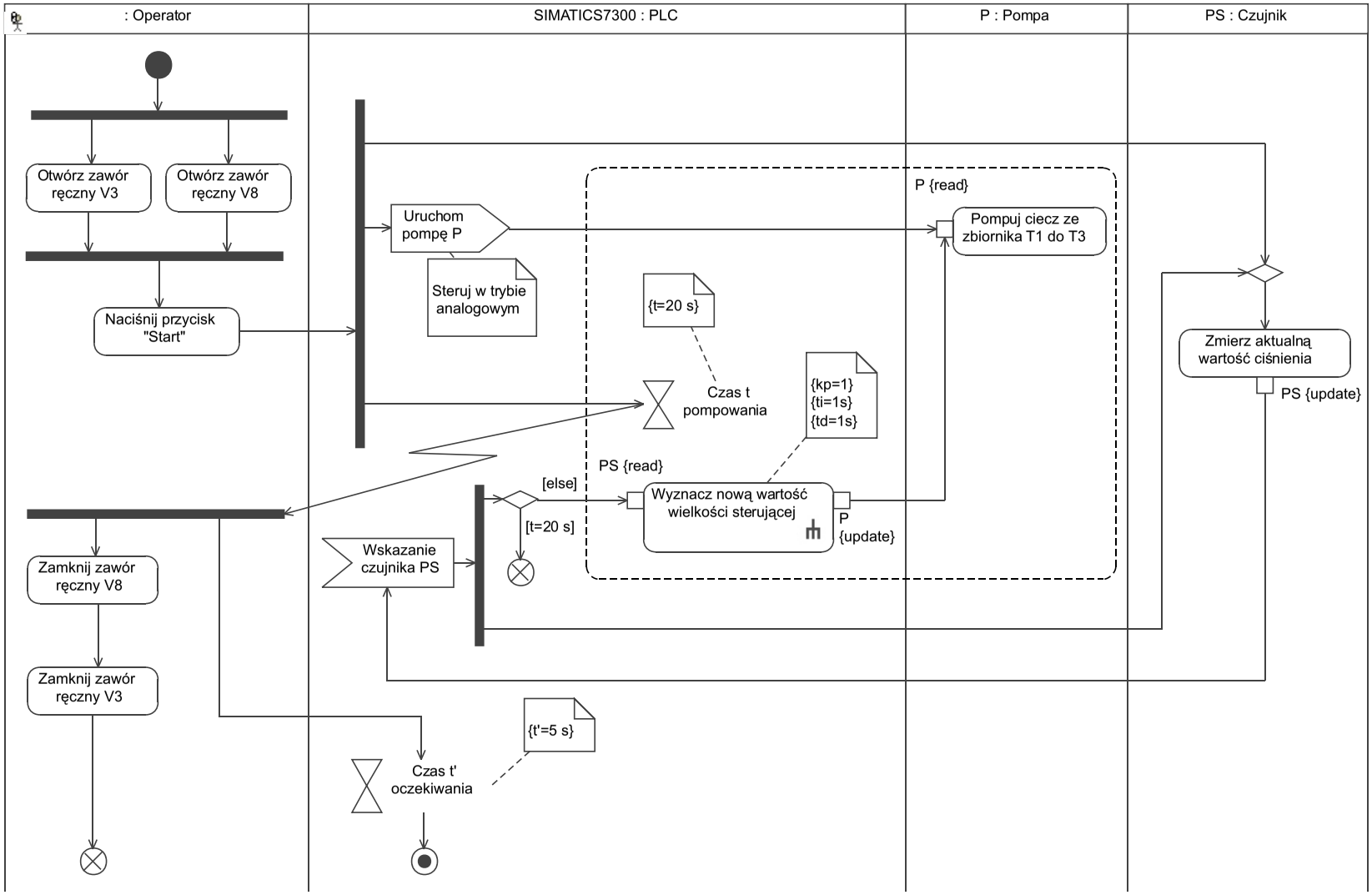

Rys. C-1: Diagram sekwencji reprezentujący aspekt historii elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$ i $\phi_7$



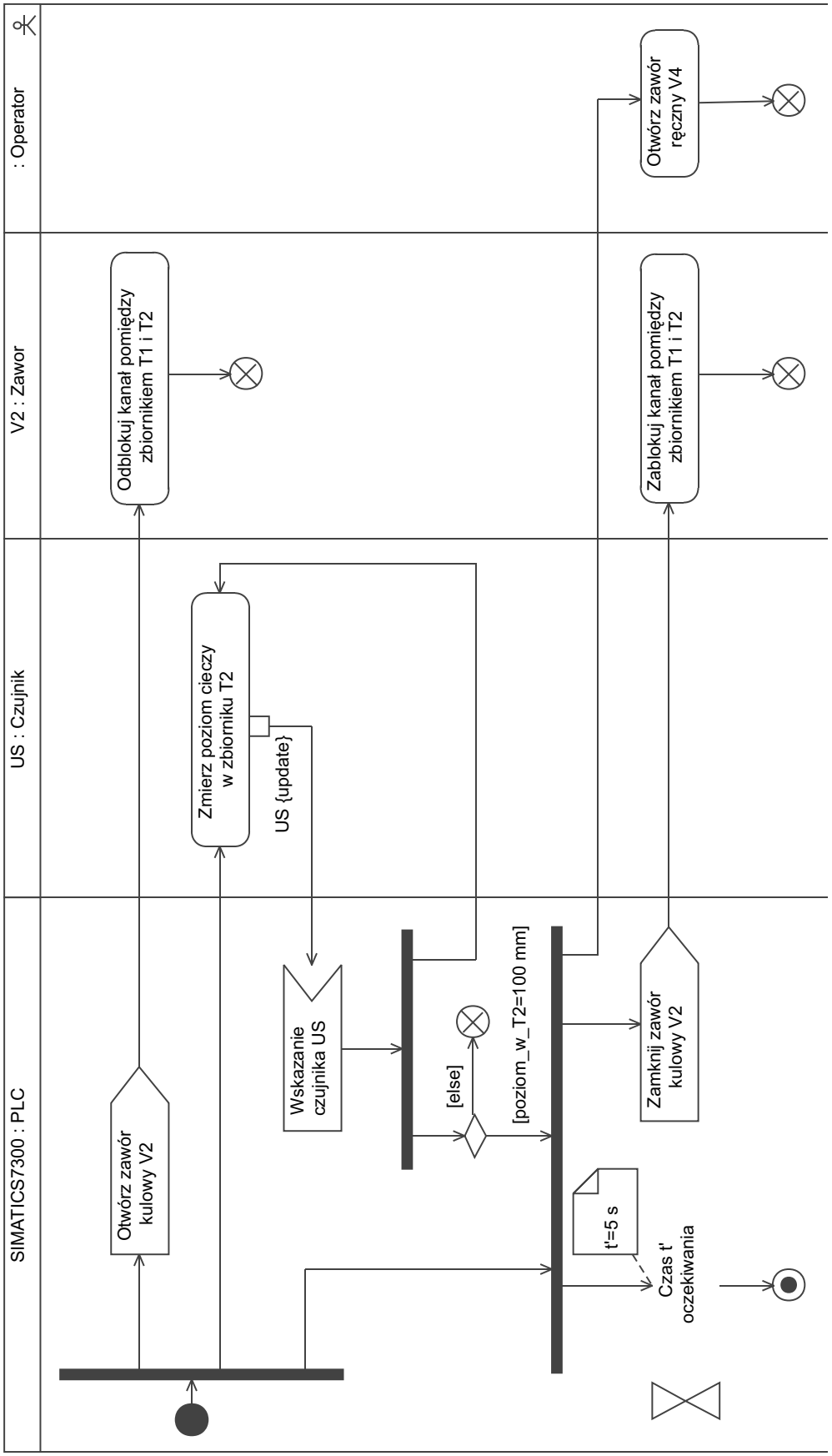

Rys. C-2: Diagram maszyny stanowej reprezentujący aspekt stanów funkcjonalnych obiektu (część 1/2)



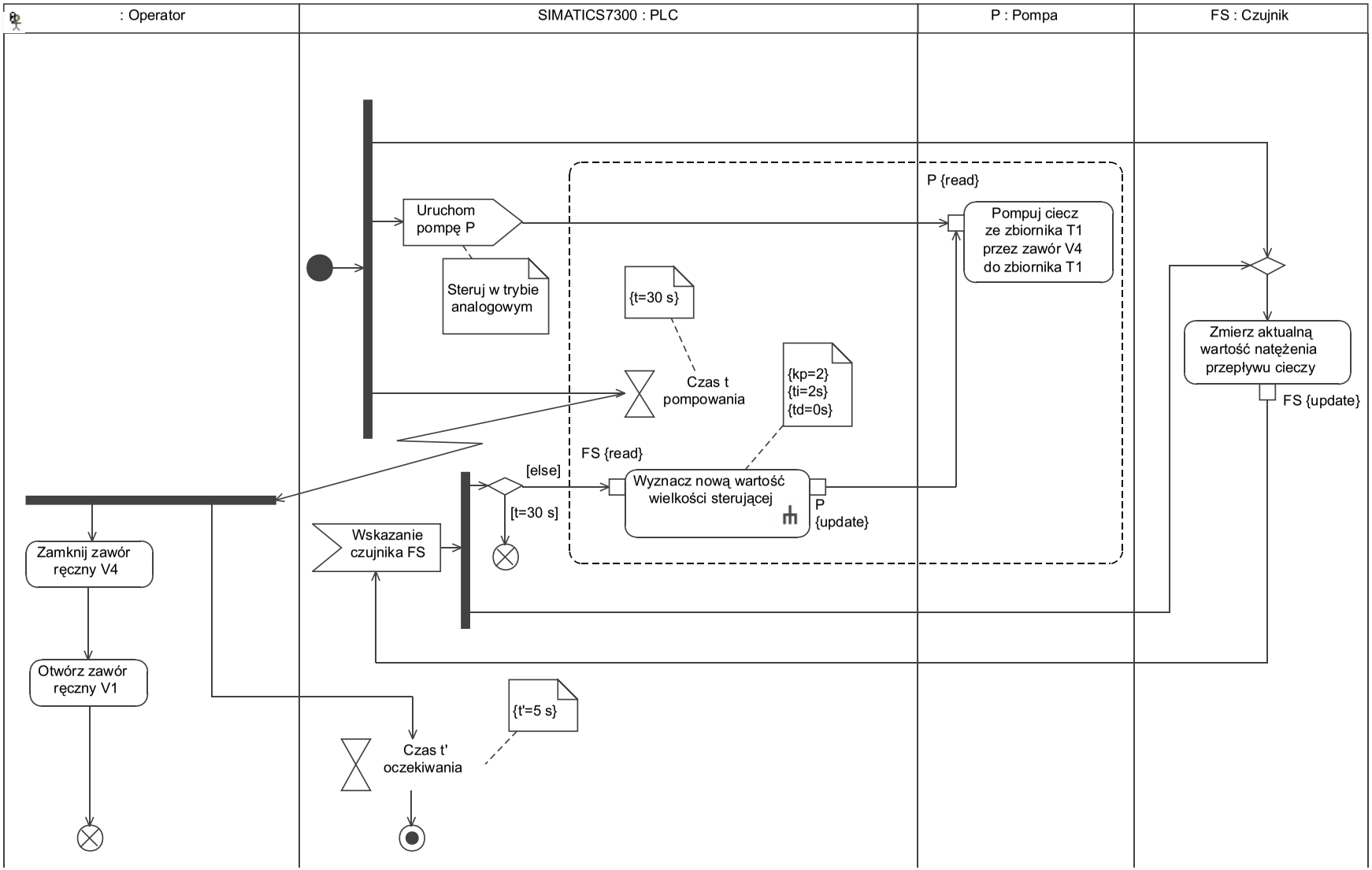

Rys. C-3: Diagram maszyny stanowej reprezentujący aspekt stanów funkcjonalnych obiektu (część 2/2)



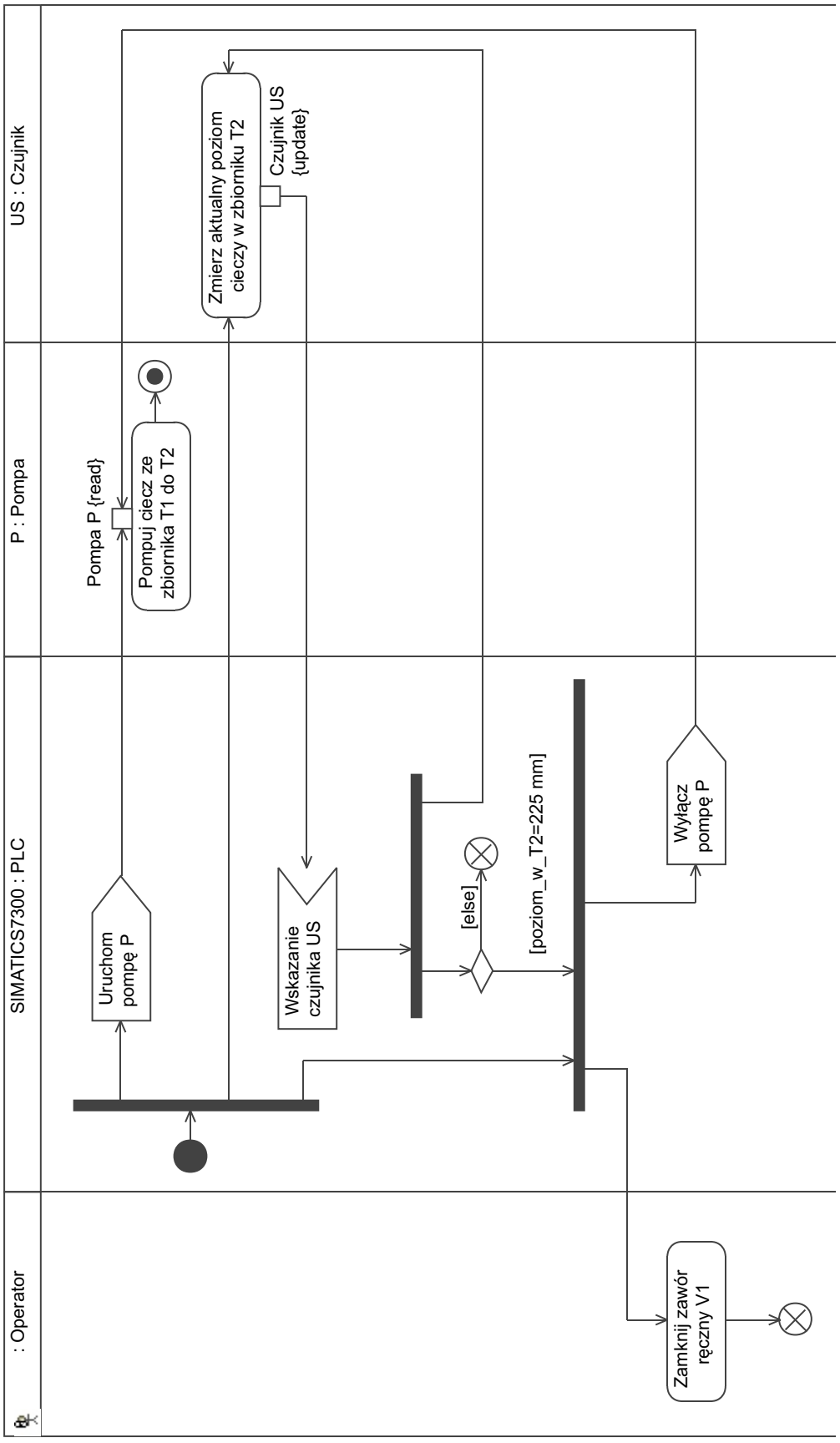

Rys. C-4: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$



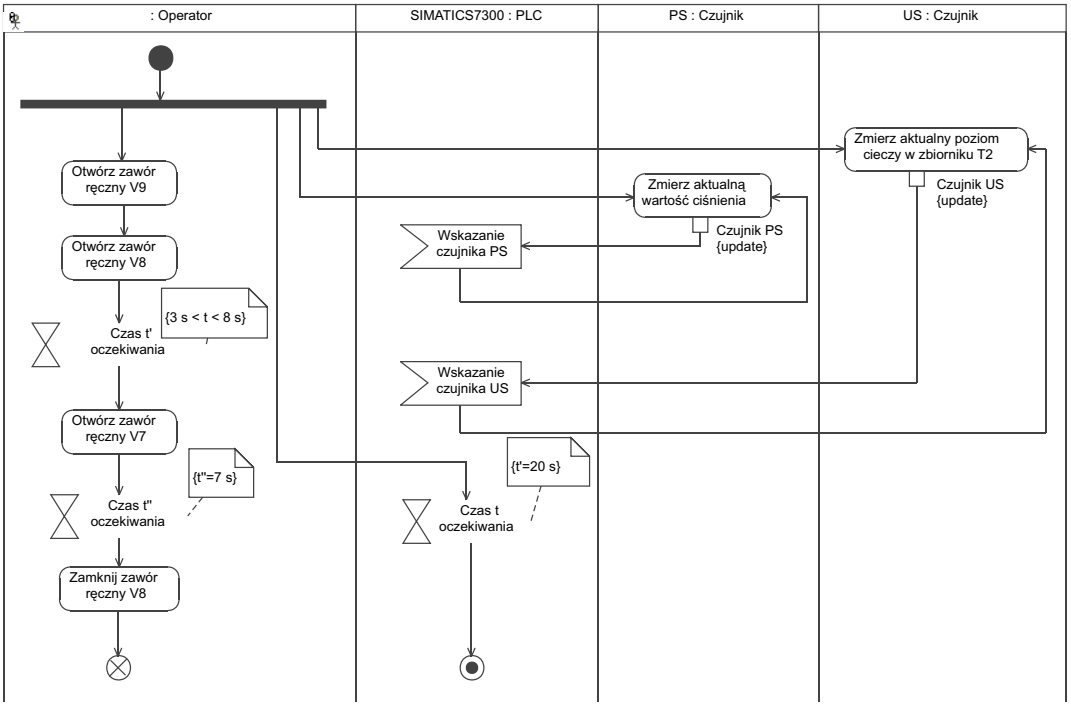

Rys. C-5: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$



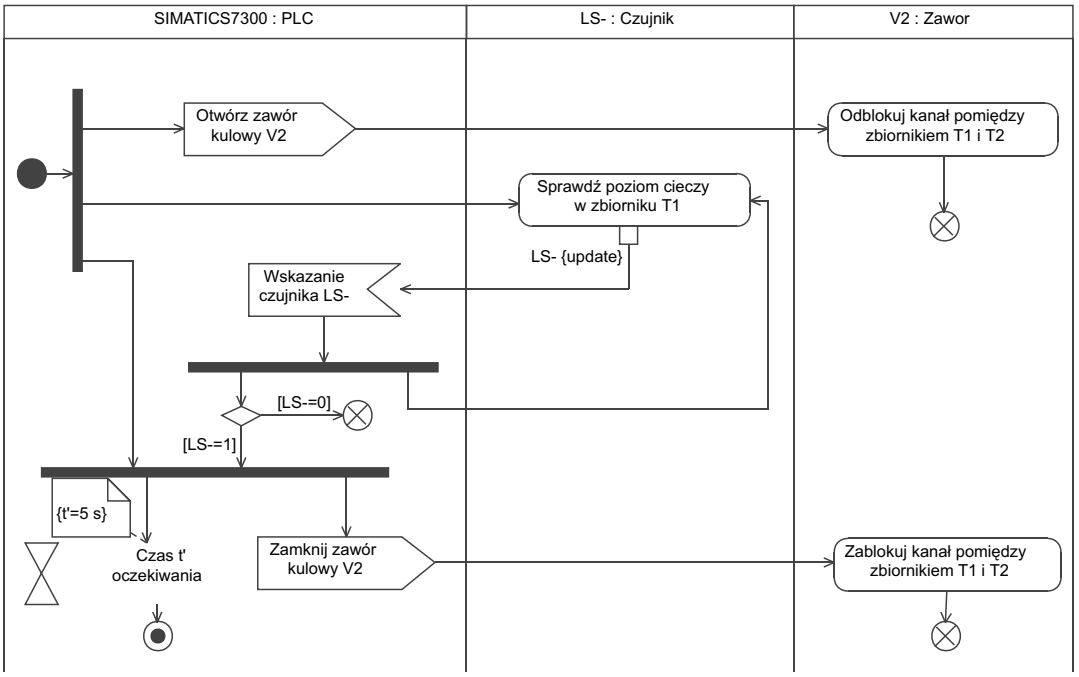

Rys. C-6: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$



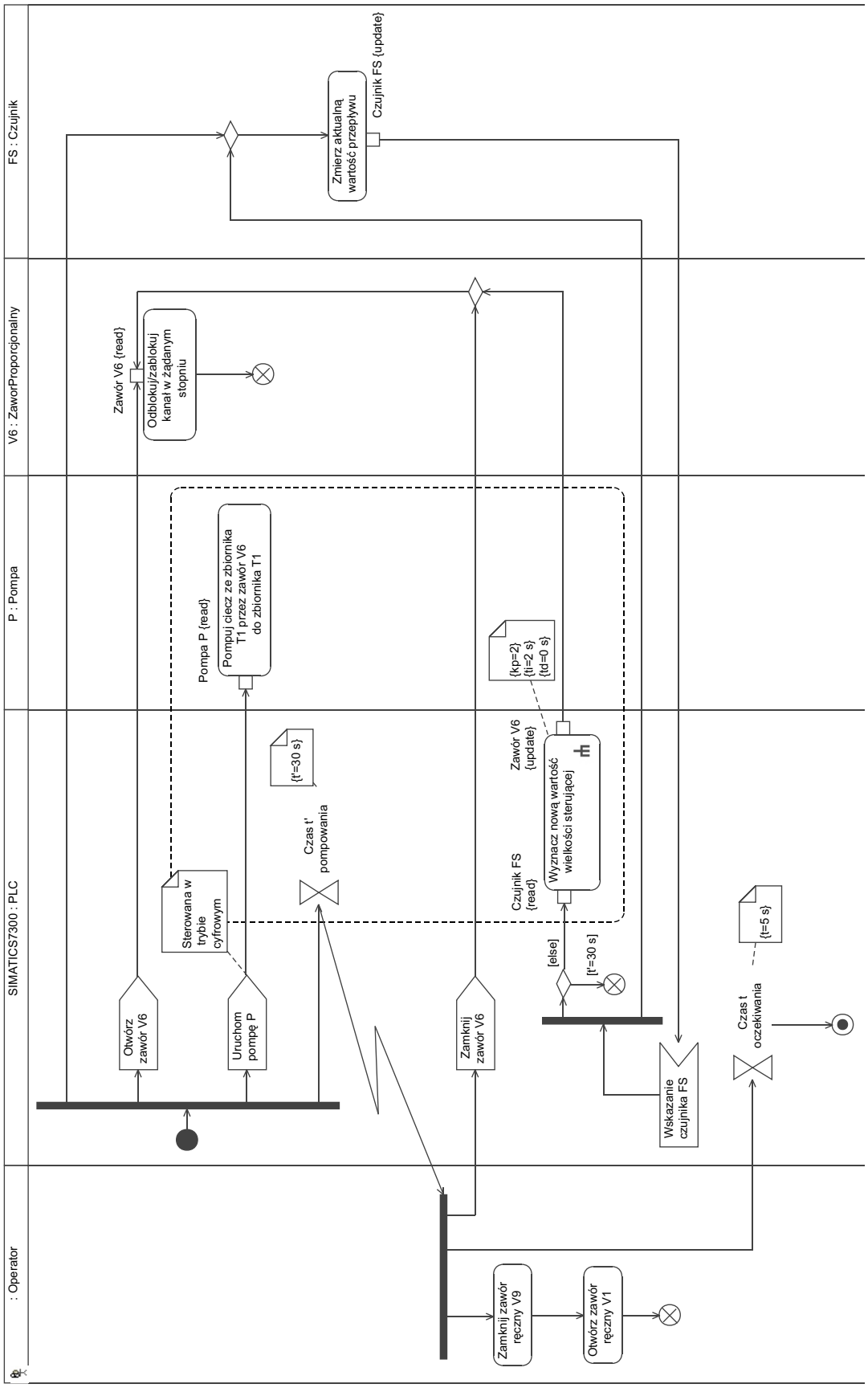

Rys. C-7: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$



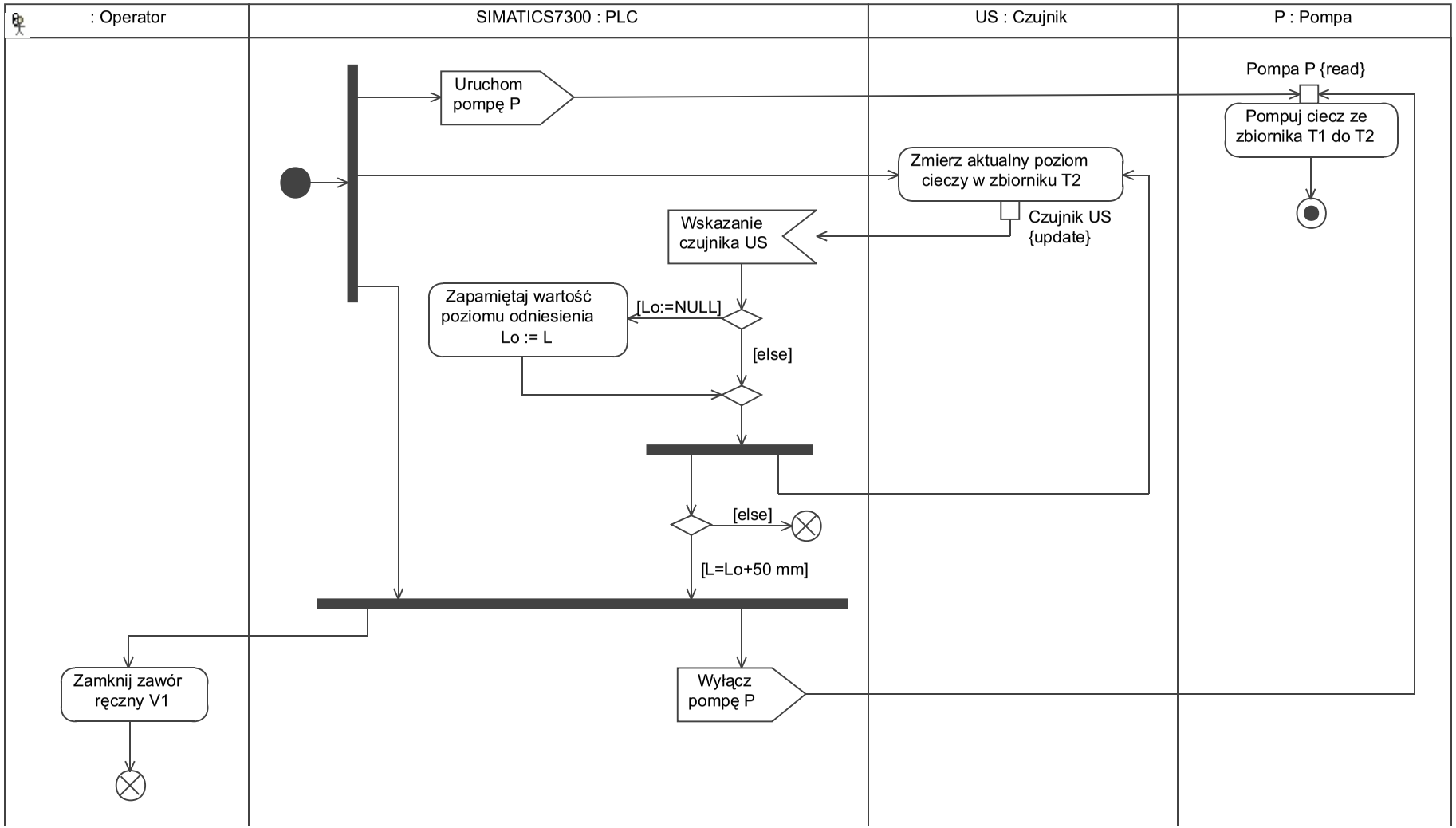

Rys. C-8: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$



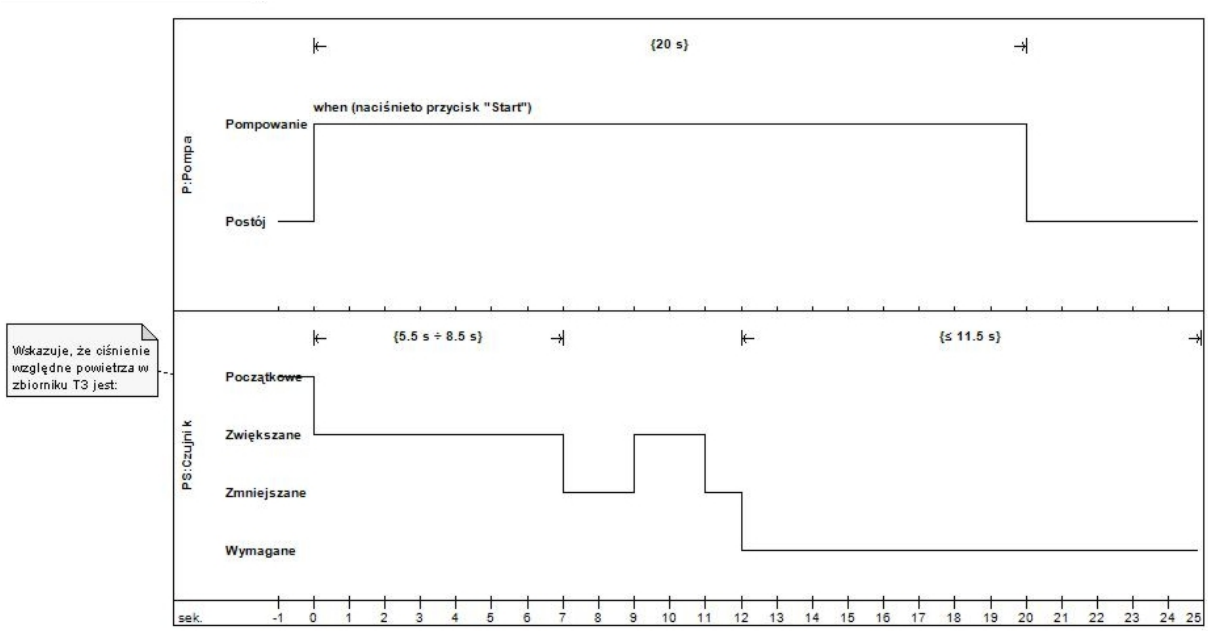

Rys. C-9: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$



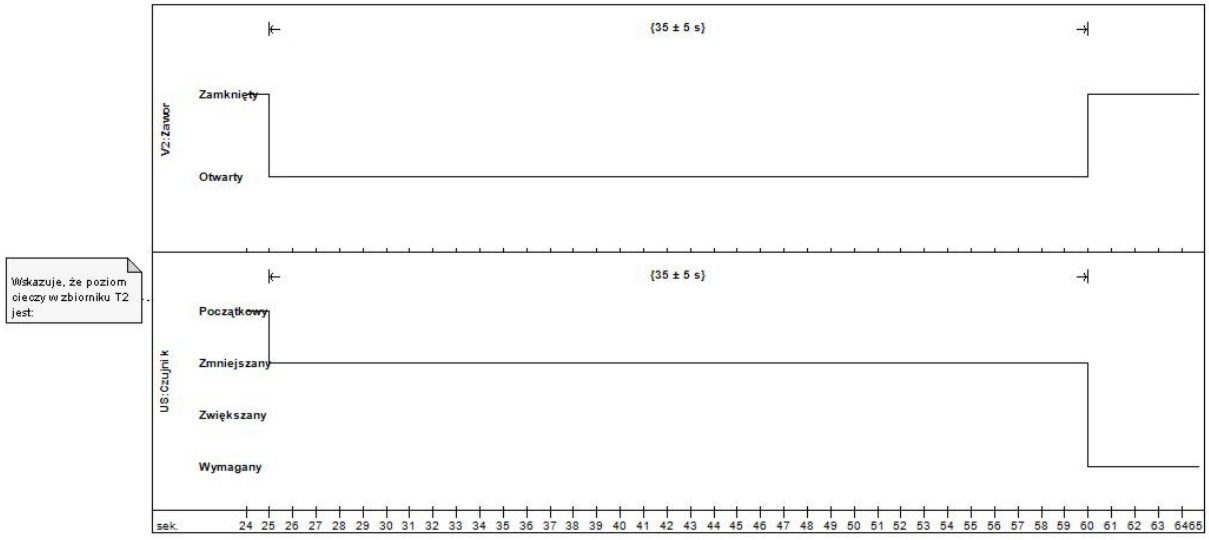

Rys. C-10: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$



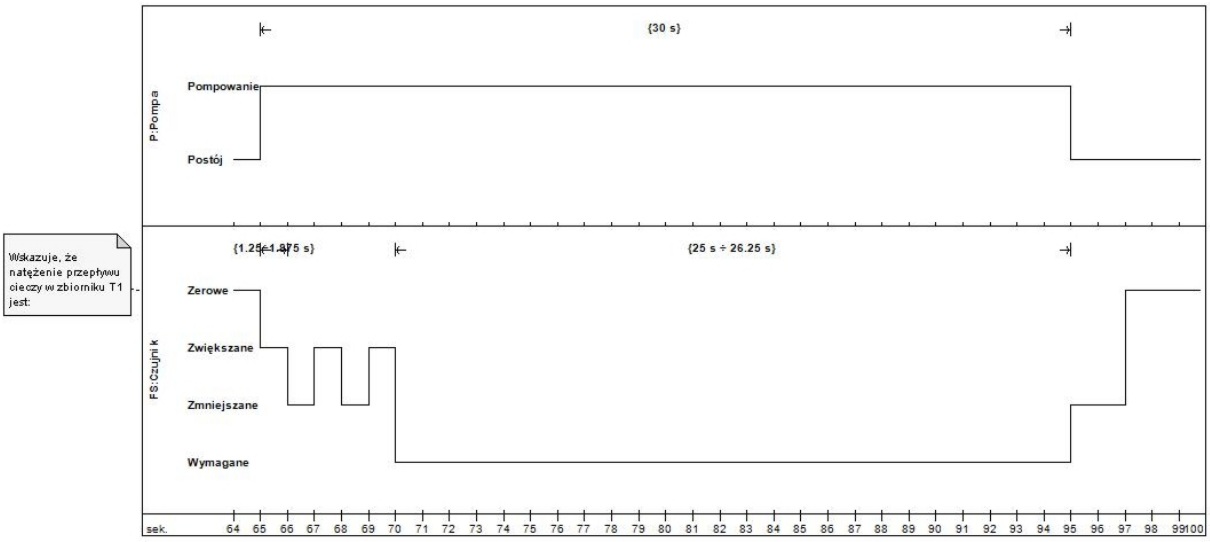

Rys. C-11: Diagram czynności reprezentujący aspekt działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_9$



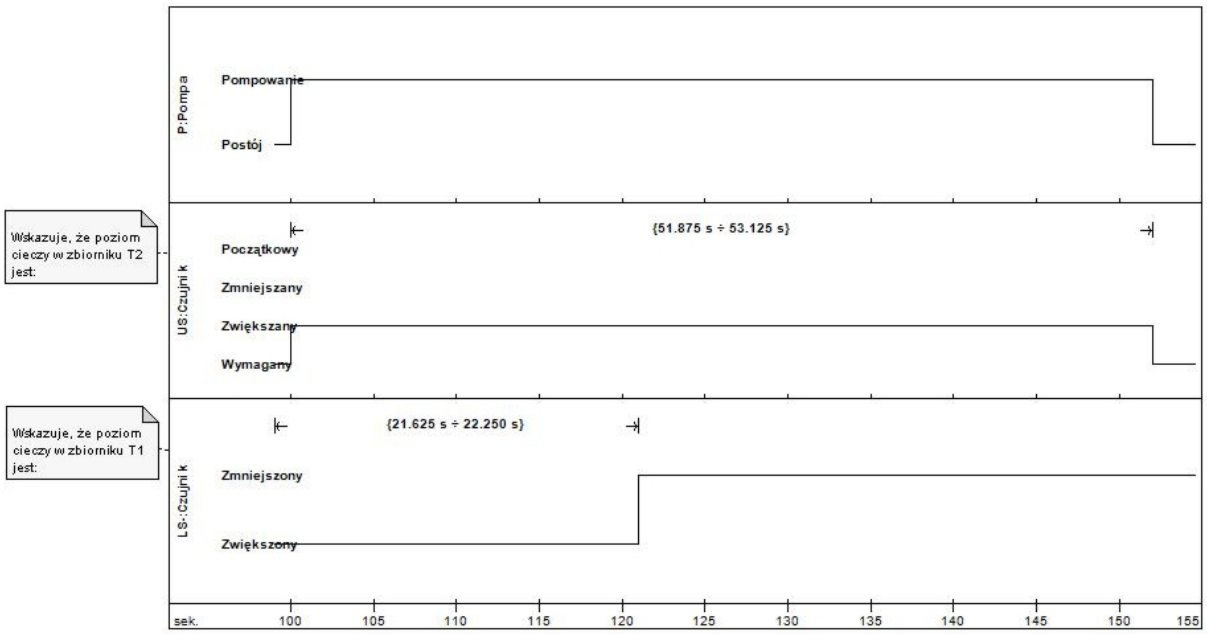

Rys. C-12: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$



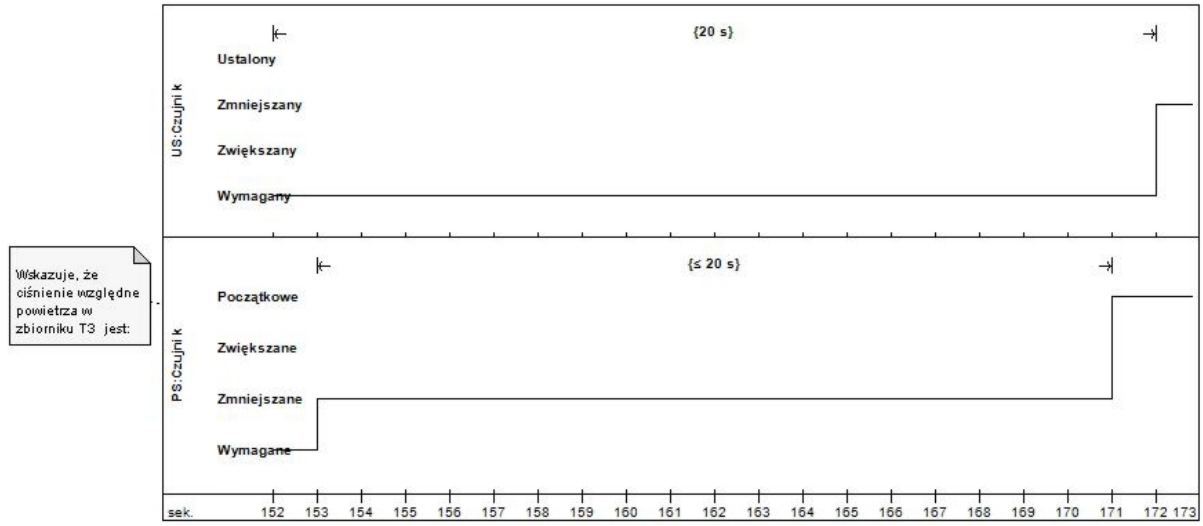

Rys. C-13: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$



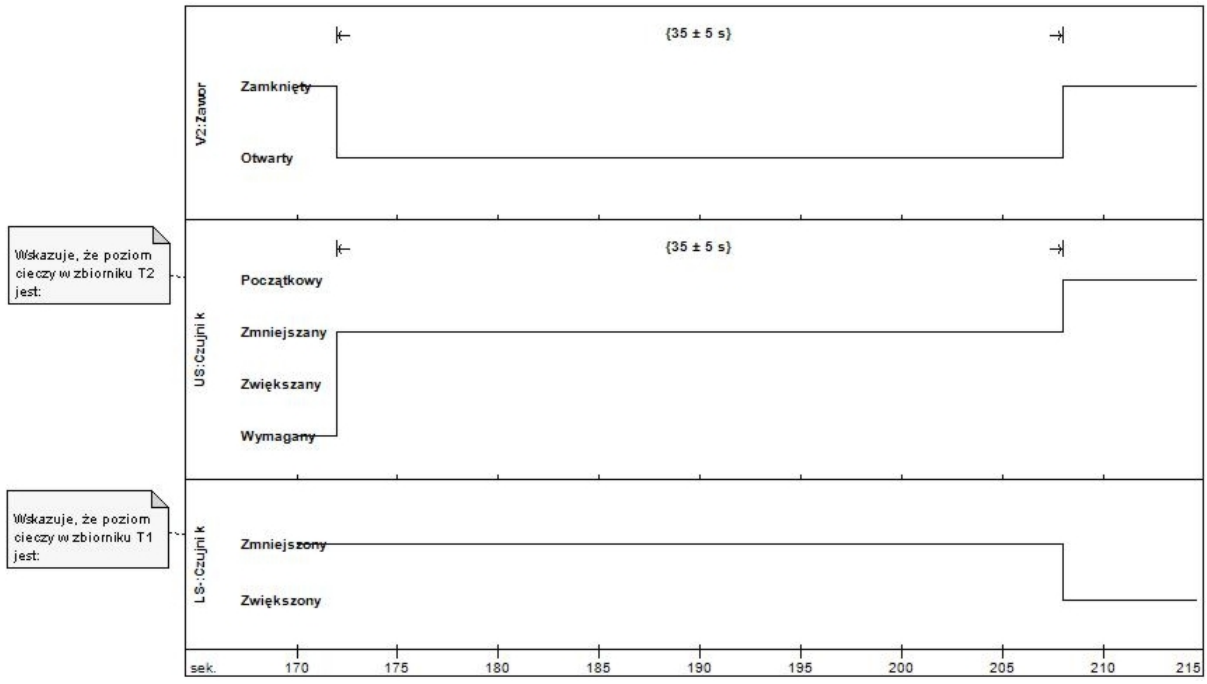

Rys. C-14: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$



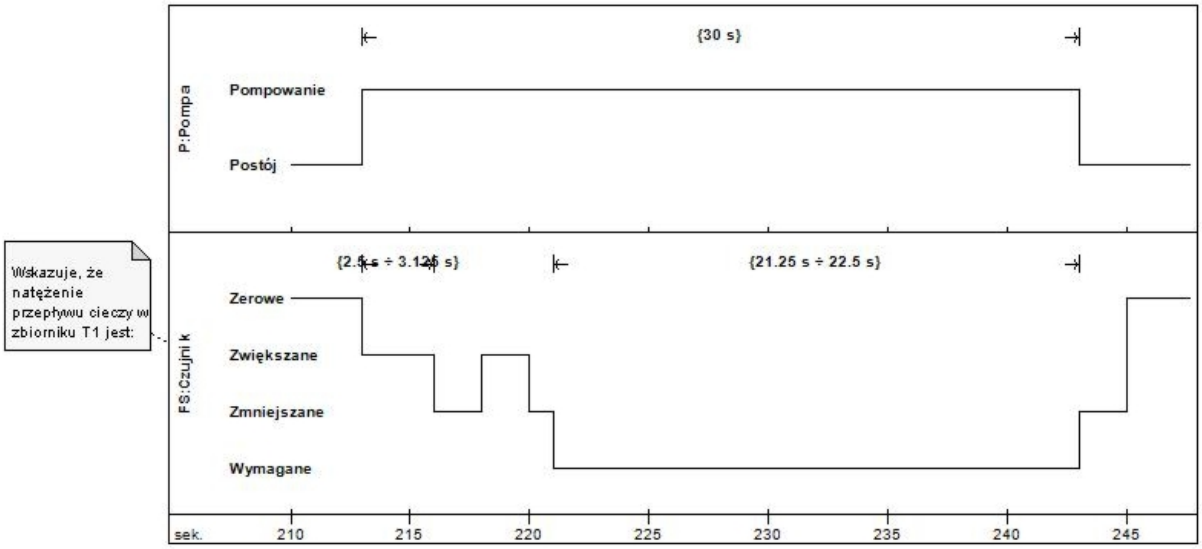

Rys. C-15: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$



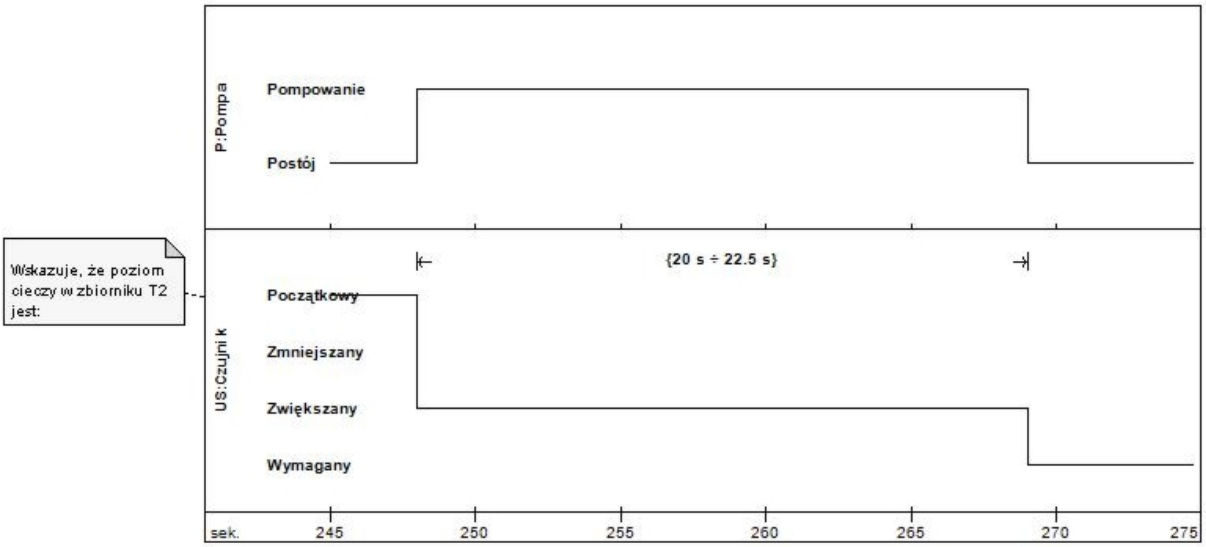

Rys. C-16: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$



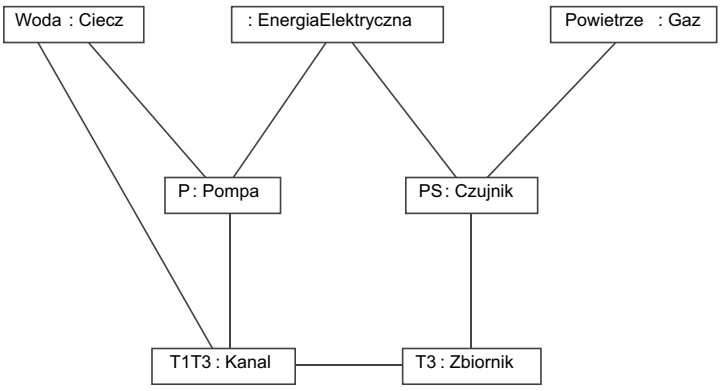

Rys. C-17: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$



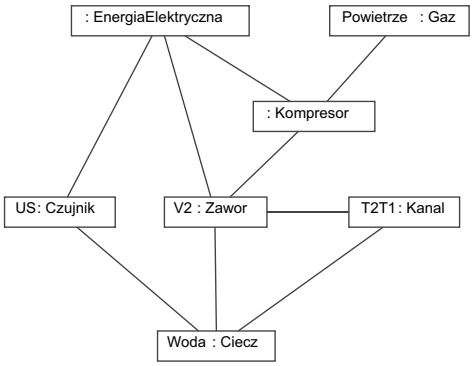

Rys. C-18: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$



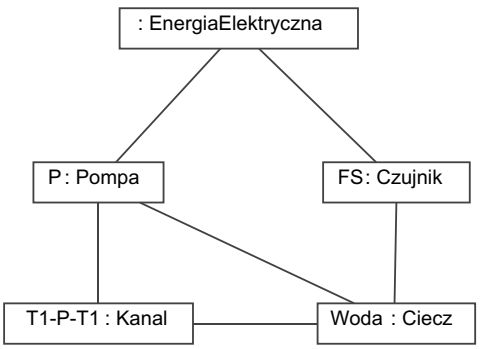

Rys. C-19: Diagram reprezentujący aspekt harmonogramu działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_9$



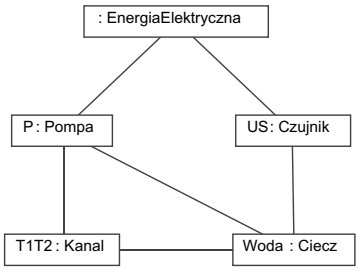

Rys. C-20: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$



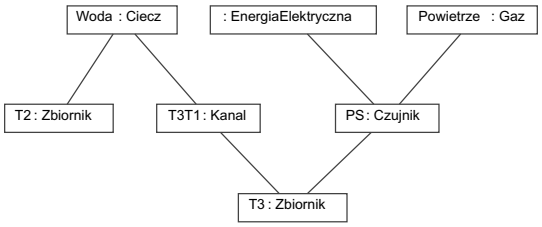

Rys. C-21: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$



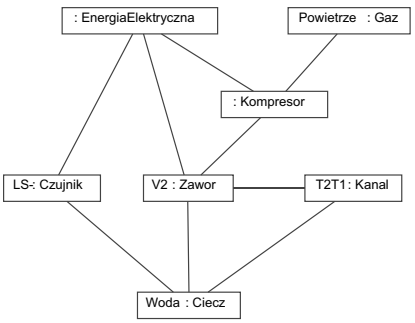

Rys. C-22: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$



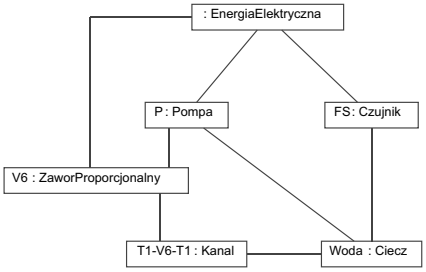

Rys. C-23: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$ i $\phi_9$




Rys. C-24: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$




Rys. C-25: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$




Rys. C-26: Diagram reprezentujący aspekt ograniczeń działania elementów obiektu dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$

# Dodatek D
# Zidentyfikowane zbiory cech sygnałów diagnostycznych

Tab. D-1: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_2$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{1,1,1}$ | Wzrastająca wartość ciśnienia powietrza w zbiorniu T3 | C-2 | $\in S_2^{ASF}$ |
| $s_{1,1,2}$ | Malejąca wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-2 | $\in S_2^{ASF}$ |
| $s_{1,1,3}$ | Uzyskana wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-2 | $\in S_2^{ASF}$ |
| $s_{1,2,1}$ | Wartość natężenia przepływu cieczy | C-4 | $\in S_2^{AD}$ |
| $s_{1,2,2}$ | Wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-4 | $\in S_2^{AD}$ |
| $s_{1,2,3}$ | Wartość wielkości sterującej | C-4 | $\in S_2^{AD}$ |
| $s_{1,3,1}$ | Czas zwiększania ciśnienia | C-12 | $\in S_2^{AHD}$ |
| $s_{1,3,2}$ | Czas wymaganego ciśnienia | C-12 | $\in S_2^{AHD}$ |
| $s_{1,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-20 | $\in S_2^{AOD}$ |
| $s_{1,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiornikach T1 i T2 | C-20 | $\in S_2^{AOD}$ |
| $s_{1,4,3}$ | Wartość względnego ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-20 | $\in S_2^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

Tab. D-2: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_3$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{2,1,1}$ | Malejąca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_3^{ASF}$ |
| $s_{2,1,2}$ | Zwiększona wartość poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-2 | $\in S_3^{ASF}$ |
| $s_{2,1,3}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_3^{ASF}$ |
| $s_{2,2,1}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-5 | $\in S_3^{AD}$ |
| $s_{2,2,2}$ | Otwarty kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 | C-5 | $\in S_3^{AD}$ |
| $s_{2,2,3}$ | Zamknięty kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 | C-5 | $\in S_3^{AD}$ |
| $s_{2,3,1}$ | Czas zmniejszania poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-13 | $\in S_3^{AHD}$ |
| $s_{2,3,2}$ | Czas otwarcia zaworu kulowego V2 | C-13 | $\in S_3^{AHD}$ |
| $s_{2,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-21 | $\in S_3^{AOD}$ |
| $s_{2,4,2}$ | Początkowa wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-21 | $\in S_3^{AOD}$ |
| $s_{2,4,3}$ | Wartość ciśnienia powietrza na wyjściu z kompresora | C-21 | $\in S_3^{AOD}$ |
| $s_{2,5,1}$ | Kompresor odłączany | C-1 | $\in S_3^{AH}$ |

Tab. D-3: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_4$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{3,1,1}$ | Wzrastająca wartość natężenia przepływu cieczy | C-2 | $\in S_4^{ASF}$ |
| $s_{3,1,2}$ | Malejąca wartość natężenia przepływu cieczy | C-2 | $\in S_4^{ASF}$ |
| $s_{3,1,3}$ | Uzyskana wartość natężenia przepływu cieczy | C-2 | $\in S_4^{ASF}$ |
| $s_{3,1,4}$ | Malejąca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_4^{ASF}$ |
| $s_{3,1,5}$ | Wzrastająca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_4^{ASF}$ |
| $s_{3,2,1}$ | Wartość wielkości sterującej | C-6 | $\in S_4^{AD}$ |
| $s_{3,2,2}$ | Wartość natężenia przepływu cieczy | C-6 | $\in S_4^{AD}$ |
| $s_{3,3,1}$ | Czas zwiększania natężenia przepływu cieczy | C-14 | $\in S_4^{AHD}$ |
| $s_{3,3,2}$ | Czas wymaganego natężenia przepływu cieczy | C-14 | $\in S_4^{AHD}$ |
| $s_{3,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-22 | $\in S_4^{AOD}$ |
| $s_{2,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-22 | $\in S_4^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

Tab. D-4: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_5$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{4,1,1}$ | Wzrastająca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_5^{ASF}$ |
| $s_{4,1,2}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-2 | $\in S_5^{ASF}$ |
| $s_{4,1,3}$ | Zmniejszona wartość poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-2 | $\in S_5^{ASF}$ |
| $s_{4,2,1}$ | Wartość natężenia przepływu cieczy | C-7 | $\in S_5^{AD}$ |
| $s_{4,2,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-7 | $\in S_5^{AD}$ |
| $s_{4,2,3}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-7 | $\in S_5^{AD}$ |
| $s_{4,3,1}$ | Czas zwiększania poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-15 | $\in S_5^{AHD}$ |
| $s_{4,3,2}$ | Czas zmniejszania poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-15 | $\in S_5^{AHD}$ |
| $s_{4,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-23 | $\in S_5^{AOD}$ |
| $s_{4,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-23 | $\in S_5^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

Tab. D-5: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_6$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{5,1,1}$ | Malejąca wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-3 | $\in S_6^{ASF}$ |
| $s_{5,1,2}$ | Uzyskana wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-3 | $\in S_6^{ASF}$ |
| $s_{5,1,3}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-3 | $\in S_6^{ASF}$ |
| $s_{5,2,1}$ | Wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-8 | $\in S_6^{AD}$ |
| $s_{5,2,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-8 | $\in S_6^{AD}$ |
| $s_{5,3,1}$ | Czas zmniejszania ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-16 | $\in S_6^{AHD}$ |
| $s_{5,3,2}$ | Czas wymaganego poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-16 | $\in S_6^{AHD}$ |
| $s_{5,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-24 | $\in S_6^{AOD}$ |
| $s_{5,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-24 | $\in S_6^{AOD}$ |
| $s_{5,4,3}$ | Wartość ciśnienia powietrza w zbiorniku T3 | C-24 | $\in S_6^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

Tab. D-6: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_7$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{6,1,1}$ | Malejąca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-3 | $\in S_7^{ASF}$ |
| $s_{6,1,2}$ | Zwiększona wartość poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-3 | $\in S_7^{ASF}$ |
| $s_{6,1,3}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-3 | $\in S_7^{ASF}$ |
| $s_{6,2,1}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-9 | $\in S_7^{AD}$ |
| $s_{6,2,2}$ | Otwarty kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 | C-9 | $\in S_7^{AD}$ |
| $s_{6,2,3}$ | Zamknięty kanał pomiędzy zbiornikami T2 i T1 | C-9 | $\in S_7^{AD}$ |
| $s_{6,3,1}$ | Czas zmniejszania poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-17 | $\in S_7^{AHD}$ |
| $s_{6,3,2}$ | Czas zwiększenia poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-17 | $\in S_7^{AHD}$ |
| $s_{6,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-25 | $\in S_7^{AOD}$ |
| $s_{6,4,2}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-25 | $\in S_7^{AOD}$ |
| $s_{6,4,3}$ | Wartość ciśnienia powietrza na wyjściu z kompresora | C-25 | $\in S_7^{AOD}$ |
| $s_{6,5,1}$ | Kompresor odłączany | C-1 | $\in S_7^{AH}$ |

Tab. D-7: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_8$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{7,1,1}$ | Wzrastająca wartość natężenia przepływu cieczy | C-3 | $\in S_8^{ASF}$ |
| $s_{7,1,2}$ | Malejąca wartość natężenia przepływu cieczy | C-3 | $\in S_8^{ASF}$ |
| $s_{7,1,3}$ | Uzyskana wartość natężenia przepływu cieczy | C-3 | $\in S_8^{ASF}$ |
| $s_{7,2,1}$ | Wartość natężenia przepływu cieczy | C-10 | $\in S_8^{AD}$ |
| $s_{7,2,2}$ | Wartość wielkości sterującej | C-10 | $\in S_8^{AD}$ |
| $s_{7,3,1}$ | Czas zwiększania natężenia przepływu cieczy | C-18 | $\in S_8^{AHD}$ |
| $s_{7,3,2}$ | Czas wymaganego natężenia przepływu cieczy | C-18 | $\in S_8^{AHD}$ |
| $s_{7,4,1}$ | Wartość natężenia pradu | C-26 | $\in S_8^{AOD}$ |
| $s_{7,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-26 | $\in S_8^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

Tab. D-8: Zbiór rozpatrywanych cech sygnałów diagnostycznych dla stanu funkcjonalnego $\phi_9$

| OZN. | CECHA SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO | RYS. | UWAGI |
|---|---|---|---|
| $s_{8,1,1}$ | Wzrastająca wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-3 | $\in S_9^{ASF}$ |
| $s_{8,1,2}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-3 | $\in S_9^{ASF}$ |
| $s_{8,1,3}$ | Zmniejszona wartość poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-3 | $\in S_9^{ASF}$ |
| $s_{8,2,1}$ | Wartość natężenia przepływu cieczy | C-11 | $\in S_9^{AD}$ |
| $s_{8,2,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-11 | $\in S_9^{AD}$ |
| $s_{8,2,3}$ | Uzyskana wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-11 | $\in S_9^{AD}$ |
| $s_{8,3,1}$ | Czas zwiększania poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-19 | $\in S_9^{AHD}$ |
| $s_{8,3,2}$ | Czas zmniejszania poziomu cieczy w zbiorniku T1 | C-19 | $\in S_9^{AHD}$ |
| $s_{8,4,1}$ | Wartość natężenia prądu | C-23 | $\in S_9^{AOD}$ |
| $s_{8,4,2}$ | Wartość poziomu cieczy w zbiorniku T2 | C-23 | $\in S_9^{AOD}$ |
| Brak sygnału diagnostycznego dla aspektu historii elementów obiektu | | | |

# Bibliografia


[1] Bednarski M., Cholewa W., Frid W., Galek M.: *Simulation of nuclear reactors accidents*. Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 124. Politechnika Śląska,Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, 2004.

[2] Bell A. E.: *Death by UML Fever*. Queue, 2(1):72–80, March 2004.

[3] Borgelt C., Kruse R.: *Graphical Models, Methods for Data Analysis and Mining*. Wiley, Chichester, 2002.

[4] Buffa F., Marzano G., Norese M.: *MACRAME: A Modelling Methodology in Multiactor Contexts*. Decision Support Systems, 17:331–343, 1996.

[5] Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1982.

[6] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985.

[7] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Skrypt nr 1243. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985.

[8] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1989.

[9] Chan C. L., Chang C. C.: *A Method Combining MAU and Fuzzy Logic for Cooperative Decision Making*. Computers in Engineering, 35:291–294, 1998.

[10] Cholewa W.: *Aggregation of fuzzy opinions - an axiomatic approach*. Fuzzy Sets and Systems, 17:249–259, 1985.

[11] Cholewa W.: *Metody identyfikacji modeli relacji*. Cholewa W., Kiciński J. (red.). *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*, rozdział 4, str. 20–45. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[12] Cholewa W.: *Modele odwrotne*. Cholewa W., Kiciński J. (red.). *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*, rozdział 3, str. 16–19. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[13] Cholewa W.: *Systemy doradcze w diagnostyce technicznej*. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z., Cholewa W. (red.). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, rozdział 15, str. 543–580. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.

[14] Cholewa W.: *Diagnostyczne modele obiektów*. Kiciński J. (red.). *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w trubozespołach energetycznych*, rozdział 2, str. 27–56. Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, Gdańsk, 2005.

[15] Cholewa W.: *Wieloaspektowe modele diagnostyczne*. Problemy eksploatacji, (3):35 – 43, 2005.

[16] Cholewa W., Kaźmierczak J.: *Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów*. Skrypty uczelniane nr 1904. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1995.

[17] Cholewa W., Kiciński J. (red.): *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*, Gliwice, 1997. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

[18] Cholewa W., Kiciński J. (red.): *Diagnostyka techniczna. Metody odwracania nieliniowych modeli obiektów*, Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 120, Gliwice, 2001. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

[19] Cholewa W., Kościelny J. M.: *Wprowadzenie*. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z., Cholewa W. (red.). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, rozdział 1, str. 3–27. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.

[20] Cholewa W., Kosmowski K., Radkowski S. (red.): *Modele systemów oceny ryzyka i diagnostyki technicznej*, Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 138, Gliwice, 2008. Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn.

[21] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Skrypty uczelniane nr 1447. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1987.

[22] Cholewa W., White M.: *Application of neural networks for inversing of vibration models*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z. 116. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1994.

[23] Cholewa W., White M. F.: *Inverse modelling in rotordynamics for identyfication of unbalance distribution*. Machine Vibration, 2:157–167, 1993.

[24] Chow C. K., Liu C. N.: *Approximating discrete probability distributions with dependence trees*. IEEE Transactions on Information Theory, 14(3):462–467, 1968.

[25] Cichosz P.: *Systemy uczące się*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.

[26] Cooper G. F., Herskovits E.: *A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data*. Machine Learning, 9(4):309–347, 1992.

[27] Cowell R. G., David A. P., Lauritzen S. L., Spiegelhalter D. J.: *Probabilistic Networks and Expert Systems*. Springer, New York, 1999.

[28] Dempster A. P.: *Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping*. The Annals of Statistics, 28:325–339, 1967.

[29] Detyniecki M.: *Mathematical aggregation operators and their application to video querying*. Praca doktorska, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, Paris, France, 2000.

[30] Dietrych J.: *System i konstrukcja*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.

[31] Dubois D., Prade H.: *A Set-Theoretic View on Belief Functions: Logical Operations and Approximations by Fuzzy Sets*. International Journal of General Systems, 12:193–226, 1986.

[32] Durham S. D., Smolka J. S., Valtorta M.: *Statistical consistency with Dempster's rule on diagnostic trees having uncertain performance parameters*. International Journal of Approximate Reasoning, 6:67–81, 1992.

[33] FESTO. Stanowisko PCS. Dokumentacja techniczna.

[34] Gajek L., Kałuszka M.: *Wnioskowanie statystyczne. Modele i metody*. WNT, Warszawa, 2000.

[35] Gelman A., Carlin J. B., Stern H. S., Rubin D. B.: *Bayesian Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 2004.

[36] Geslin S., Salles M., Ziad A.: *Fuzzy aggregation in economic environments I. Quantitative fuzziness, public goods and monotonicity assumptions*. Mathematical Social Science, 45(2):155–166, 2003.

[37] Grzymkowski R.: *Matematyka dla studentów wyższych uczelni technicznych*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2000.

[38] Inagaki T.: *Interdependence between Safety-Control Policy and Multiple-Sensor Schemes Via Dempster-Shafer Theory*. IEEE Transactions on Reliability, 40(2):182–188, 1991.

[39] Isermann R., Ballé P. *Terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis*. Propozycje terminologiczne zaakceptowane przez IFAC Komitet SAFEPROCESS, 1996.

[40] Jensen F. V.: *An Introduction to Bayesian Networks*. Springer, New York, 1996.

[41] Jensen F. V., Nielsen T. D.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, New York, 2007.

[42] Kjaerulff U. B., Madsen A. L.: *Bayesian Networks and Influence Diagrams*. Springer, 2008.

[43] Klimek A.: *Metody doskonalenia odwrotnych modeli diagnostycznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z. 134. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.

[44] Kościelny J. M.: *Diagnostyka ciągłych zautomatyzowanych procesów przemysłowych metodą dynamicznych tablic stanu*. Elektronika, z. 95. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1991.

[45] Kościelny J. M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2001.

[46] Kościelny J. M.: *Metodologia diagnostyki procesów*. Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczuk Z., Cholewa W. (red.). *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, rozdział 3, str. 57–114. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.

[47] Kopaliński W.: *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*. Wiedza Powszechna, Warszawa, 1983.

[48] Krempa J., Maźbić-Kulma B.: *Elementy logiki, teorii mnogości i algebry*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1977.

[49] Lauritzen S., Spiegelhalter D.: *Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems*. Journal of the Royal Statistical Society B, 50:157–224, 1988.

[50] Luo X., Zhang C., Leung H.: *Information Sharing Between Heterogeneous Uncertain Reasoning Models in a Multi-Agent Environment: A Case Study*. Internationa Journal of Approximate Reasoning, 27:27–59, 2001.

[51] 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, str. 337–345, 2001.

[52] Mazur Z., Wilczek A. *Ograniczenia dynamiczne w modelowaniu zachowania obiektów*. http://www.e-informatyka.pl/wiki/Ograniczenia_dynamiczne_w_modelowaniu_ zachowania_obiektów, luty 2009.

[53] Mesarovic M. D., Takahara Y.: *General Systems Theory — Mathematical Foundations*. Academic Press, New York, 1975.

[54] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z. 130. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[55] Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna: metody pozyskiwania wiedzy*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.

[56] Parker J.: *Voting methods for multiple autonomus agents*. 3rd Australian and New Zealand Conf. on Intelligent Information Systems, str. 128–133, Perth, Australia, 1995.

[57] Pearl J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988.

[58] Provan G. M.: *The validity of Dempster-Shafer belief functions*. International Journal of Approximate Reasoning, 6:389–399, 1992.

[59] Rahman A., Fairhurst M.: *Multiple classifier decision combination strategies for character recognition: A review*. International Journal on Document Analysis and Recognition, 5:166–194, 2003.

[60] Ralescu A., Ralescu D.: *Extensions of fuzzy aggregation*. Fuzzy Sets and Systems, 86(3):321–330, 1997.

[61] Ören T. I.: *Model Update: A Model Specification Formalism with a Generalized View of Discontinuity*. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, str. 689–694, Montreal, Quebec, Canada, July 27–30 1987.

[62] Ören T. I.: *Dynamic Templates and Semantic Rules for Simulation Advisors and Certifiers*. Fishwick P., Modjeski R. (red.). *Knowledge-Based Simulation: Methodology and Application*, str. 53–76. Springer–Verlag, New York, 1991.

[63] Ören T. I.: *Towards a Modeling Formalism for Conflict Management*. Sarjoughian H. S., Cellier F. E. (red.). *Discrete Event Modeling and Simulation: A Tapestry of Systems and AI-based Theories and Methodologies*, str. 93–106. Springer–Verlag, New York, 2001.

[64] Rovatti R., Ragazzoni R., Kovacs Z., Guerrieri R.: *Voting rules for k-nearest neighbors classifiers*. Neural Computations, 7(3):594–605, 1995.

[65] Rozwadowski T.: *Diagnostyka techniczna obiektów złożonych*. WAT, Warszawa, 1983.

[66] Rzydzik S.: *Rozpoznawanie stanu w układach rozproszonych*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, wrzesień 2007.

[67] Sasikala K., Petrou M.: *Generalised fuzzy aggregation in estimating the risk of desertification of a burned forest*. Fuzzy Sets and Systems, 118(1):121–137, 2001.

[68] Sato K., Lim Y.: *Physical Interaction and Multi-Aspect Representation for Information Intensive Environments*. Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, str. 436–443, Osaka, Japan, September 27–29 2000.

[69] Schmuller J.: *UML dla każdego*. Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2003.

[70] Shafer G.: *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1976.

[71] Shwe M., Cooper G.: *An empirical analysis of likelihood — weighting simulation on a large, multiply connected medical belief network*. Computers and Biomedical Research, 24:453–475, 1991.

[72] Shwe M., Middleton B., Hackerman D., Henrion M., Horvitz E., Lehmann H., Cooper G.: *Probabilistic diagnosis using a reformulation of the INTERNIST-1 /QMR knowledge base I. The probabilistic model and inference algorithms*. Methods of Information in Medicine, 30:241–255, 1991.

[73] Skupnik D.: *Representation of aspects for diagnostic models. General concept*. Burczyński T., Cholewa W., Moczulski W. (red.), Methods of Artificial Intelligence, AI-METH Series, str. 197–204, Gliwice, 7–9 listopad 2007.

[74] Skupnik D.: *Podejście wieloaspektowe do modelowania w diagnostyce technicznej*. Diagnostyka, 2(46):117–120, 2008.

[75] Skupnik D.: *Metoda konstruowania wieloaspektowego modelu diagnostycznego*. Gardulski J. (red.), XXXVI Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Wisła, 2–7 marca 2009.

[76] Śmiałek M.: *Zrozumieć UML 2.0. Metody modelowania obiektowego*. Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2005.

[77] Swets J. A., Dawes R. M., Monahan J.: *Jak podejmować trafne decyzje*. Świat Nauki, (12):68–73, grudzeń 2000.

[78] Swets J. A., Dawes R. M., Monahan J.: *Psychological science can improve diagnostic decisions*. Psychological Science in the Public Interest (dodatek do Psychological Science, 1(1):1–26, May 2000.

[79] Toussaint G. T.: *Bibliography on Estimation of Misclassification*. IEEE Transactions on Information Theory, 20(4):472–479, 1974.

[80] Warmer J., Kleppe A.: *OCL: precyzyjne modelowanie w UML*. WNT, Warszawa, 2003.

[81] Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Uniefied_Modeling_Language, luty 2009.

[82] Wojtusik J.: *Wielomodele diagnostyczne maszyn wirnikowych*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, 2005.

[83] Wojtusik J.: *Wielomodele diagnostyczne maszyn wirnikowych*. Zeszyt Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn nr 128. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.

[84] Wrycza S., Marcinkowski B., Wyrzykowski K.: *Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych*. Wydawnictwo HELION, Gliwice, 2005.

[85] Wyleżoł M.: *Metody pozyskiwania procedur i relacji diagnostycznych od specjalistów w dziedzinie eksploatacji maszyn*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, 2000.

[86] Yager R.: *On the Dempster-Shafer Framework and New Combination Rules*. Information Sciences, 41:93–137, 1987.

[87] Yager R.: *Quasi-Associative Operations in the Combination of Evidence*. Kybernetes, 16:37–41, 1987.

[88] Yen J., Bui T.: *The negotiable alternatives identifier for group negotiation support*. Applied Mathematics and Computation, 104:259–276, 1999.

[89] Zadeh L.: *Review of Books: A Mathematical Theory of Evidence*. The AI Magazine, 5(3):81–83, 1984.

[90] Zadeh L.: *A Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination*. The AI Magazine, 7:85–90, 1986.

[91] Zhang L.: *Representation, independence, and combination of evidence in the Dempster-Shafer theory*. Yager R., Kacprzyk J., Fedrizzi M. (red.). *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence*, str. 51–69. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.

[92] Praca zbiorowa: *Słownik wyrazów obcych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1991.

# Streszczenie

W rozprawie przedstawiono opracowaną przez autora metodę konstruowania wieloaspektowego modelu diagnostycznego, który jest szczególną postacią wielomodelu. W literaturze diagnostycznej wielomodelem nazywany jest model składający się z co najmniej dwóch, stosowanych łącznie, modeli składowych, które mogą być identyfikowane oddzielnie, najczęściej z zastosowaniem różnych metod i kryteriów.

Rozpoznawanie stanu technicznego danego obiektu za pomocą wielomodelu realizowane jest na podstawie informacji pochodzących ze wszystkich aktywnych modeli składowych. Wyniki wielu opublikowanych badań pokazują, że w odniesieniu do złożonych obiektów technicznych takie podejście zapewnia lepsze rezultaty w porównaniu z podejściem polegającym na zastosowaniu pojedynczego (globalnego) modelu diagnostycznego.

W opisywanej metodzie modele składowe tworzone są na podstawie wiedzy o budowie i działaniu obiektu pozyskanej po przyjęciu określonych punktów widzenia, tzn. z uwzględnieniem różnych aspektów. Pokazano, że jeżeli dany obiekt techniczny działa wg ustalonych procedur w zmiennych warunkach (np. obrabiarka CNC, robot przemysłowy, pralka automatyczna itp.), to do wieloaspektowego opisu działania takiego obiektu odpowiednim narzędziem jest język UML (ang. *Unified Modelling Language*).

UML to język formalny z dziedziny informatycznej umożliwiający określenie z różnych punktów widzenia (aspektów) struktury i dynamiki działania modeli obiektowych, które w sensie programowania zorientowanego obiektowo reprezentują realne obiekty z wybranego fragmentu otoczenia. W szczególnym wypadku rozpatrywany może być obiekt techniczny. W języku UML aspekty reprezentowane są w postaci diagramów. W wyniku analizy rozpatrywanych w tym języku aspektów wyodrębniono i przedstawiono te punkty widzenia, które w przekonaniu autora nadają się do zastosowań diagnostycznych, tzn. umożliwiają dokładne, jednoznaczne i wyczerpujące opisanie działania danego obiektu technicznego.

Zbiór diagramów zapisanych w języku UML stanowi podstawę do konstruowania modeli diagnostycznych (składowych), podobnie jak rysunek techniczny stanowi podstawę do wytworzenia jakiegoś obiektu. Pokazano w jaki sposób można z zastosowaniem języka UML dokonać podziału zbioru cech sygnałów diagnostycznych na odpowiednie podzbiory, które dotyczą zidentyfikowanych aspektów.

Przedstawiono sposób tworzenia modeli składowych, rozumianych jako modele relacji pomiędzy podzbiorami wartości cech sygnałów diagnostycznych i odpowiednimi podzbiorami rozpatrywanych stanów technicznych obiektu. Zaproponowano ogólną postać wieloaspektowego modelu diagnostycznego oraz przedstawiono przykład jego zastosowania. Jako obiekt badań wybrano stanowisko *FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C*, umożliwiające diagnostykę procesów ciągłych i stanowiące fizyczną miniaturyzację instalacji przemysłowej, stosowanej np. w przemyśle chemicznym, spożywczym itp.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, model diagnostyczny, wielomodel, model wieloaspektowy, UML

**Dziedziny:** budowa i eksploatacja maszyn, diagnostyka techniczna

# Abstract

The PhD thesis presents a method, worked out by the author, which is intended for designing a special kind of a multimodel, i.e. a multiaspect diagnostic model. In diagnostic literature a multimodel is described as a model that consists of at least two submodels which are applied together but they can be identified separately most often by means of the different methods and criteria.

State estimation of a technical object by means of a multimodel is executed on the basis of information derived from the all active submodels. Many published research results show that with respect to a complex technical objects, use of a multimodel usually gives better effects than an approach consisting in use of a single (global) diagnostic model.

In the described method submodels are created on the basis of knowledge about a construction and an operation of a technical object from different points of view, i.e. taking various aspects under consideration. It is shown that if a technical object works according to the established procedures in changeable conditions (e.g. a computer numerical controlled (CNC) machine tool, an industrial robot, a washing machine etc.) then Unified Modelling Language (UML) is a good tool to the multiaspect description of the considered technical object.

UML is a standardized general-purpose modelling language in the field of software engineering that makes possible defining a structure and dynamics of the object models, which represent real objects. Thus in the particular case a technical object may be also examined. In UML aspects are represented in the form of diagrams. In the result of the analysis of the all viewpoints considered in UML, the aspects which, in the author's opinion, are suitable to the use in technical diagnostics, i.e. make possible a precise, unambiguous and exhaustive description of a technical object operation, are specified.

The submodels are constructed on the basis of the UML diagrams just as a mechanical drawing is used as a base in the production of a physical object. It is shown how to divide a set of diagnostic signal features into subsets, which concern all identified aspects, by means of UML.

The way of designing submodels treated as relation models between subsets of values of diagnostic signals features and right subsets of the considered technical states was presented. The general form of a multiaspect diagnostic model is proposed and an application example of this kind of model is presented. As a research object *FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C* was chosen. This object exemplifies a physical miniaturization of an industrial installation used, e.g. in a chemical industry or a food industry and makes possible diagnostics of the continuous processes.

**Keywords:** technical diagnostics, diagnostic model, multimodel, multiaspect model, UML
**Domains:** design and maintenance of machinery, technical diagnostics