



Monitorowanie i Diagnostyka w Systemach Sterowania

Metody i narzędzia diagnostyki procesów

**Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki
dr hab. inż. Michał Grochowski**

Monitorowanie i Diagnostyka w Systemach Sterowania

na studiach II stopnia specjalności: Systemy Sterowania i Podejmowania Decyzji

Metody i narzędzia diagnostyki procesów

dr hab. inż. Michał Grochowski

kiss.pg.mg@gmail.com

michal.grochowski@pg.edu.pl

tel: 58 347 23 57

Wykorzystane w prezentacji materiały:

- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S.N. and Yin, K., *A review of process fault detection and diagnosis: Part I, Part II, Part I*. Computers and Chemical Engineering 27, 2003.
- Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems. Marios M. Polycarpou, CentraleSupélec – Gif Campus, France, 2015.
- Korbicz, J., Kościelny, J, Kowalczyk, Z., Cholewa, W. *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2002;
- Ardakanian i Martin-Bordes, *Proceedings of the 2nd Regional Workshop on Water Loss Reduction in Water & Sanitation Utilities 2009*;
- Blanke M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag, 2006;
- Krotowski, A. Systemy wizyjne do optycznej inspekcji procesów przemysłowych wykorzystujące zaawansowane metody rozpoznawania obrazu ze szczególnym z uwzględnieniem metod inteligentnych. Praca magisterska, Politechnika Gdańska 2008. Promotor: dr inż. M. Grochowski;
- Nowicki i Grochowski. *Kernel PCA In Application to Leakage Detection In Drinking Water Distribution System*. Lecture Notes in Computer Science. ICCCI 2011, Part I, LNCS 6922, pp.497-506. September 2011, 21-23 Gdynia, Poland.
- Sikora, M., Grochowski, M. Wykorzystanie sieci neuronowych do diagnostyki poprawności wykonania płytek drukowanych. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2011

Wprowadzenie

Ważne technologiczne rewolucje:

- komputery osobiste (lata 80te);
- internet (lata 90te);
- czujniki (od 2000r).

źródło: Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems.
Marios M. Polycarpou, CentraleSupélec – Gif Campus, France, 2015.

Wprowadzenie

„Tradycyjne” czujniki/pomiary „elektroniczne”:

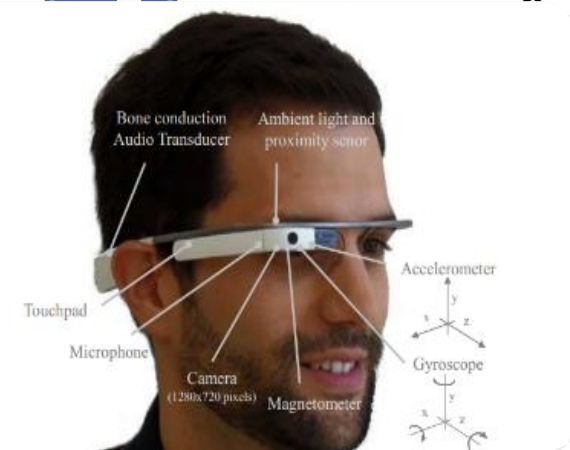
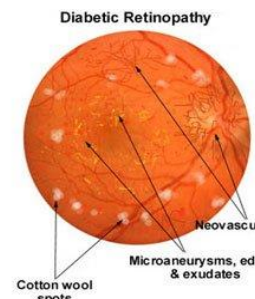
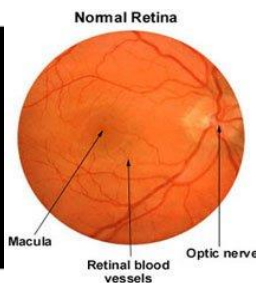
- natężenie prądu, napięcie, strumień, pole magnetyczne;
- położenie, kąt, przemieszczenie, odległość, prędkość, przyspieszenie;
- akustyczne, dźwiękowe, wibracji;
- przepływ, ciśnienie, poziom, gęstość cieczy, turbulencje;
- naprężenie, chropowatość;
- wilgotność, wilgoć, temperatura, prędkość i kierunek wiatru;
- chemiczne – laboratoryjne i „automatyczne”;
- stężenie rozpuszczonego tlenu, stężenie azotanów, fosforanów;
- mętność, zawiesina, chemiczne zapotrzebowanie tlenu;
- cząstki elementarne, radiacja;
- i wiele, wiele innych

na podstawie: Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems.
Marios M. Polycarpou, CentraleSupélec – Gif Campus, France, 2015.

Wprowadzenie

„Nie-Tradycyjne” czujniki/pomiary:

- kamery, CCTV;
- satelity;
- drony, pojazdy autonomiczne;
- logowania różnego typu (GSM, internet...);
- hasła, tagi, #tagi w „wyszukiwarkach”;
- media społecznościowe;
- e-dane, transakcyjne, bankowe ...
- telefony komórkowe;
- elektroniczne oczy, nosy ...
- i coraz to nowe ...



Wprowadzenie

Ważne technologiczne rewolucje:

- komputery osobiste (lata 80te);
- internet (lata 90te);
- czujniki (od 2000r);
- **Big data** (od ok. 2015)

Four V's:

- Volume (scale of data),
- Velocity (streaming data),
- Variety (different forms of data),
- Veracity (uncertainty of data).

W szczególności, technologie uczenia maszynowego, posiadają cechy aby być skutecznym narzędziem do efektywnego przetwarzania tego rodzaju danych.

źródło: Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems.
Marios M. Polycarpou, CentraleSupélec – Gif Campus, France, 2015.

Przykłady awarii/anomalii:

... w systemach wodociągowych



**Stosunkowo prosta
diagnostyka 😊**

Przykłady awarii/anomalii:

... w systemach wodociągowych



Przykład pęknięcia będącego
źródłem wycieku o natężeniu
 $Q=100\text{m}^3/\text{h}$

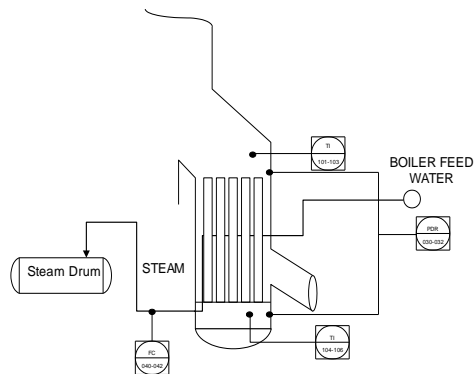
źródło: Ardakanian i Martin-Bordes, 2009



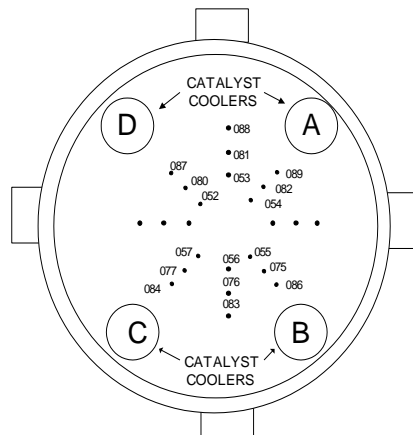
Przykłady awarii/anomalii:

... w systemach rafineryjnych

VARIABLES/SENSORS INCLUDED IN PCA
MODEL CATALYST COOLER MONITORING



REGENERATOR CROSS SECTION
TEMPERATURE INDICATORS INCLUDED IN PCA
MODEL (CATALYST COOLER)

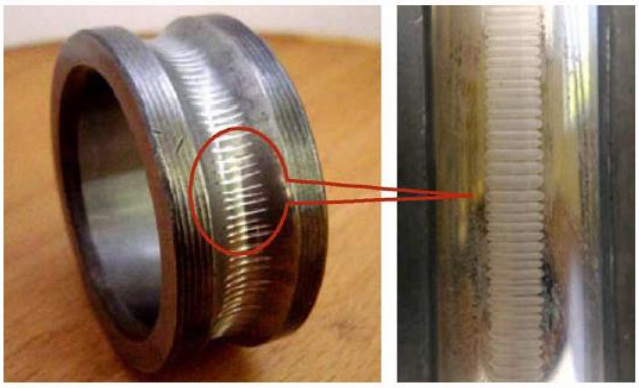


źródło:

S. Joe Qin. Process Chemometric Techniques and Applications. Department of Chemical Engineering
The University of Texas at Austin

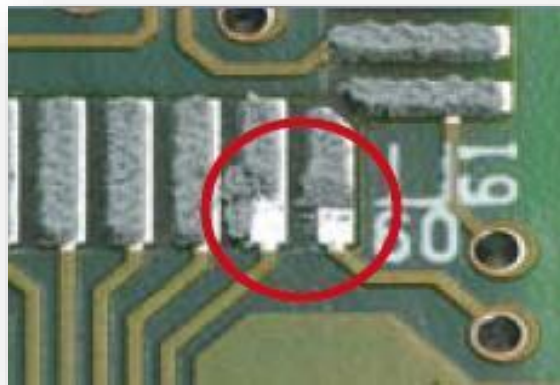
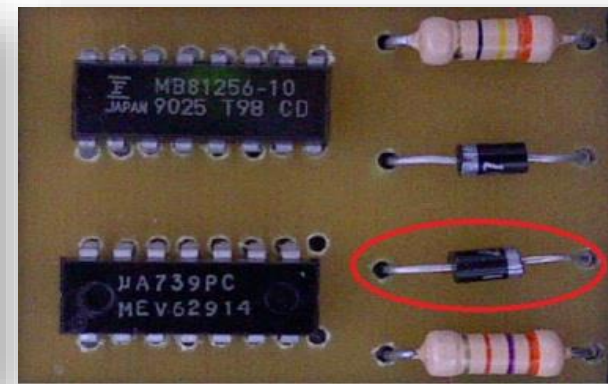
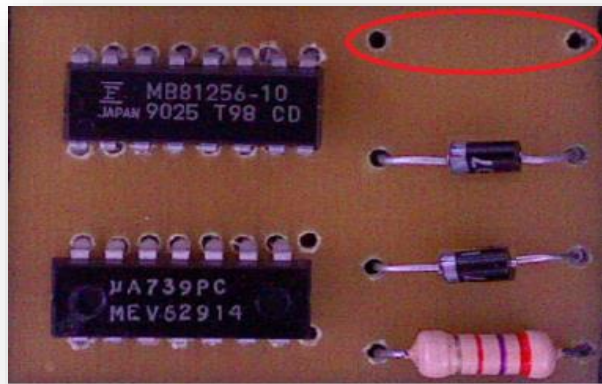
Przykłady awarii/anomalii:

... łożysk



Przykłady awarii/anomalii:

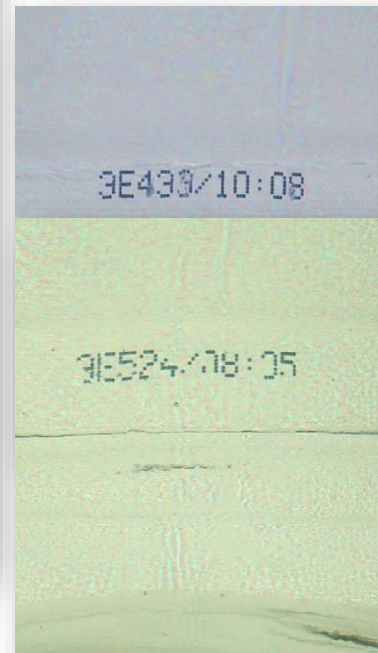
... układów elektronicznych



źródło: Sikora i Grochowski 2011

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



źródło: Krotowski, A. 2008

Przykłady awarii/anomalii:

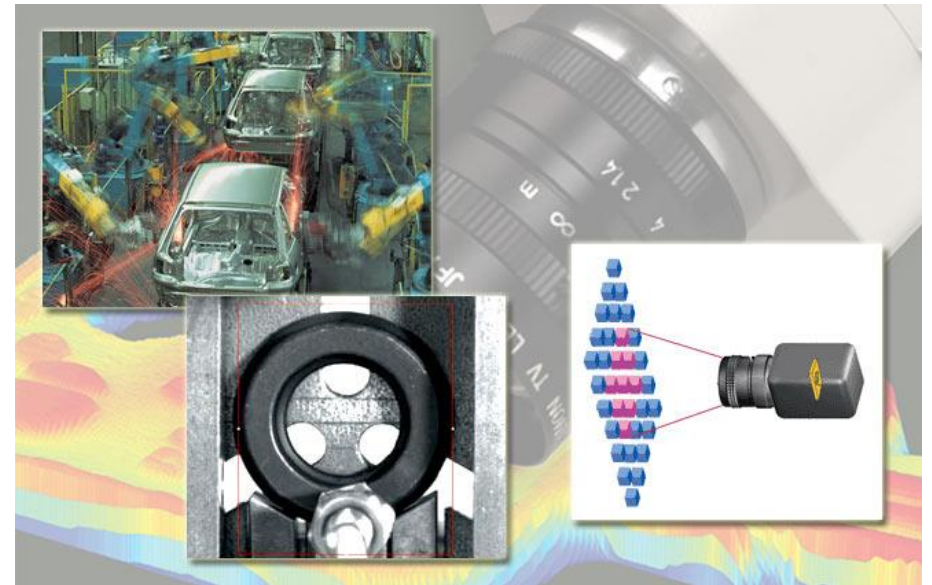
... inne przykłady



źródło: Krotowski, A. 2008

Przykłady awarii/anomalii:

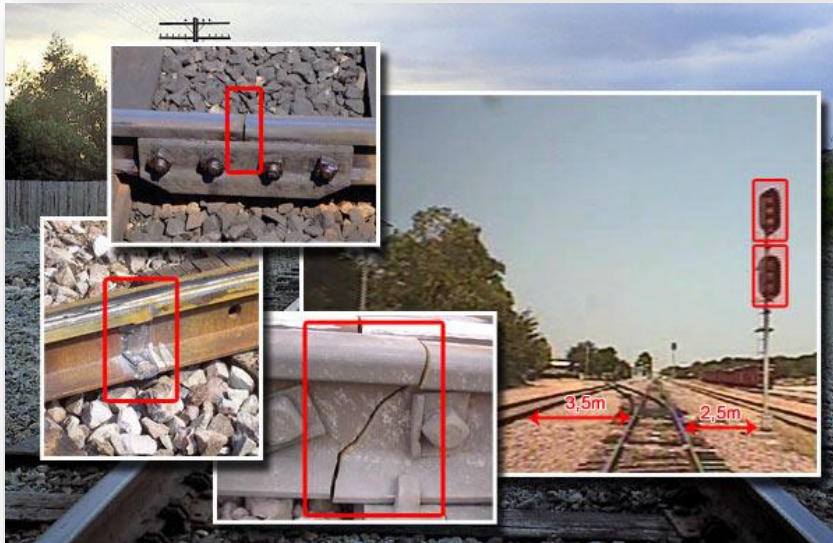
... inne przykłady



<http://videosoftwaredevelopment.com/ms/001/index.html>

Przykłady awarii/anomalii:

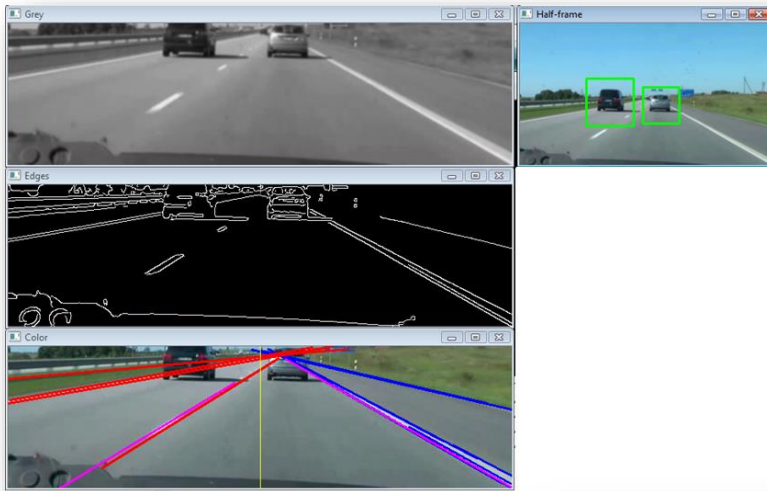
... inne przykłady



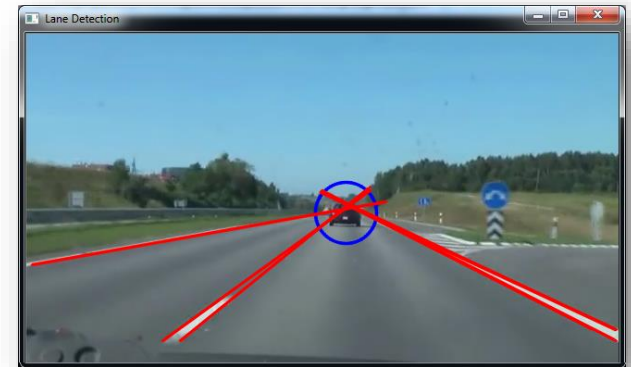
<http://videosoftwaredevelopment.com/ms/001/index.html>

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



<http://code.google.com/p/opencv-lane-vehicle-track>



www.prodigyproductionsllc.com/articles/programming/lane-detection-with-opencv-and-c/



sequoia.ict.pwr.wroc.pl/~witold/aiarr/2009_projekty/semafory

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



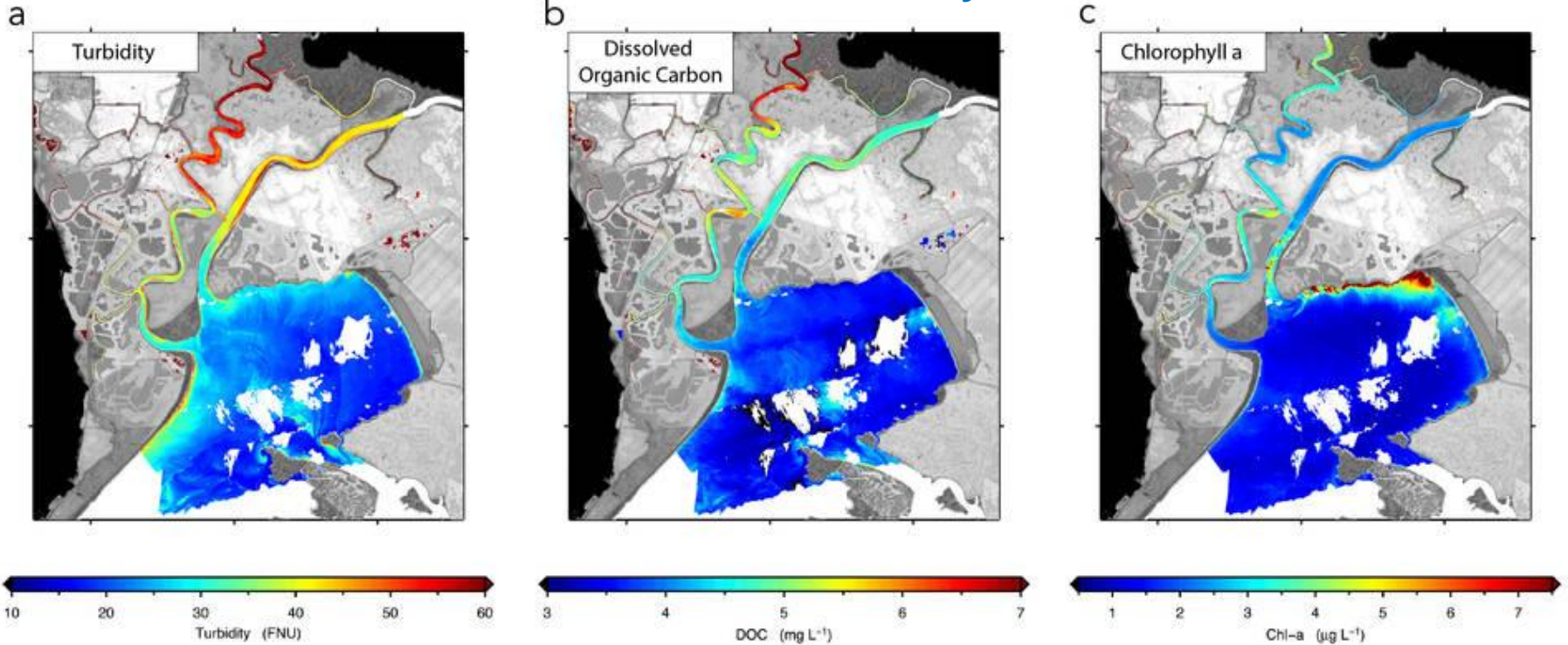
<http://videosoftwaredevelopment.com/ms/001/index.html>

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



NASA Airborne Water Quality Sensor



Turbidity – Mętność

Dissolved Organic Carbon (DOC) - Rozpuszczony węgiel organiczny

Chlorophyll a (Chl-a) - Chlorofil

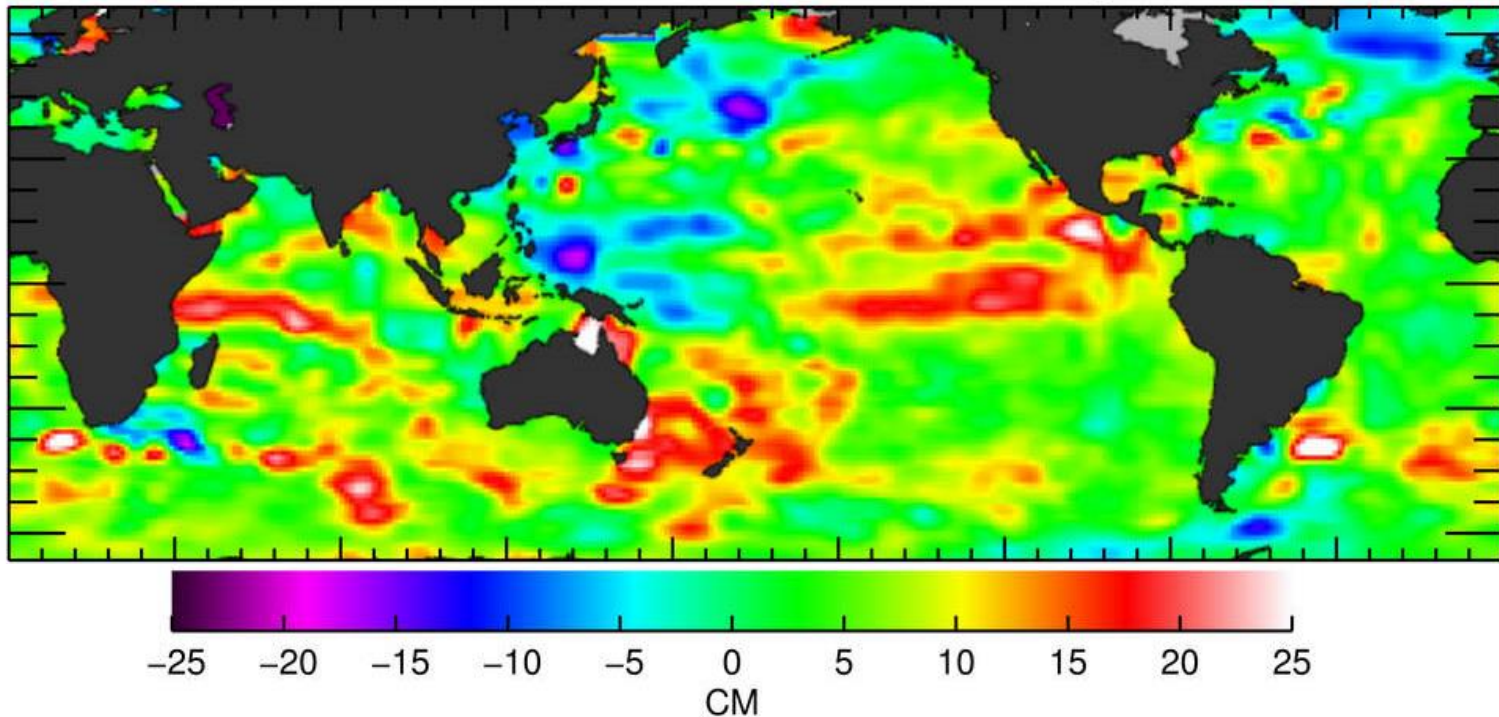
<http://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-demonstrates-airborne-water-quality-sensor>

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



Jason-3 Begins Mapping Oceans, Sees Ongoing El Niño



Sea level anomalies from February 12-22, 2016. The U.S./European Jason-3 satellite has produced its first map of sea surface height. Higher-than-normal sea levels are red; lower-than-normal sea levels are blue. **El Niño is visible as the red blob in the eastern equatorial Pacific.**

<http://www.nasa.gov/feature/jpl/jason-3-begins-mapping-oceans-sees-ongoing-el-ni-o>

Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



Jump over the gate



Jump over the gate



Loitering and wrong direction



A person drops her belongings



Wrong direction in a crowded scene



Wrong direction at the entrance gate



Irregular interactions: two persons are at the same gate.

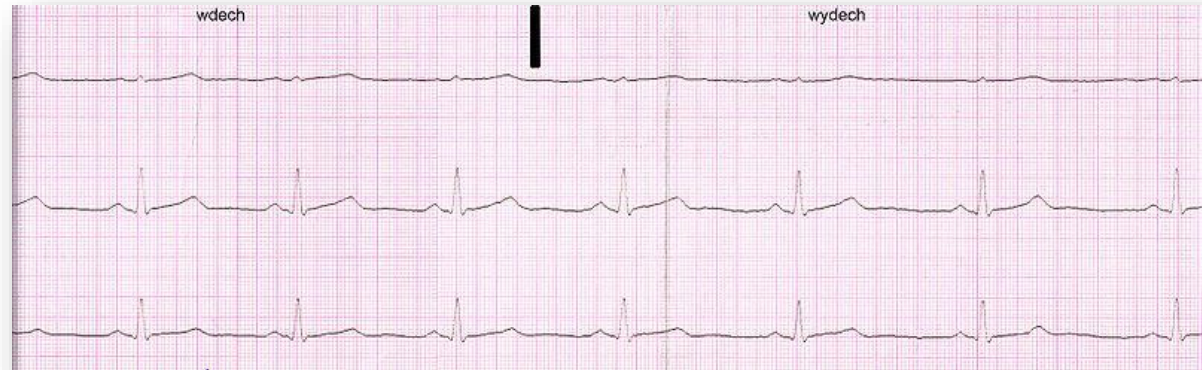


An employee is cleaning up the wall

źródło: <http://vision.cs.utexas.edu/projects/abnormalactivity/images/image006.jpg>

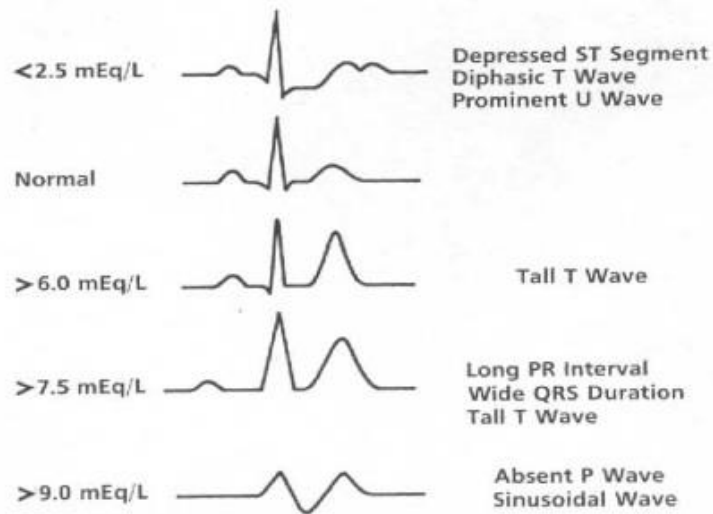
Przykłady awarii/anomalii:

... inne przykłady



źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:EKG.jpg>

SERUM K

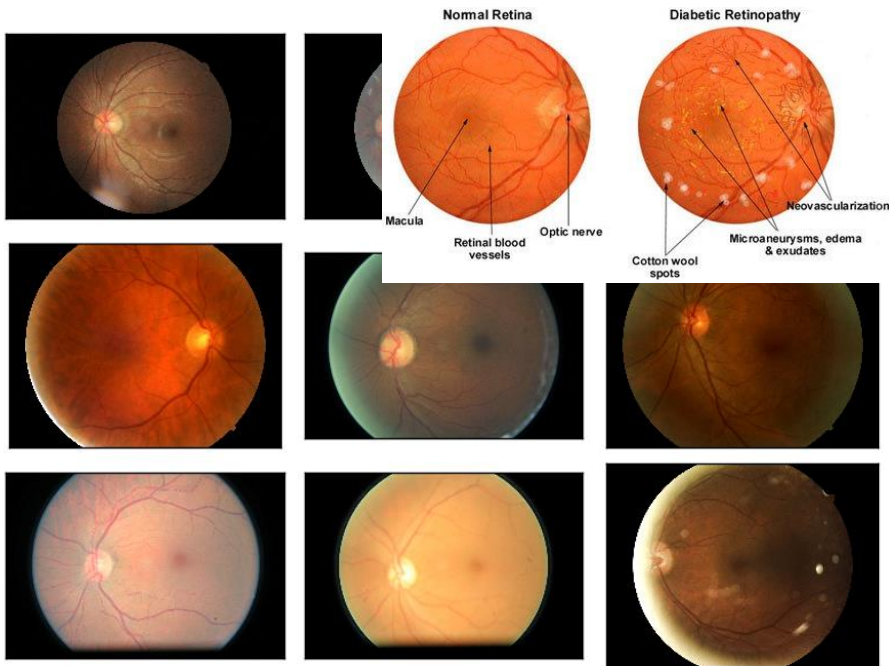


źródło: <http://cdn.lifeinthefastlane.com/wp-content/uploads/2012/01/potassium-spectrum-of-ecg-changes.jpg>

Przykłady awarii/anomalii:

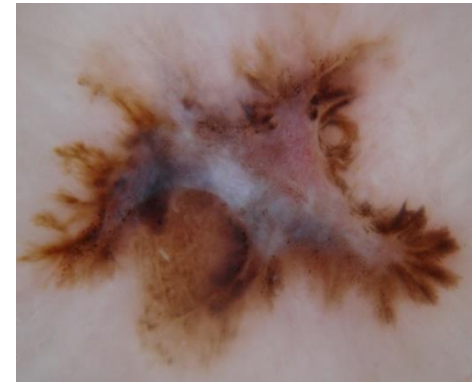
... inne przykłady

Retinopatia cukrzycowa na podstawie analizy gałki ocznej

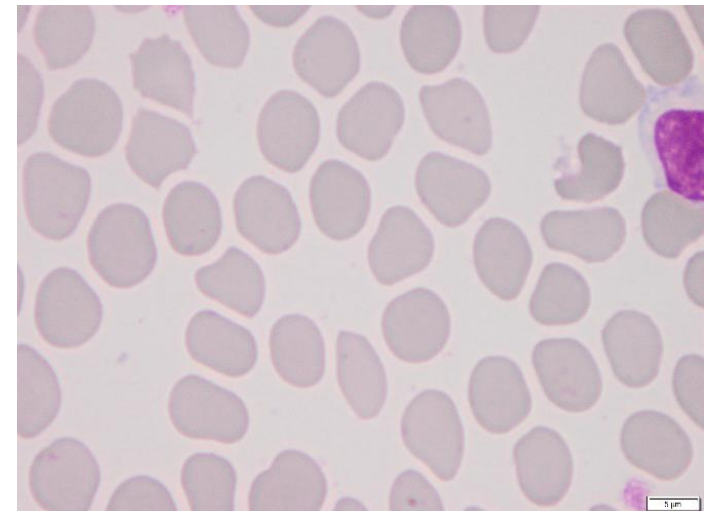


<http://blog.kaggle.com/2015/08/14/diabetic-retinopathy-winners-interview-4th-place-julian-daniel/>

Diagnostyka czerniaków



Analiza płytek krwi



Motywacja dla monitorowania i diagnostyki uszkodzeń:

Aktualne tendencje technologiczne idą w kierunku:

- systemów coraz bardziej złożonych i coraz większej skali;
- coraz bardziej ze sobą powiązanych;
- coraz bardziej zautomatyzowanych;
- coraz bardziej autonomicznych.

W przypadku przekłamanych, brakujących, niespójnych danych, może to prowadzić do:

- podejmowania błędnych decyzji prowadzących często do poważnych awarii;
- propagacji błędów i uszkodzeń z jednego systemu na kolejne;
- błędnego działania systemów automatyki i wspomagania decyzji;
- ... braku zaufania dla systemów automatycznych, autonomicznych.

na podstawie: Fault Detection and Isolation in Large-Scale Cyber-Physical Systems.
Marios M. Polycarpou, CentraleSupélec – Gif Campus, France, 2015.

Przyczyny i skutki stanów awaryjnych/uszkodzeń/anomalii systemów:

Przyczyny

Technologiczna
złożoność systemu

Sprzętowa
złożoność systemu

Informatyczna
złożoność systemu

Błędy operatorów

Przeciążenie informacyjne
operatorów/systemu

„Oszczędności”

Niewidoczne „gołym okiem”
skutki uszkodzeń

Maskowanie uszkodzeń
przez system pomiarowy



Skutki

Straty ekonomiczne

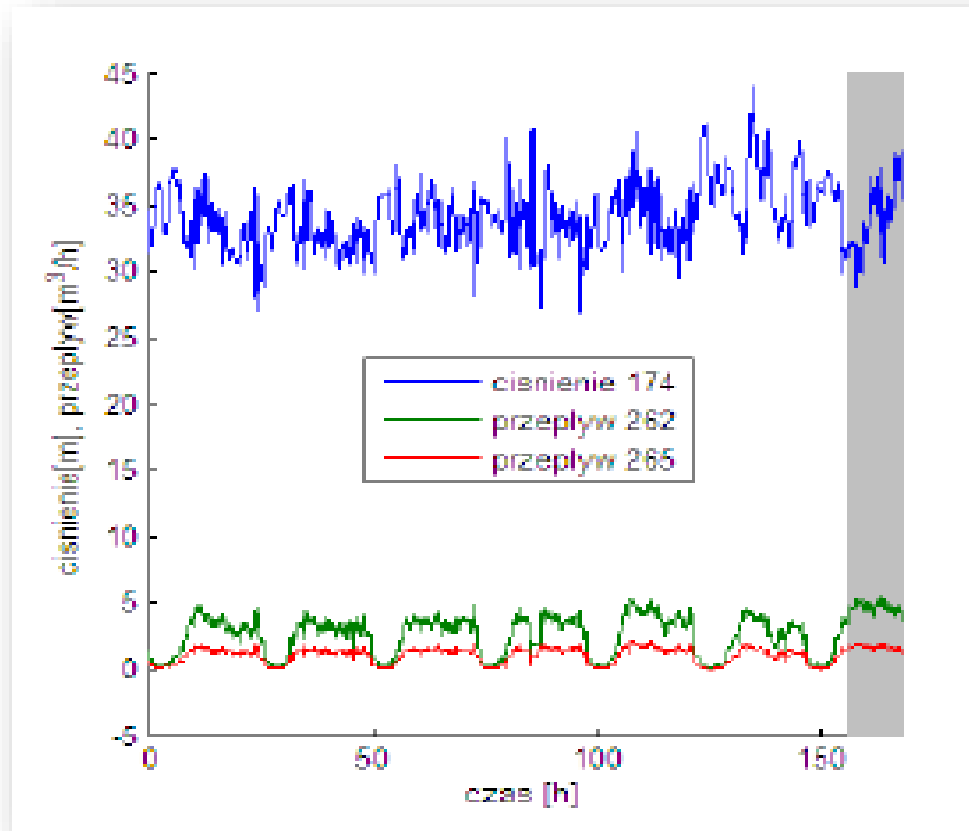
Straty wizerunkowe

Skażenie środowiska

Uszczerbki na zdrowiu;
zagrożenie życia

Utrata zaufania dla
systemów
„zautomatyzowanych”

Przykłady awarii/anomalii – pęknięcie rury w systemie wodociągowym:



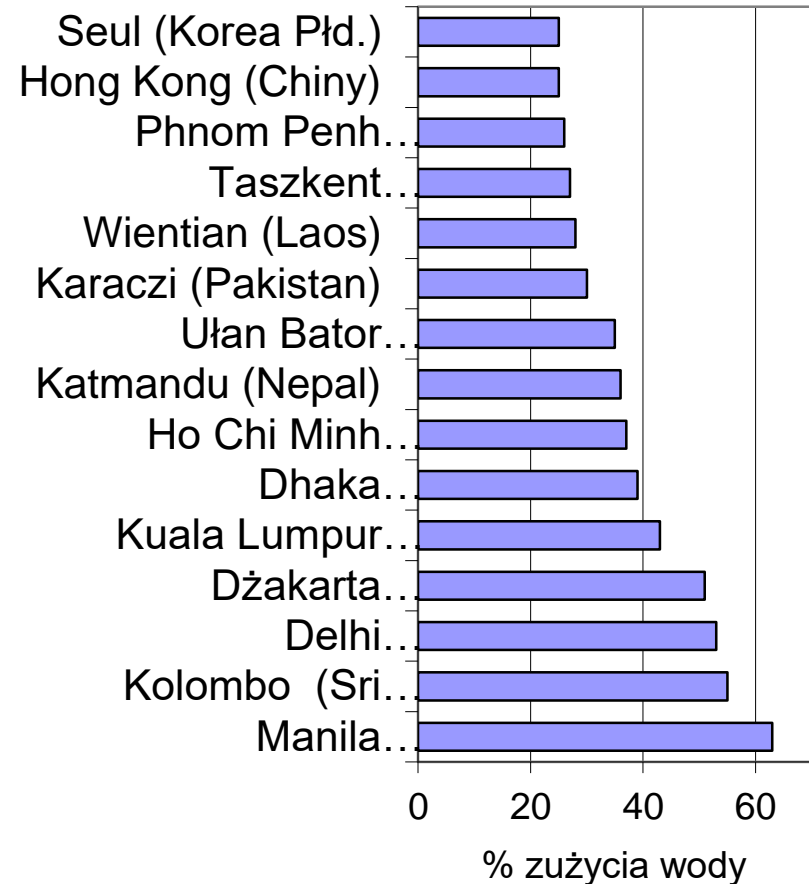
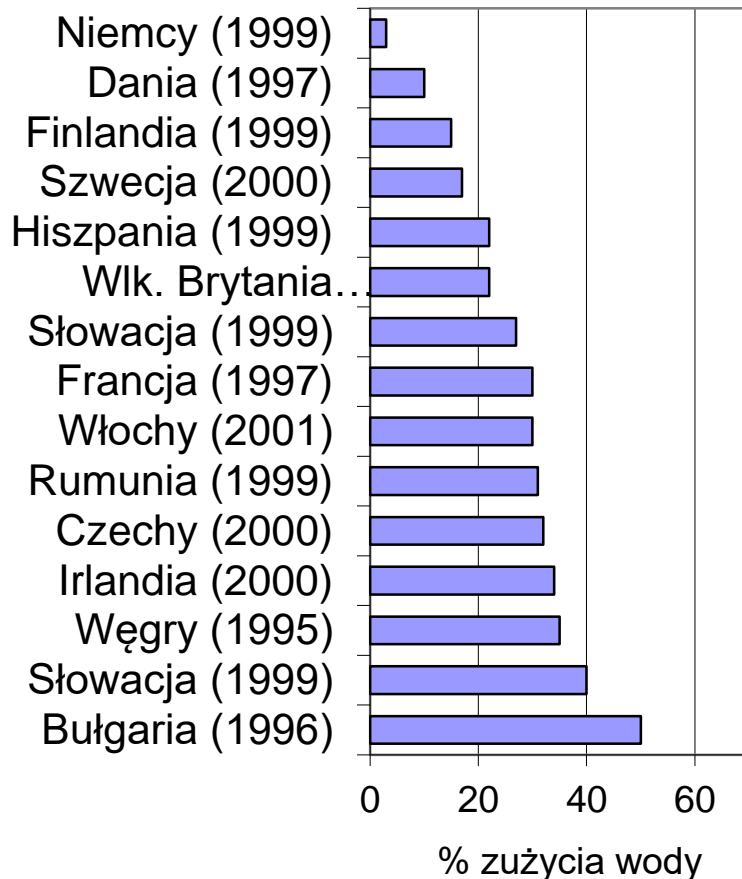
Uszkodzenia
(lub ich symptomy)
bardzo często
są niewidoczne
„nieuzbrojonym okiem”

Przebieg ciśnienia w węźle pomiarowym oraz doptywających przepływów,
przed i w trakcie wycieku o wielkości ok. 1m³/h (1000 l/h).

Na szaro zaznaczono okres trwania wycieku

źródło: Nowicki, 2010

Skutki uszkodzeń - straty wody w sieciach wodociągowych:



źródło: Nowicki, 2010

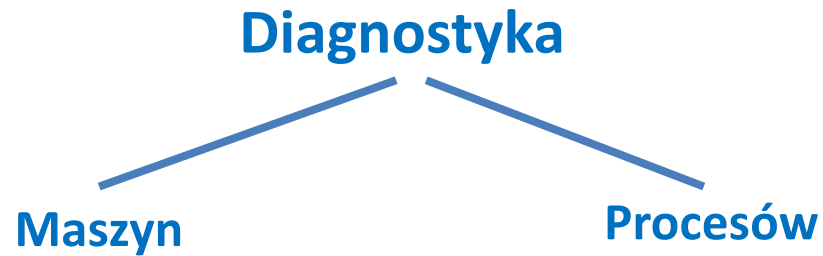
Co będziemy rozumieli przez diagnozowanie ...

Diagnozowanie (rozpoznawanie stanów) traktowane będzie jako proces wykrywania i rozróżniania uszkodzeń obiektu w wyniku zbierania, przetwarzania, analizy i oceny sygnałów diagnostycznych.

W zależności od rodzaju obiektu i posiadanej wiedzy na jego temat, wynikiem diagnozowania może być szczegółowa identyfikacja uszkodzenia lub jedynie określenie klasy stanu.

Na podstawie: *Korbicz i inni, 2002*

Podział obszarów diagnostyki:



Podział obszarów diagnostyki:

Diagnostyka maszyn

Zajmuje się oceną stanu urządzeń mechanicznych poprzez badania bezpośrednie ich własności i badania pośrednie procesów towarzyszących funkcjonowaniu tych urządzeń, tzw. procesów resztkowych.

Procesy resztkowe mogą mieć charakter mechaniczny, elektryczny, termiczny itp.

Szczególną rolę odgrywają procesy wibroakustyczne (drganie, hałas) – one najczęściej są wykorzystywane do pośredniej oceny stanu obiektów.

Na podstawie: *Korbicz i inni, 2002*

Podział obszarów diagnostyki:

Diagnostyka procesów (przemysłowych)

Zajmuje się rozpoznawaniem zmian stanów tych procesów, gdzie procesy przemysłowe rozumiane są jako ciąg celowych działań realizowanych w ustalonym czasie przez określony zbiór maszyn i urządzeń przy określonych dostępnych zasobach.

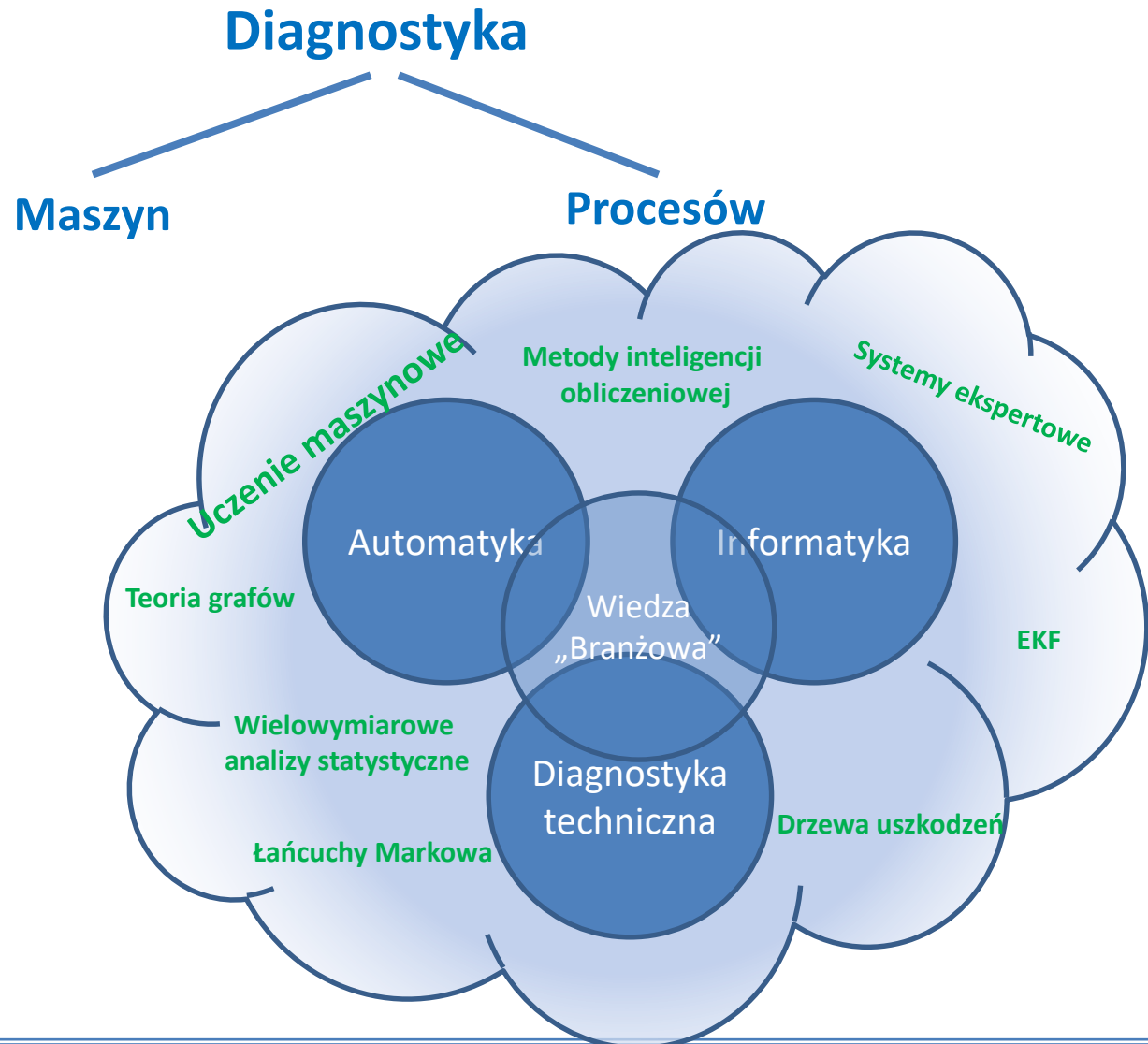
Jako przyczyny zmian stanów rozpatrywane są uszkodzenia i inne zdarzenia destrukcyjne.

Zadaniem diagnostyki procesów przemysłowych jest wczesne wykrywanie i dokładne rozpoznanie (rozdzielanie) powstających uszkodzeń.

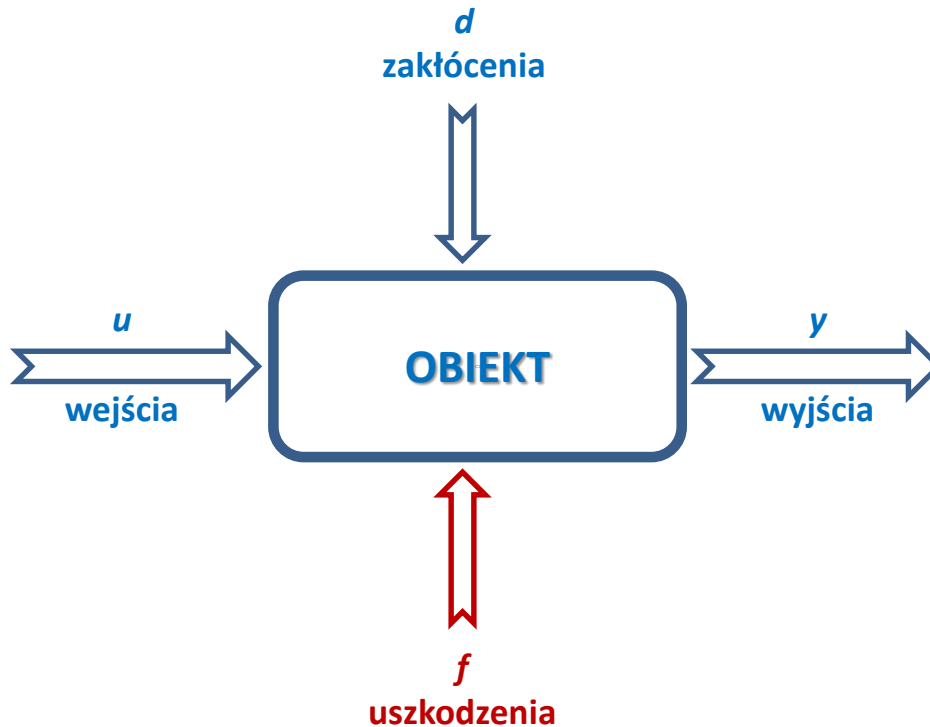
Zdarzenia destrukcyjne, takie jak zużycie traktowane są jako pewien rodzaj uszkodzenia, które powinno być wykryte i rozpoznane po przekroczeniu pewnej wartości.

Na podstawie: *Korbicz i inni, 2002*

Podział obszarów diagnostyki:



Podstawowe pojęcia:



Schemat obiektu dynamicznego uwzględniającego uszkodzenia

Opis obiektu dynamicznego uwzględniający uszkodzenia

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), d(t), f(t)]$$

$$y(t) = g[x(t), u(t), d(t), f(t)]$$

Podstawowe pojęcia:

Stan obiektu

Stan obiektu/procesu rozumie się jako przynależność do jednego ze zdefiniowanych stanów (np. normalny, zakłóceniewy, awaryjny, ale też: wzmożonych opadów deszczu, oblodzonej nawierzchni, zwiększonego stężenia, obecności osoby/rzeczy nieautoryzowanej...).

Stan obiektu/procesu złożonego jest najczęściej określony poprzez zbiór stanów elementów/podzespołów/procesów składowych danego obiektu.

Zmiana stanu obiektu może nastąpić wskutek wystąpienia jego uszkodzenia, zużycia oraz innych zdarzeń powodujących inne od zakładanego funkcjonowanie obiektu.

Na podstawie: *Korbicz i inni, 2002*

Podstawowe pojęcia:

Uszkodzenie obiektu

Jako uszkodzenie (*fault*) rozumiemy każde zdarzenie powodujące pośrednio bądź bezpośrednio niepożądaną zmianę pracy obiektu/procesu.

Przykłady uszkodzeń (poza typowymi !!):

- wyciek wody w sieci dystrybucji wody pitnej,
- zakłócenie pracy biologicznej oczyszczalni ścieków poprzez dopływ ścieków skażonych metalami ciężkimi,
- pojawienie się pasożytniczych reakcji w procesie np. fermentacji,
- brak/przekłamanie danych pomiarowych,
- niepoprawny skład surowców wejściowych do danego procesu,
- błędne sterowanie kolumną destylacyjną.

Na podstawie: *Korbicz i inni, 2002*

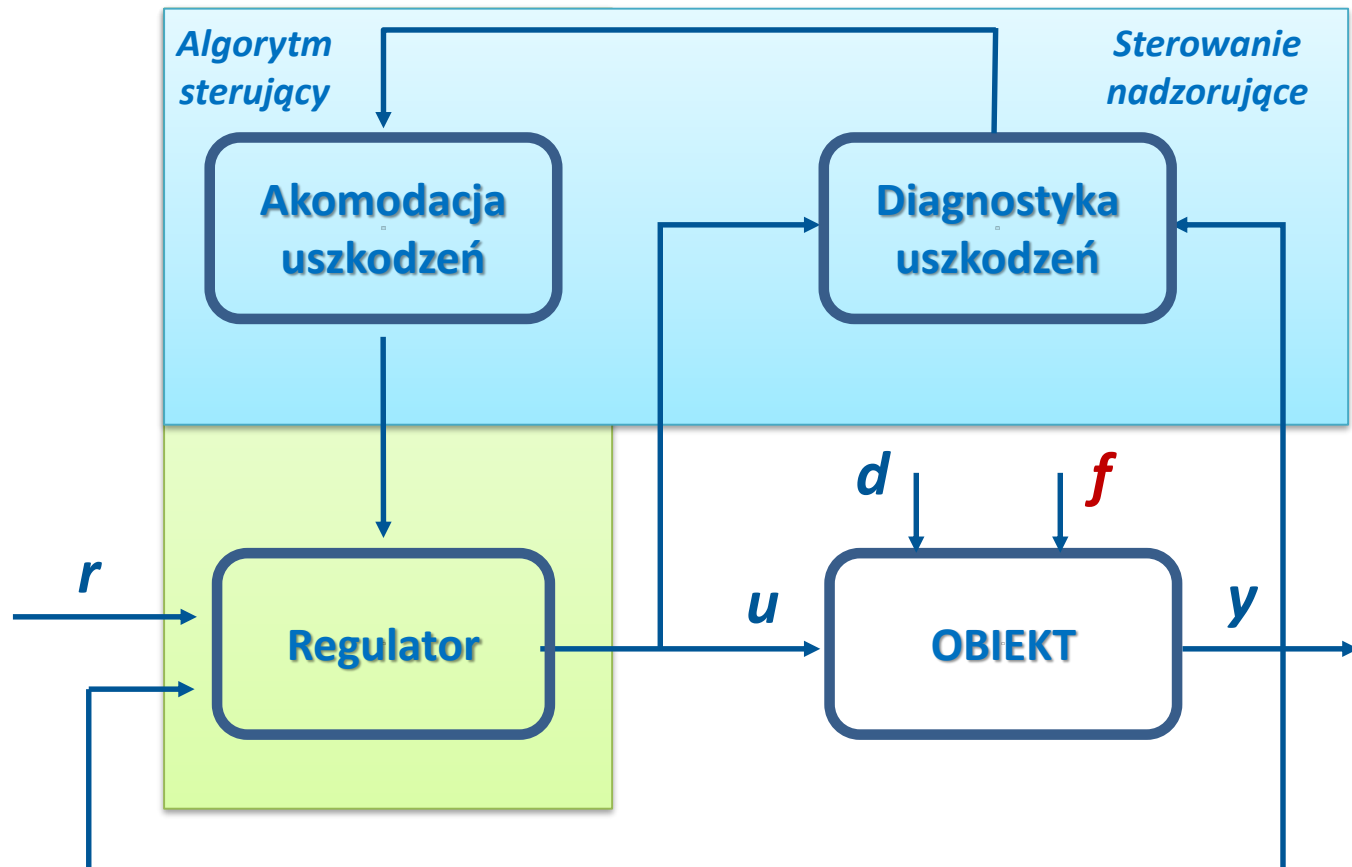
Podstawowe pojęcia:

Rozróżniamy następujące klasy uszkodzeń i/lub anomalii:

- **Zmiany parametrów (skompensowanych/zastępczych) w modelu**
 - Najczęściej w modelowanych procesach/objektach występują zjawiska o wyższym stopniu złożoności niż opisują to modele;
 - Czasami wpływ nie ujętych przez model procesów się ujawnia - często pod wpływem nieanalizowanych wcześniej warunków;
 - To implikuje zmiany np. dynamiki modelu, najczęściej w stanach przejściowych.
- **Zmiany strukturalne**
 - Zmiany parametrów modeli spowodowane np. zużyciem, czy fizycznym zepsuciem (korozja, zarastanie rur, zatkanie zaworu, wyciek wody, uszkodzenie regulatora, błędy w przepływie informacji...).
- **Uszkodzenia/dysfunkcje/awarie czujników i urządzeń wykonawczych**
 - Uszkodzenia czujników lub urządzeń wykonawczych mogą spowodować uszkodzenie obiektu czy też doprowadzenie procesu do niepożądanego stanu (nawet krytycznego).

Na podstawie: *Venkatasubramanian i inni, 2002*

Miejsce diagnostyki procesów w strukturze sterowania



Schemat systemu sterowania tolerującego uszkodzenia

Pożądane cechy systemów diagnostycznych:

Na podstawie: *Venkatasubramanian i inni, 2002*

➤ Szybka detekcja i diagnoza

- System powinien szybko wykrywać i diagnozować uszkodzenie;
- Szybkie wykrywanie uszkodzeń i tolerowanie zmian w procesach podczas ich normalnej pracy są najczęściej w sprzeczności;
- System zaprojektowany żeby wykrywać nagłe zmiany będzie bardzo czuły na zakłócenia o dużej częstotliwości, szумы itp. – dużo fałszywych alarmów;
- Problem analogiczny do znanego z teorii sterowania kompromisu pomiędzy krzepkością a jakością sterowania.

➤ Zdolność do izolacji/wyodrębnienia uszkodzenia (Isolability)

- Zdolność do precyzyjnego wskazania konkretnego uszkodzenia (w warunkach idealnych);
- Niestety warunków idealnych nie ma (zakłócenia, szумы, niepewności w modelach itp...);
- Systemy o wysokiej zdolności do rozróżniania uszkodzeń najczęściej słabo dają sobie radę z niepewnością modeli i odwrotnie;
- Należy znaleźć kompromis.

➤ Krzepkość

- Pożądane jest aby system był odporny na szумы i niepewności;
- Pożądane jest aby jakość działania systemu zmieniała się stopniowo a nie nagle i gwałtownie;
- Konieczne jest odpowiednie „ustawienie progów czułości” systemu.

Pożądane cechy systemów diagnostycznych:

Na podstawie: *Venkatasubramanian i inni, 2002*

- **Zdolność do identyfikacji nowych stanów/zdarzeń/uszkodzeń (Novelty identifiability)**
 - Minimalnym wymaganiem dla systemu diagnostycznego jest stwierdzenie czy obiekt/proces działa w stanie normalnym (bezzakłóceńowym) czy też zakłóceńowym;
 - Jeżeli w zakłóceńowym to czy stan ten jest spowodowany poprzez znane uszkodzenie/zakłócenie czy też jakieś nowe;
 - Najczęściej jest wystarczająca ilość danych do zamodelowania stanu normalnej pracy obiektu, ciężko jest natomiast zamodelować wszelkie możliwe stany uszkodzeniowe;
 - Wymaga się aby system co najmniej wskazał że wykryto nowe uszkodzenie (i się go nauczył) a nie zaklasyfikował go (błędnie) do jakiegoś istniejącego stanu.

- **Estymacja błędu klasyfikacji**
 - Praktycznym wymogiem jest oszacowanie a priori błędu klasyfikacji;
 - Zwiększa to możliwość wyboru podjęcia decyzji operatorowi procesu (plusy i minusy).

- **Adaptowalność**
 - Zdolność systemu do adaptacji do zmieniających się warunków otoczenia;
 - Zdolność systemu do wykorzystywania nowych informacji.

Pożądane cechy systemów diagnostycznych:

Na podstawie: *Venkatasubramanian i inni, 2002*

- **Zdolność systemu do tłumaczenia skutków uszkodzenia (Explanation facility)**
 - Zdolność systemu do wnioskowania na temat możliwych skutków wystąpienia danego uszkodzenia czy zdarzenia;

- **Zdolność do wykrywania wielu uszkodzeń (Multiple fault identifiability)**
 - Jest to cecha niezwykle pożądana ale bardzo trudna do spełnienia w przypadku dużych systemów;
 - W systemach nieliniowych kolejne uszkodzenia mają wpływ synergetyczny na ich skutki co powoduje trudności w ich rozróżnianiu.

- **Stopień złożoności modeli**
 - Czas, nakład pracy a dokładność modeli.
 - Powinien być jak najmniejszy dla konkretnego zastosowania.

- **Wymagania obliczeniowe oraz gromadzenia danych**
 - Zdolność do działania w czasie rzeczywistym (operacje numeryczne);
 - Zdolność do gromadzenia danych.

Proces diagnozowania:

Na podstawie: *Venkatasubramanian i inni, 2002*

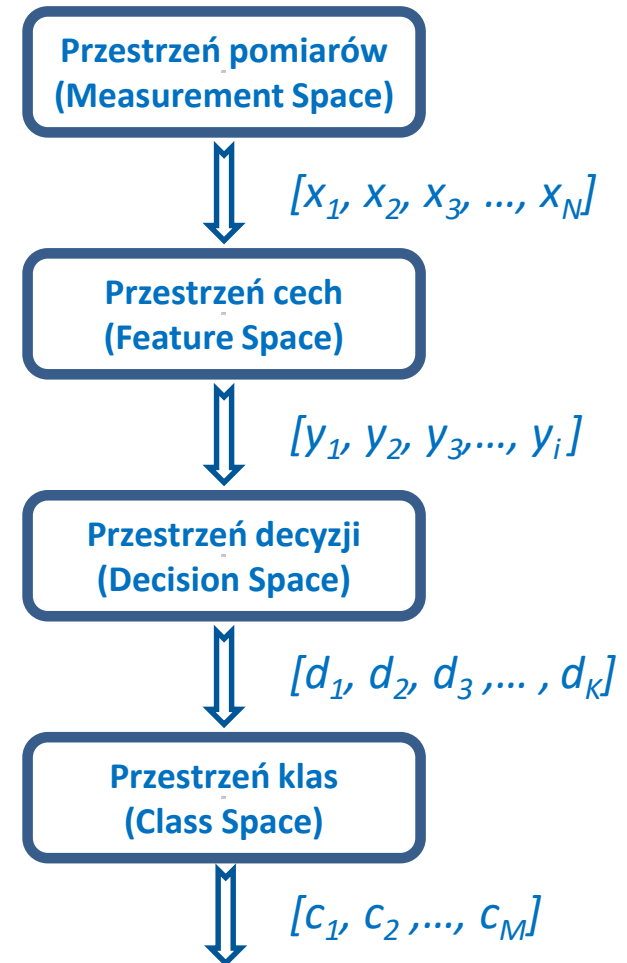
- Bardzo ważnymi składnikami procesu diagnozowania są:
 - wiedza a priori o procesie/obiekcie
 - zastosowana technika uczenia/optymalizacji.

- Generalnie można patrzeć na proces diagnozowania jako na szereg transformacji i odwzorowań dokonywanych na danych pomiarowych

- Wyróżniamy następujące etapy transformacji informacji w systemach diagnostycznych:
 - **Przestrzeń pomiarów** (Measurement Space);
 - **Przestrzeń cech** (Feature Space);
 - **Przestrzeń decyzji** (Decision Space);
 - **Przestrzeń klas** (Class Space).

Proces diagnozowania:

- Przestrzeń pomiarów stanowią pomiary x_1, x_2, \dots, x_N bez jakiegokolwiek wiedzy a priori o nich;
- Przestrzeń cech jest przestrzenią punktów y_1, y_2, \dots, y_i gdzie y_i jest i -tą cechą otrzymaną jako funkcja pomiarów wykorzystująca wiedzę a priori o nich (o rozpatrywanym problemie).
Na tym etapie pomiary są przetwarzane z wykorzystaniem wiedzy procesowej, w ten sposób aby, „wyciągnąć” z niego jak najwięcej użytecznych cech potrzebnych w procesie diagnostyki;
- Przestrzeń decyzji jest przestrzenią punktów d_1, d_2, \dots, d_K , gdzie K oznacza liczbę decyzji otrzymanych na podstawie odpowiednich transformacji przestrzeni cech. Transformacja z przestrzeni cech do przestrzeni decyzji jest najczęściej procesem optymalizacji (wynikiem uczenia);
- Przestrzeń klas jest zbiorem indeksów c_1, c_2, \dots, c_M , gdzie M oznacza numer klasy oznaczającej rodzaj uszkodzenia (łącznie ze stanem bezuszkodzeniowym), do której należą analizowane pomiary.

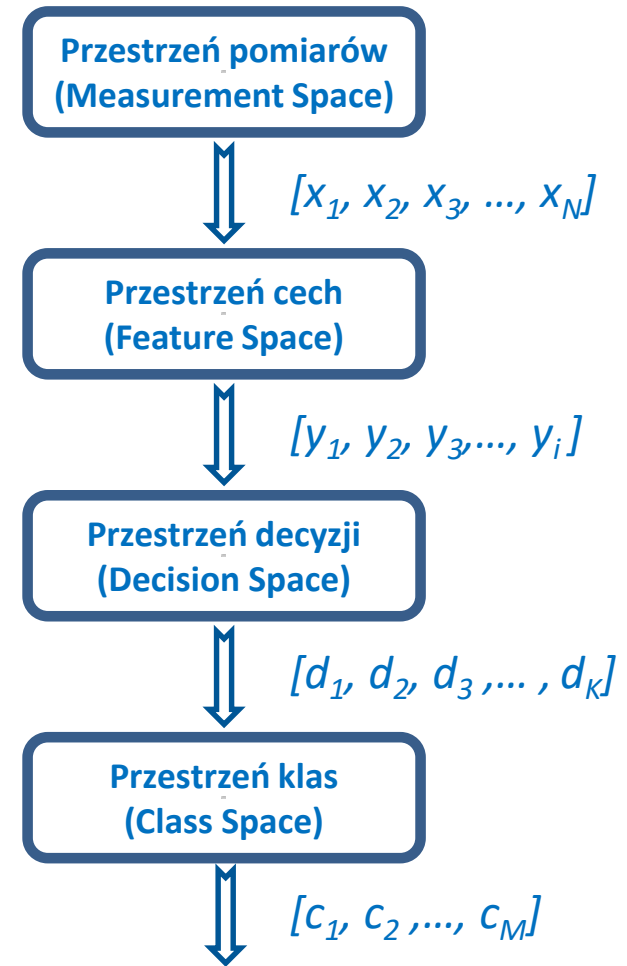


źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Proces diagnozowania:

Tworzenie przestrzeni cech:

- Wybór cech (*Feature selection*);
 - Wybieramy najważniejsze (naszym zdaniem) z dostępnych pomiarów;
- Ekstrakcja cech (*Feature extraction*)
 - Proces polegający na transformacji przestrzeni pomiarów w przestrzeń cech o mniejszym rozmiarze, np. poprzez odnalezienie jakichś relacji pomiędzy zmiennymi.
 - Jeżeli odnajdziemy takie relacje, dalej w procesie diagnostyki będziemy używać jednej zmiennej zamiast np. 2. do reprezentacji danej zależności.



źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

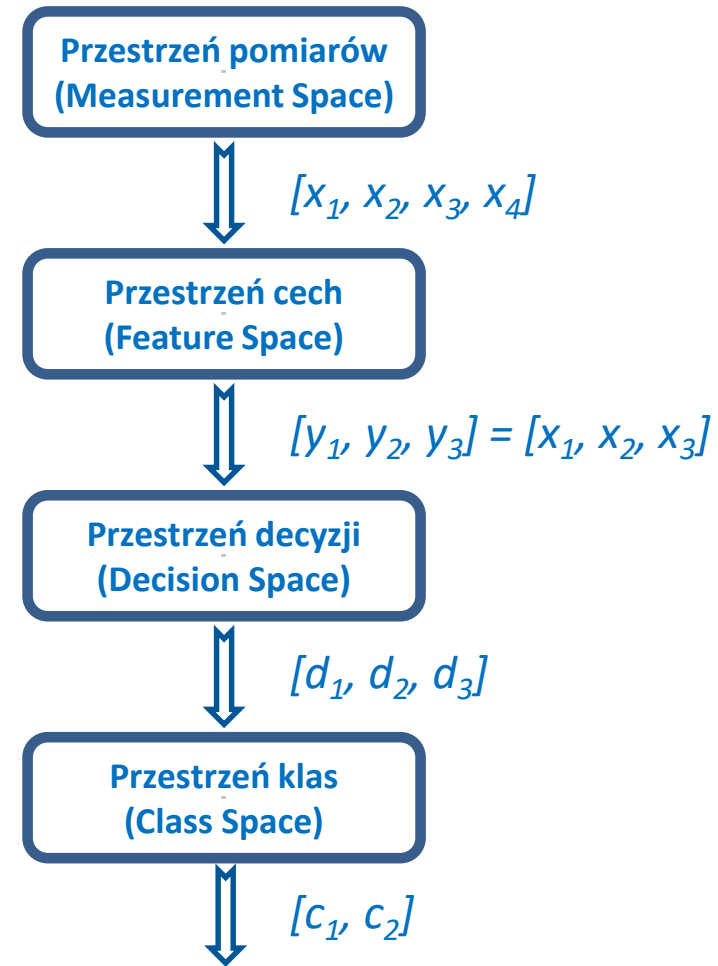
Przykład:

- Dane są:
 - 4 sensory: x_1, x_2, x_3, x_4 ;
 - 2 klasy uszkodzeń: c_1 oraz c_2 , które należy rozróżnić;
- Załóżmy że uszkodzenie 1 jest widoczne przez czujnik 1 i 2 i że uszkodzenie 2 jest widoczne przez czujnik 2 i 3;
- Załóżmy, że $x_{1SS}, x_{2SS}, x_{3SS}, x_{4SS}$; oznaczają wartości czujników w stanach ustalonych;
- Najprostszą transformacją z przestrzeni pomiarów do przestrzeni cech jest pominięcie czujnika x_4 ;
- Transformacja z przestrzeni cech do przestrzeni decyzji $[d_1, d_2, d_3]$ może wyglądać tak:

$$\text{IF } \text{abs}(y_i - x_{iSS}) > T \text{ THEN } d_i = 1, \text{ ELSE } d_i = 0;$$
- Ostatnia transformacja z przestrzeni decyzji do przestrzeni klas może wyglądać tak:

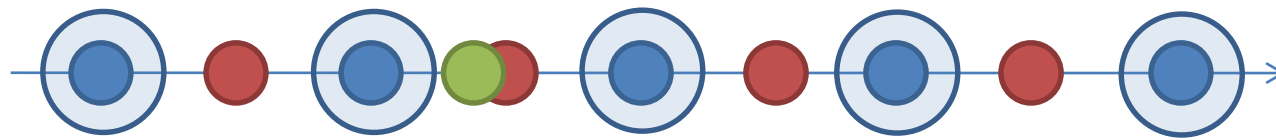
$$\text{IF } (d1 \text{ AND } d2) \text{ THEN } c1$$

$$\text{IF } (d2 \text{ AND } d3) \text{ THEN } c2$$

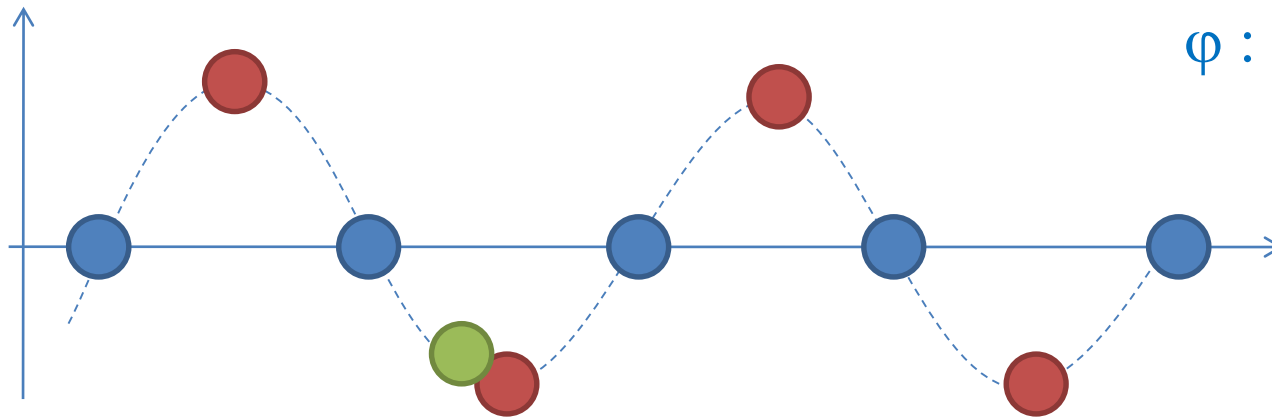


źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Przestrzeń pomiarów, przestrzeń cech - ilustracja:

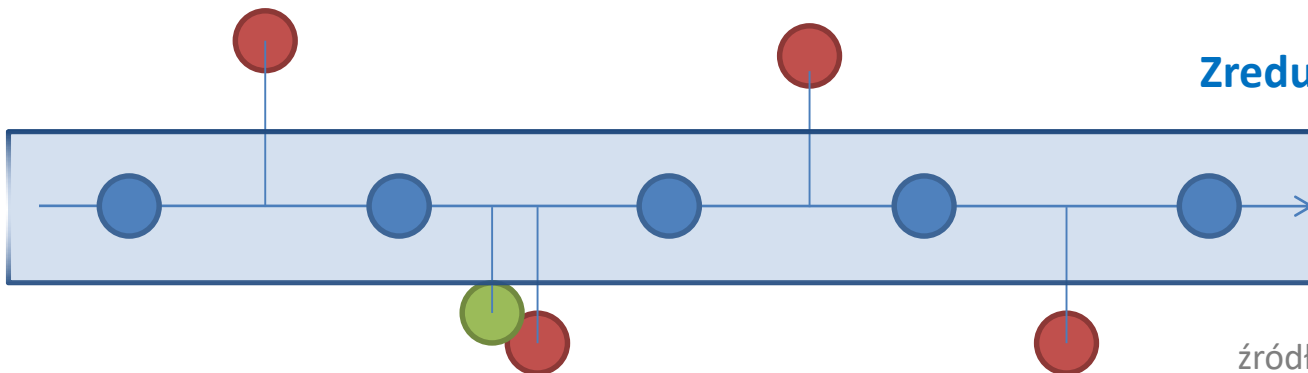


Przestrzeń pomiarów



$$\varphi : [x] \rightarrow [x, \sin(x)]$$

Przestrzeń cech



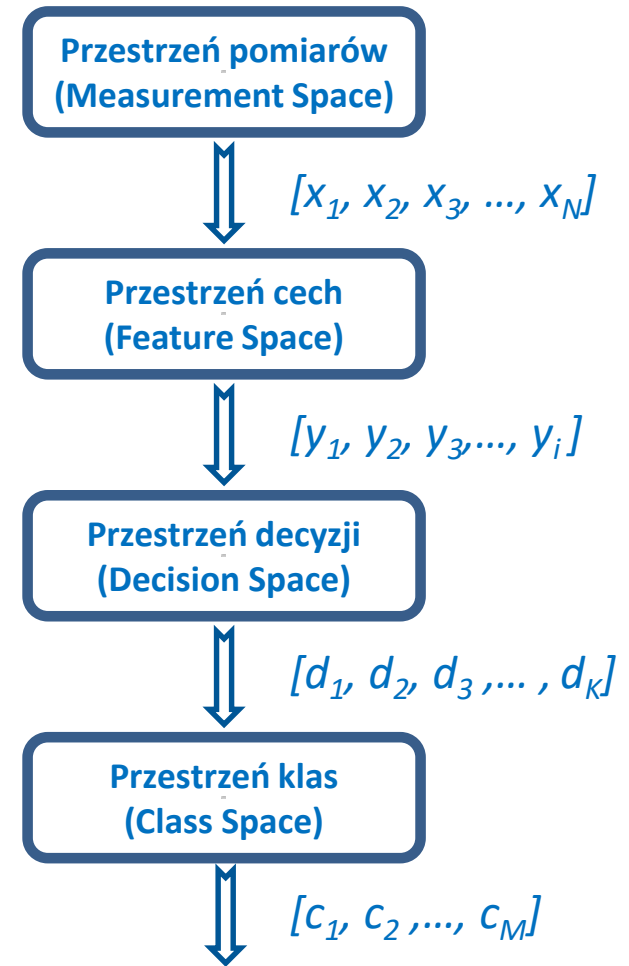
Zredukowana przestrzeń cech

źródło: Nowicki i Grochowski, 2011

Transformacje przestrzeni - przykład:

W przypadku klasyfikatora opartego o sztuczne sieci neuronowe:

- wejścia do sieci reprezentują przestrzeń pomiarów;
- neurony w warstwie ukrytej odpowiadają przestrzeni cech;
- neurony w warstwie wyjściowej transformują przestrzeń cech w przestrzeń decyzji,
- natomiast interpretacja wyjść z sieci odpowiada przestrzeni klas.

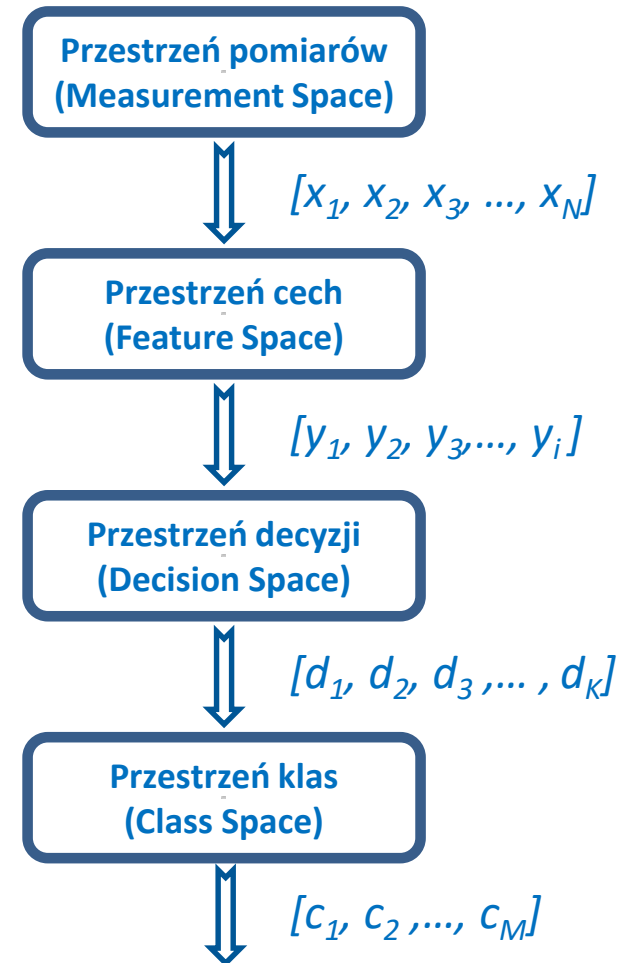


źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Proces diagnozowania:

Podsumowanie

- Podstawowym celem i założeniem transformacji z przestrzeni pomiarów do przestrzeni cech jest założenie że łatwiej jest dokonywać klasteryzacji (grupowania) cech w przestrzeni cech niż pomiarów w przestrzeni pomiarów;
- W trakcie transformacji z przestrzeni pomiarów do przestrzeni cech uzyskujemy również (najczęściej) redukcję rozmiaru problemu;
- Transformacja z przestrzeni pomiarów do przestrzeni cech odbywa się przy użyciu wiedzy a priori o procesie natomiast transformacja z przestrzeni cech do przestrzeni decyzji dokonyuje się w procesie uczenia i/lub optymalizacji;
- W większości przypadków przestrzeń decyzji i klas mają ten sam rozmiar, jednak warto utrzymać ich rozdzielność, np. niektórzy z operatorów chcieliby otrzymywać konkretne decyzje co do rodzaju uszkodzenia a inni wolą samemu podjąć ostateczną decyzję.



źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Etapy procesu diagnozowania:

Fazy diagnozowania obiektów (FDD – Fault Detection and Diagnosis):

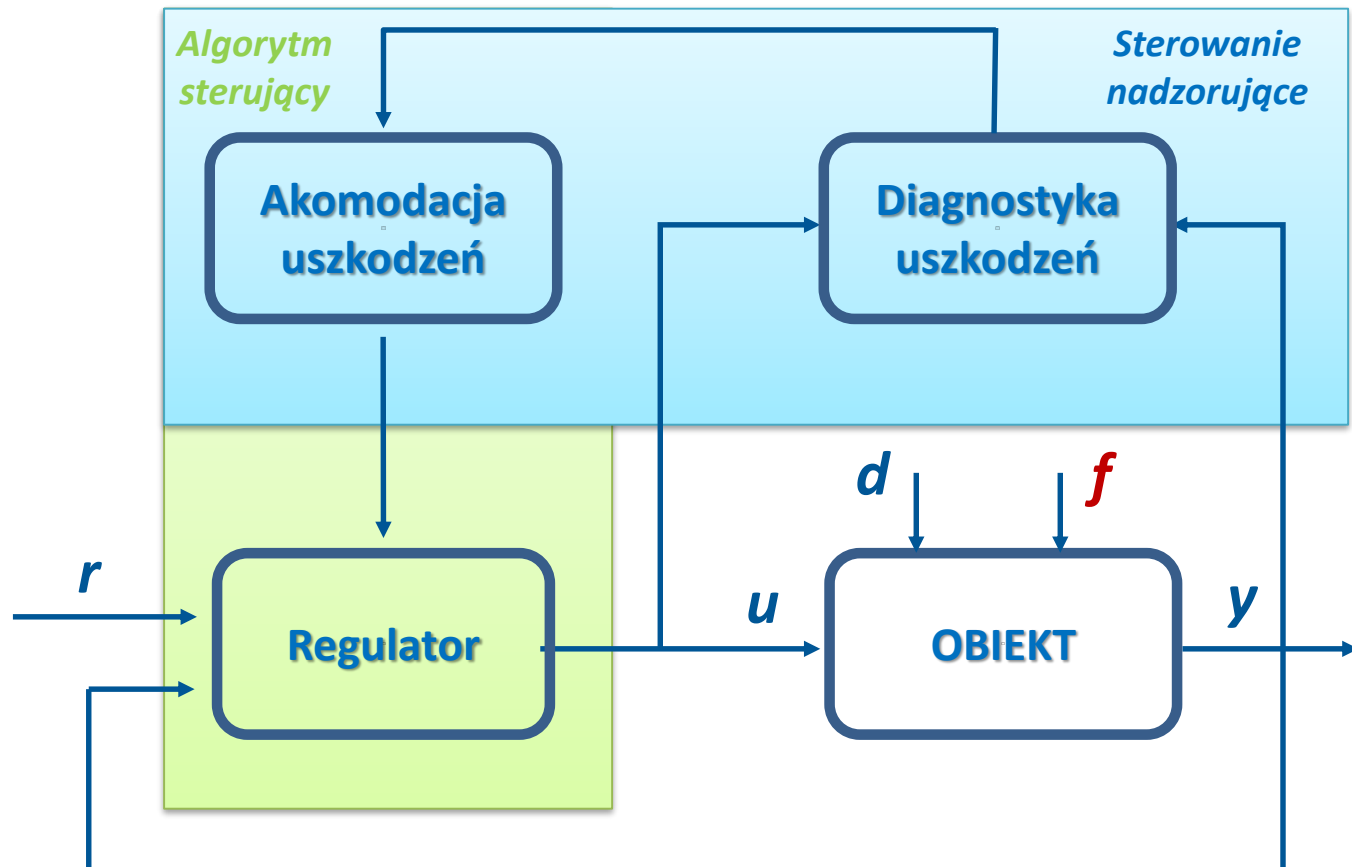
- **Detekcja uszkodzenia (fault detection)**
Wykrycie, zauważanie powstania uszkodzenia w obiekcie i określenie chwili detekcji.
- **Lokalizacja/wyodrębnienie uszkodzenia (fault isolation)**
Określenie rodzaju, miejsca i czasu wystąpienia uszkodzenia.
- **Identyfikacja uszkodzenia (fault identification)**
Określenie rozmiaru i charakteru zmienności uszkodzenia w czasie.

(źródło: Korbicz i inni, 2002)

Dodatkowo przy sterowaniu odpornym (FTC – Fault Tolerant Control)

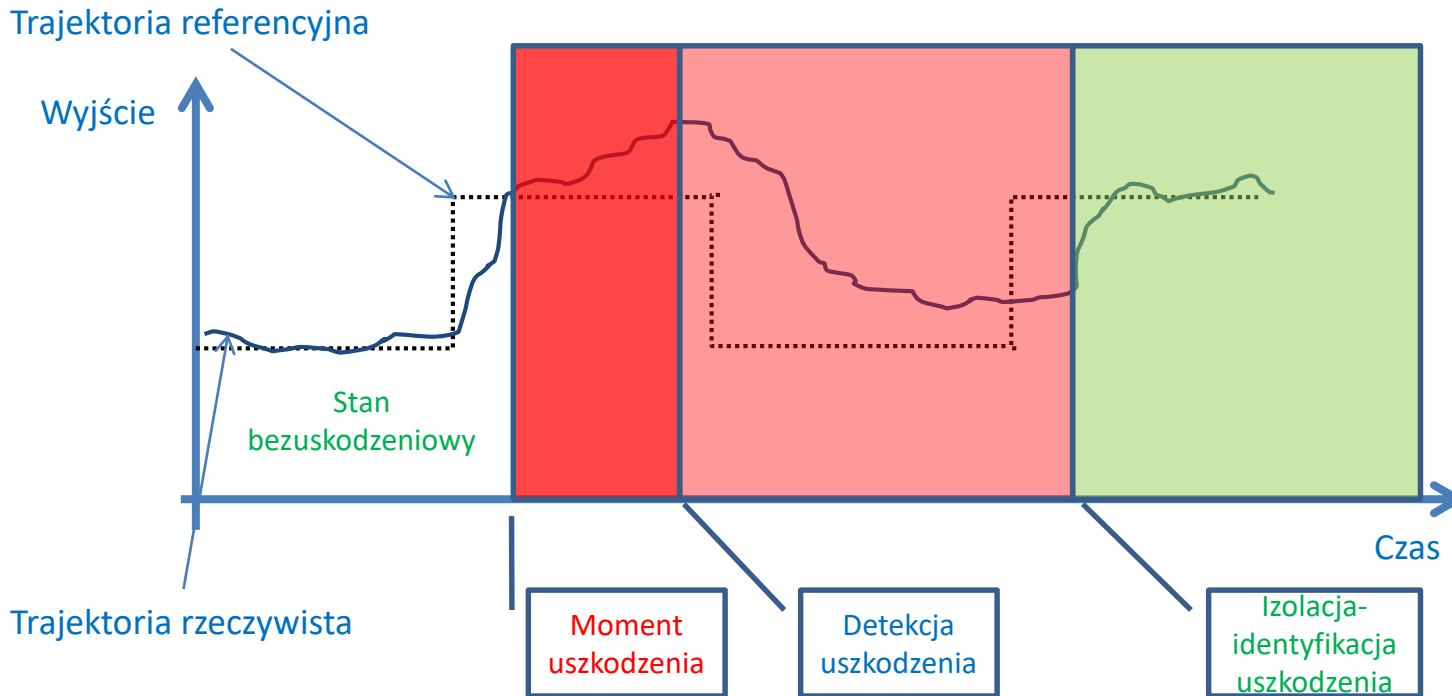
- **Kompensacja zakłóceń (fault accomodation)**
- **Rekonfiguracja systemu sterowania (control reconfiguration)**

Schemat procesu podejmowania decyzji w FTC:



Schemat systemu sterowania tolerującego uszkodzenia

Etapy procesu podejmowania decyzji w sterowaniu FTC:



• System pracuje normalnie

• Nastąpiło uszkodzenie ale nie zostało jeszcze wykryte;
• System sterowania powinien co najmniej zachować ograniczoną sygnału wyjścia

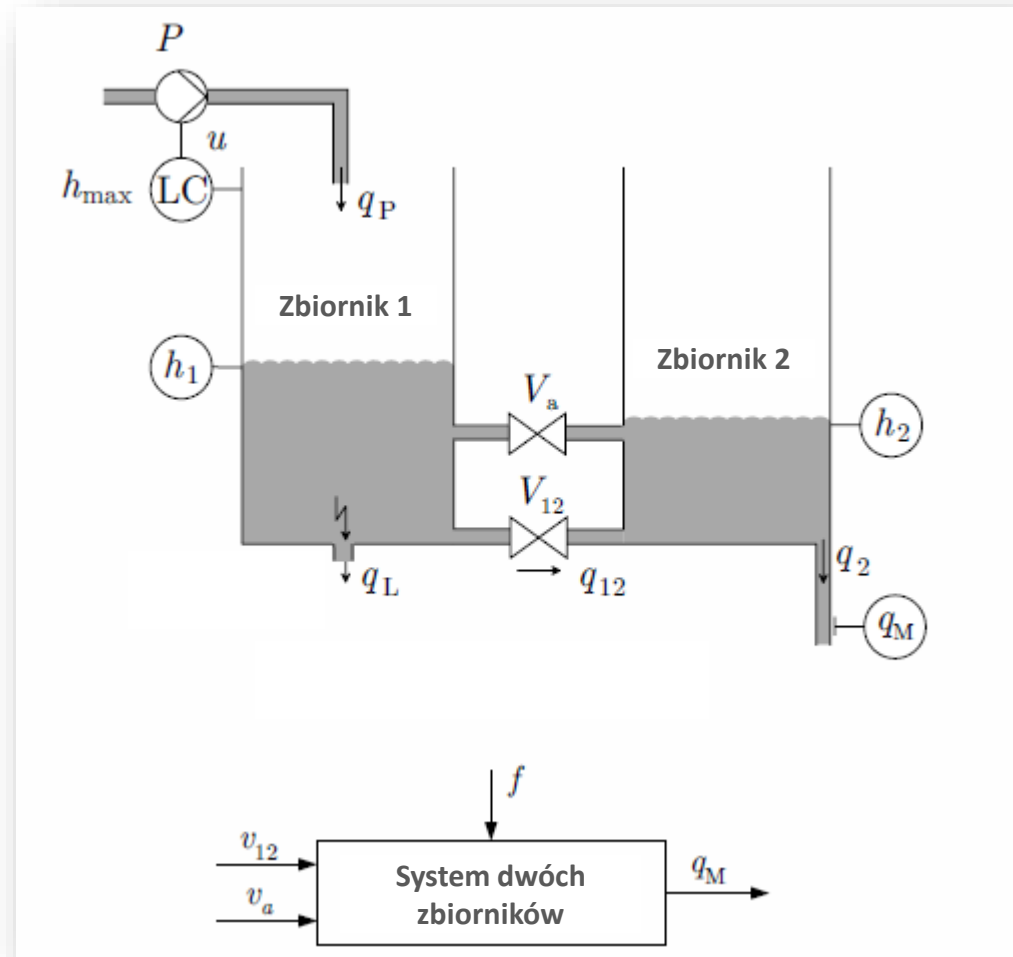
• Wykryto uszkodzenie ale nie jest jeszcze znany jego rodzaj i miejsce;
• Regulator dokonuje rekonfiguracji tak aby odzyskać jak największą jakość sterowania

• Uszkodzenie zostało wyizolowane i zidentyfikowane;
• Regulator dokonuje ostatecznej rekonfiguracji;
• Odzyskuje maksymalną możliwą jakość sterowania.

Etapy procesu podejmowania decyzji w sterowaniu FTC:

Przykład

- Pompa P powoduje napływ cieczy q_p do Zbiornika 1 (Z1);
- $u(t)$ określa prędkość pompy;
- u jest zdeterminowane przez wyłącznik bezpieczeństwa chroniący przed przelewem Z1;
- Wejściem do systemu są pozycje zaworów V_a i V_{12} ;
- W normalnym stanie pracy układu (bezszkodzeniowym) V_a jest zamknięta a zawór V_{12} jest używany do sterowania poziomem cieczy w Z2 – utrzymywania poziomu na zadanym poziomie;
- V_{12} jest używany do napełnienia i opróżniania Z2, Z1 jest zbiornikiem „retencyjnym” który jest napełniany do h_{max} (wyłącznik awaryjny wyłącza wtedy pompę);
- V_a jest używany jedynie podczas awarii;
- Rozważane są dwa typy uszkodzeń:
 - Wyciek z Z1, powodujący q_l ;
 - Zablockowanie zaworu V_{12} w pozycji zamkniętej.

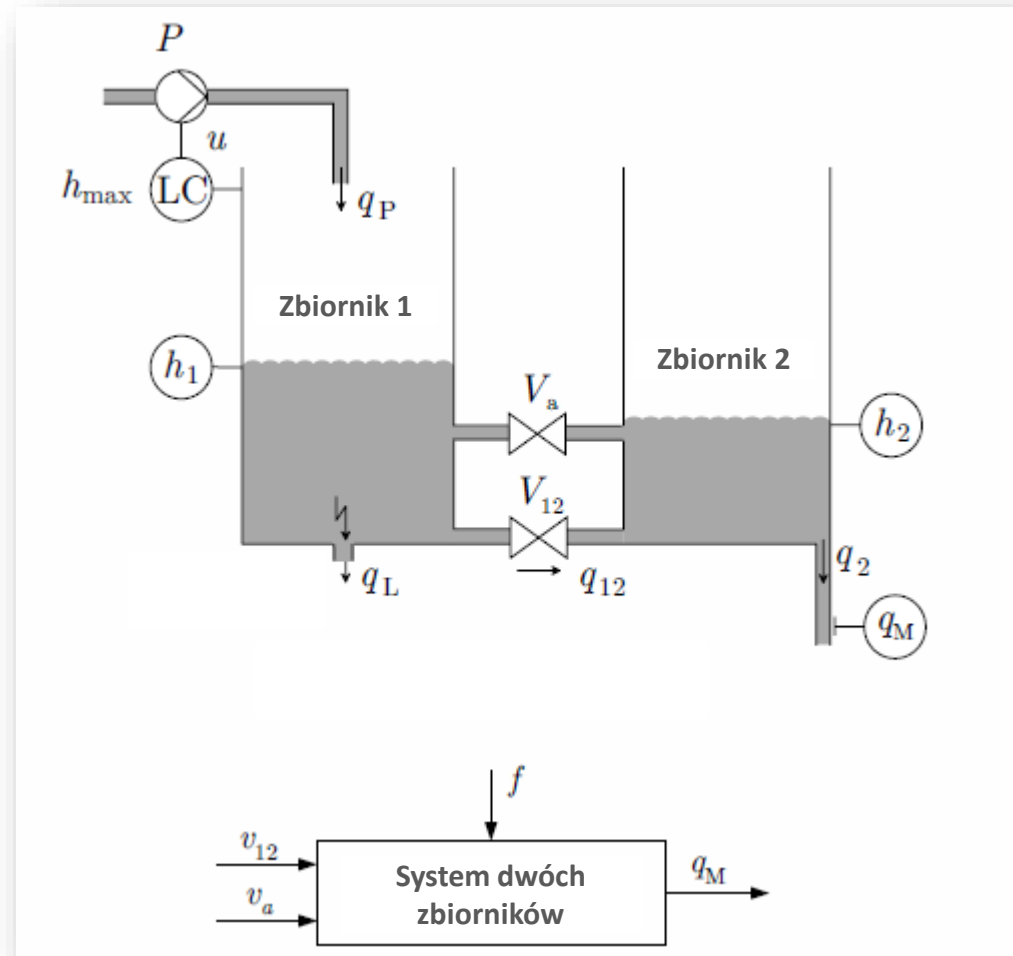


źródło: Blanke i inni, 2006

Etapy procesu podejmowania decyzji w sterowaniu FTC:

Problemy:

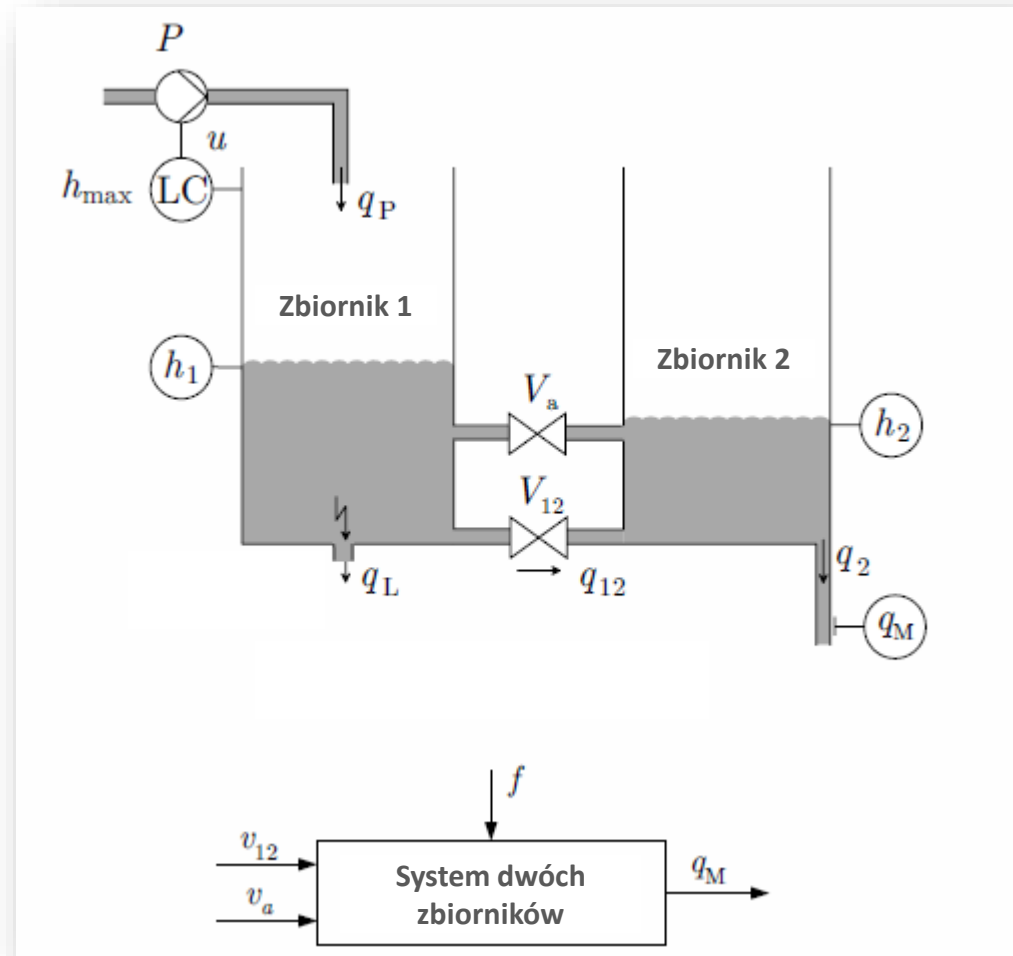
- Celem sterowania jest utrzymywanie poziomu cieczy w Z2 niezależnie od wystąpienia uszkodzeń;
- Rozważ możliwości wykrycia uszkodzeń przy różnych wariantach opomiarowania:
 - q_M ,
 - q_M, h_1, h_2
 - q_M, h_1, h_2, q_p .
- Zaproponuj sposób kompensacji uszkodzenia;
- Zaproponuj sposób rekonfiguracji systemu sterowania.



źródło: Blanke i inni, 2006

Etapy procesu podejmowania decyzji w sterowaniu FTC:

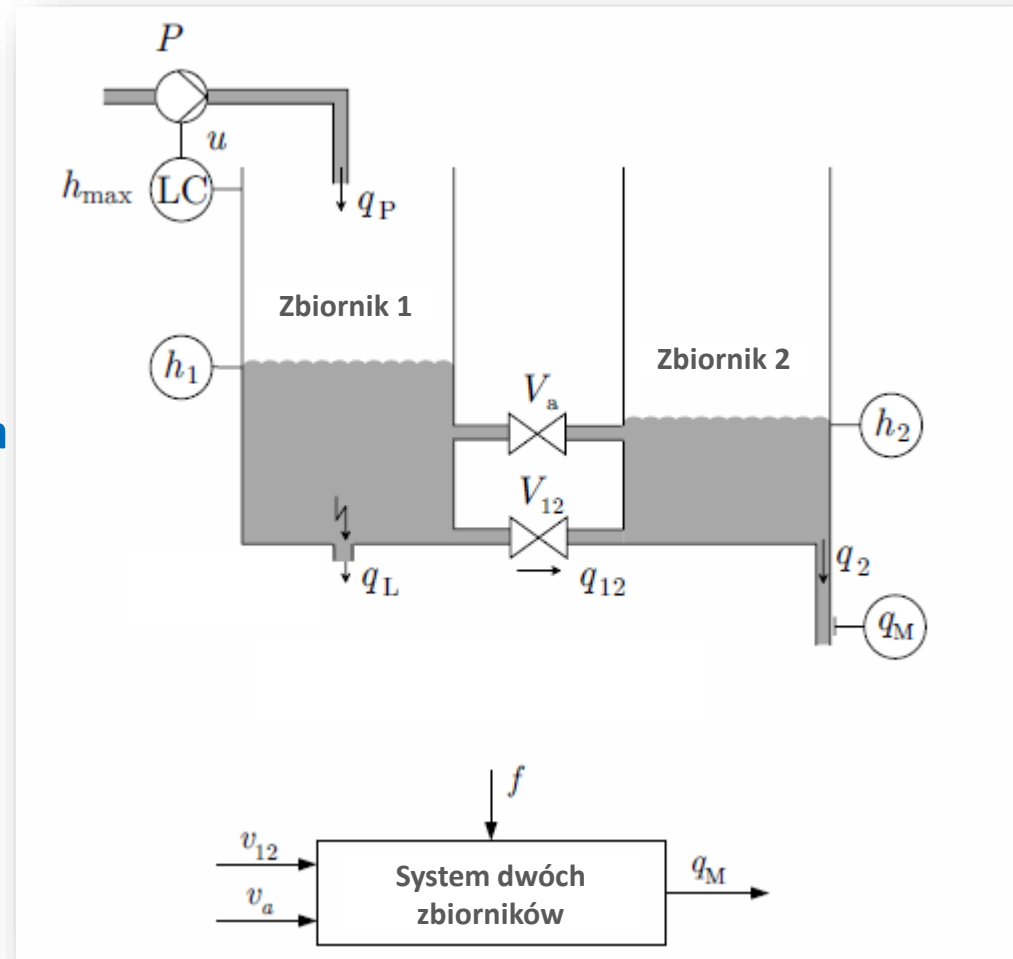
- **Detekcja uszkodzenia**
(Fault detection)
Ustalenie czy nastąpiło uszkodzenie i kiedy.
- **Wyodrębnienie uszkodzenia**
(Fault isolation)
Ustalenie która z części systemu jest uszkodzona.
- **Identyfikacja uszkodzenia**
(Fault identification)
Ustalenie np. rozmiaru wycieku (czasu, kształtu ...).



źródło: Blanke i inni, 2006

Etapy procesu podejmowania decyzji w sterowaniu FTC:

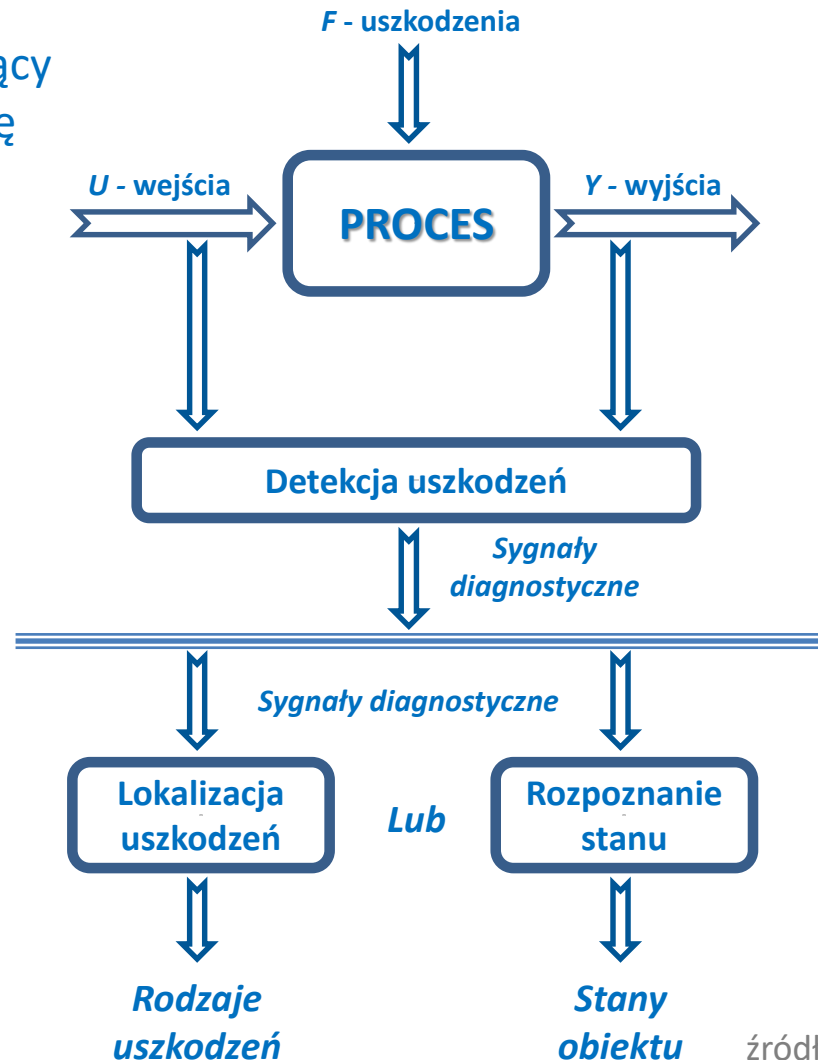
- **Kompensacja uszkodzenia**
(Fault accomodation)
W przypadku wycieku banalne - przy założeniu że pompa ma wystarczającą moc, tylko że
- **Rekonfiguracja systemu sterowania**
(Control reconfiguration)
W przypadku awarii zaworu musimy użyć zaworu V_a .
Powinno to nastąpić automatycznie, natychmiast po identyfikacji uszkodzenia.



źródło: Blanke i inni, 2006

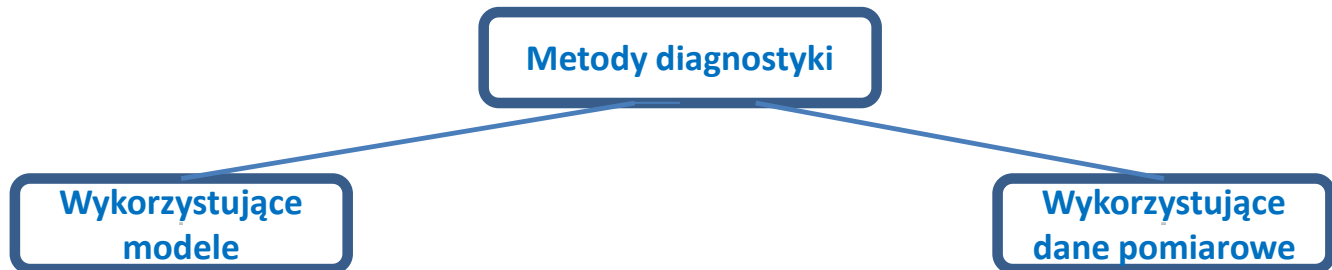
Etapy procesu diagnozowania (nieco inne ujęcie):

Schemat diagnozowania obejmujący fazę detekcji uszkodzeń oraz fazę lokalizacji uszkodzeń lub rozpoznawania stanu obiektu



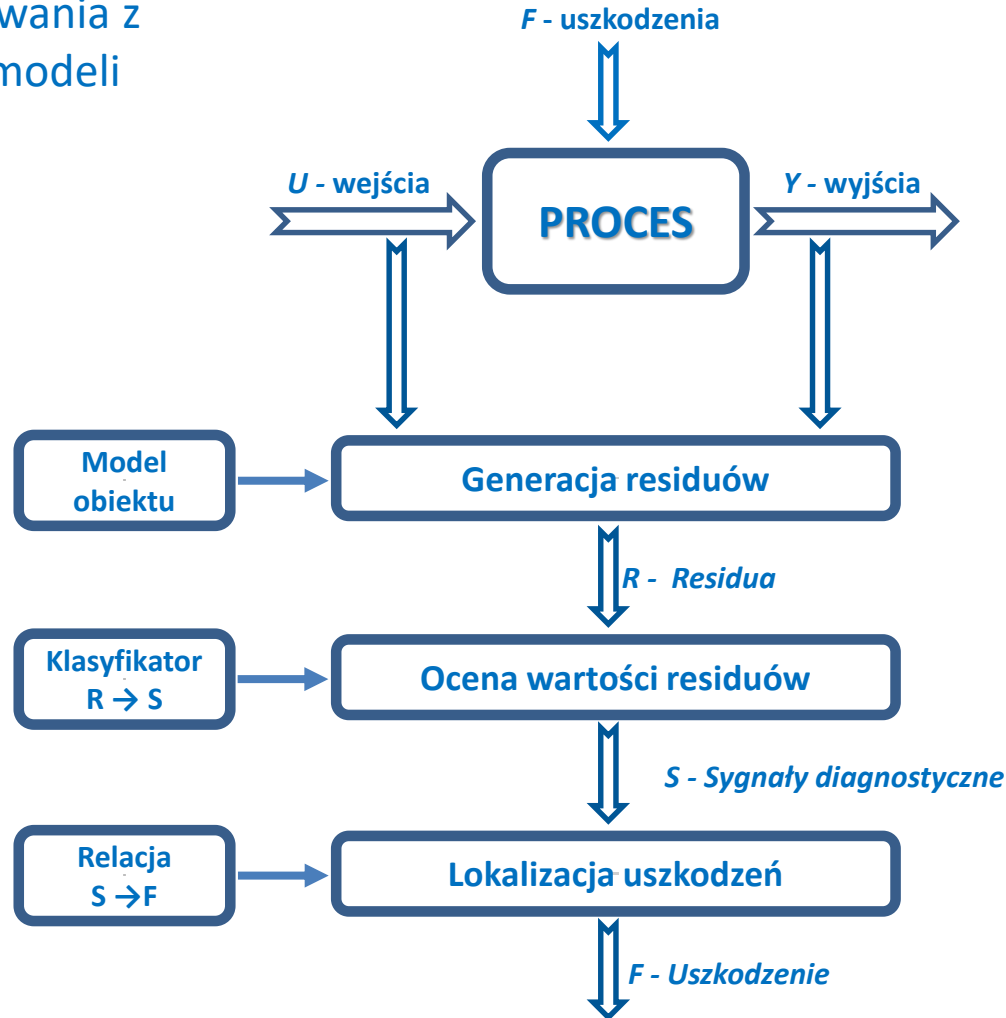
źródło: Korbicz i inni, 2002

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych



Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych

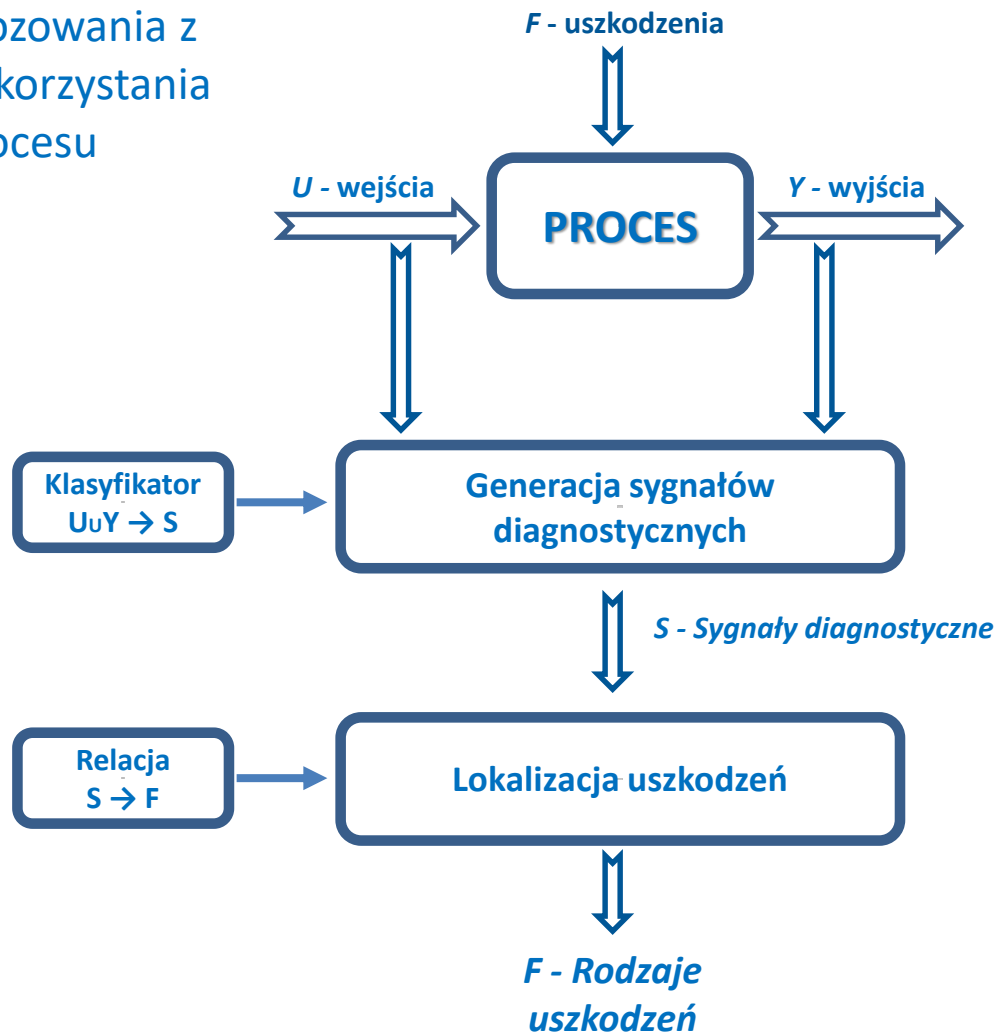
Schemat diagnozowania z wykorzystaniem modeli procesu



źródło: Korbicz i inni, 2002

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych

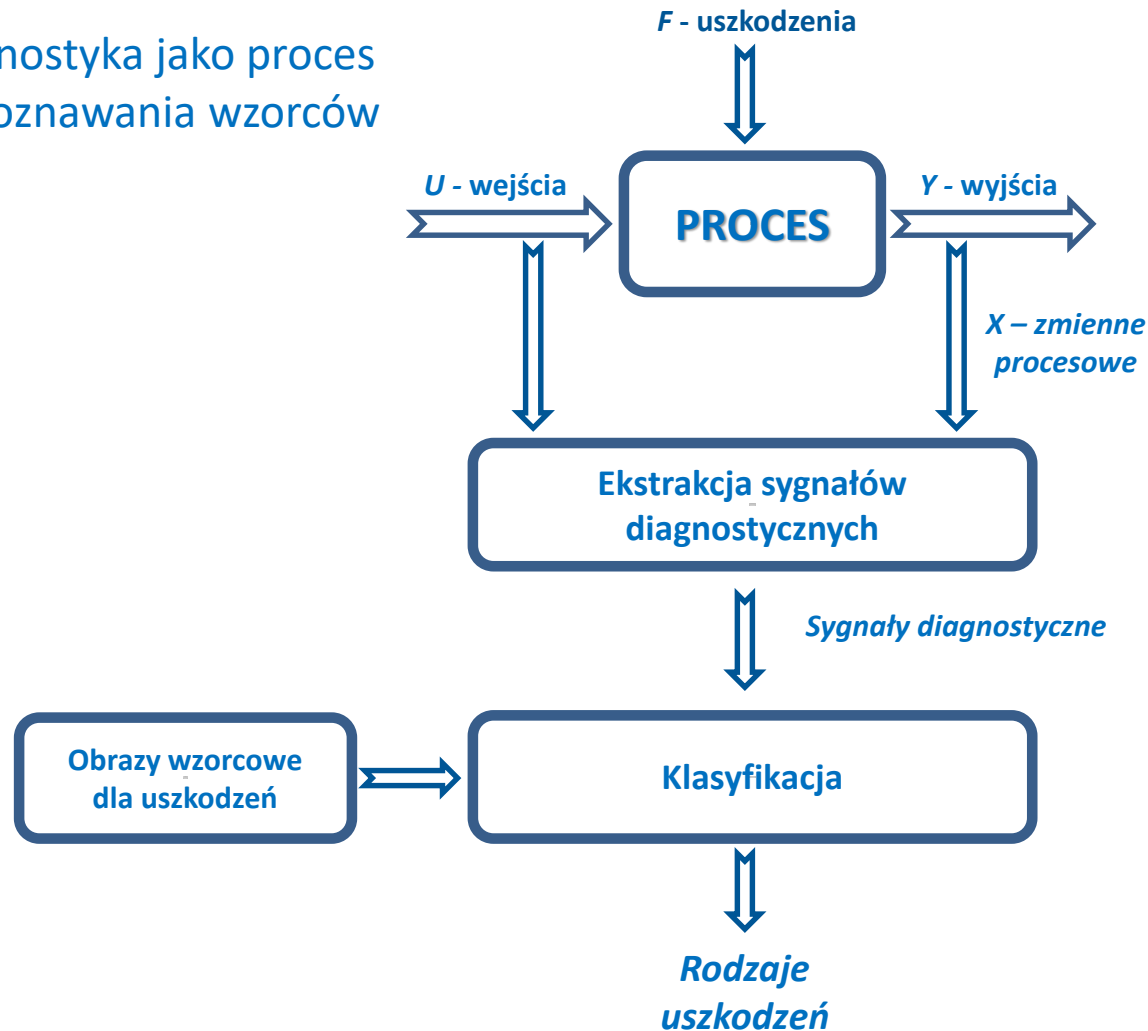
Schemat diagnozowania z detekcją bez wykorzystania modeli procesu



źródło: Korbicz i inni, 2002

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych

Diagnostyka jako proces rozpoznawania wzorców

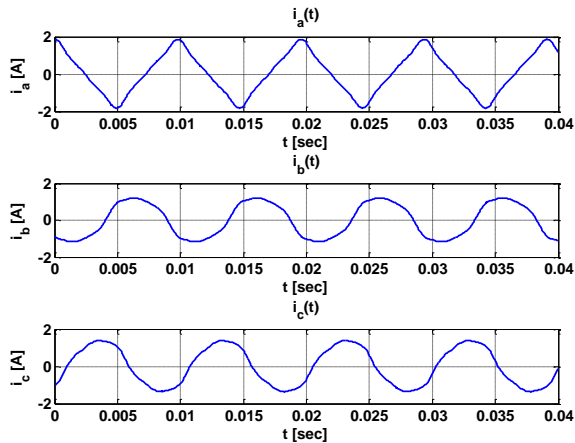


źródło: Korbicz i inni, 2002

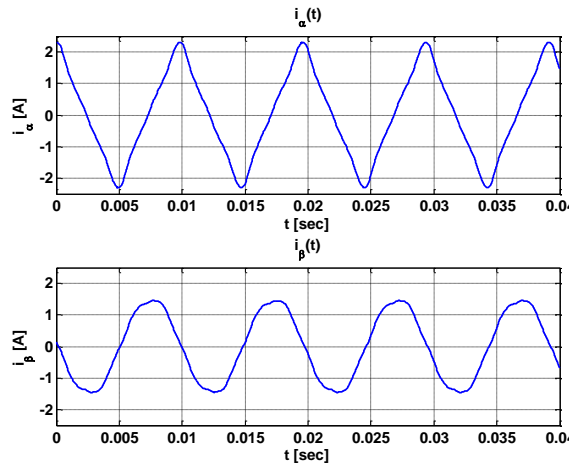
Diagnostyka jako proces rozpoznawania wzorców

Przykład – detekcja i identyfikacja uszkodzeń łożysk tocznych silnika indukcyjnego

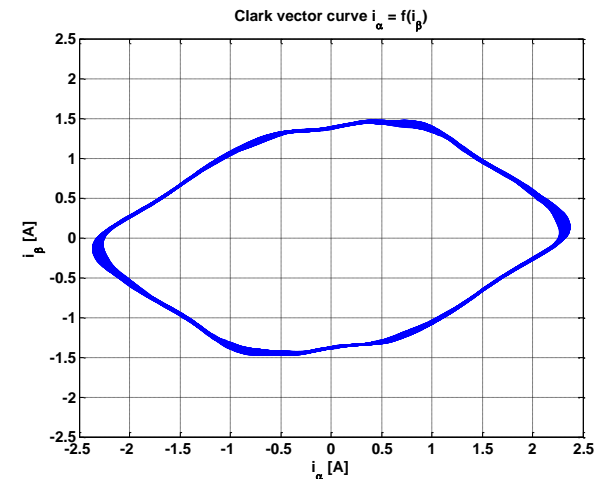
źródło: Use of neural networks in diagnostics of rolling-element bearing of the induction motor. L.Swędrowski, K.Duzinkiewicz, M.Grochowski, T.Rutkowski.
V Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej 2012 - Kraków



Prądy zasilania
silnika trójfazowego



Transformacja Clarka

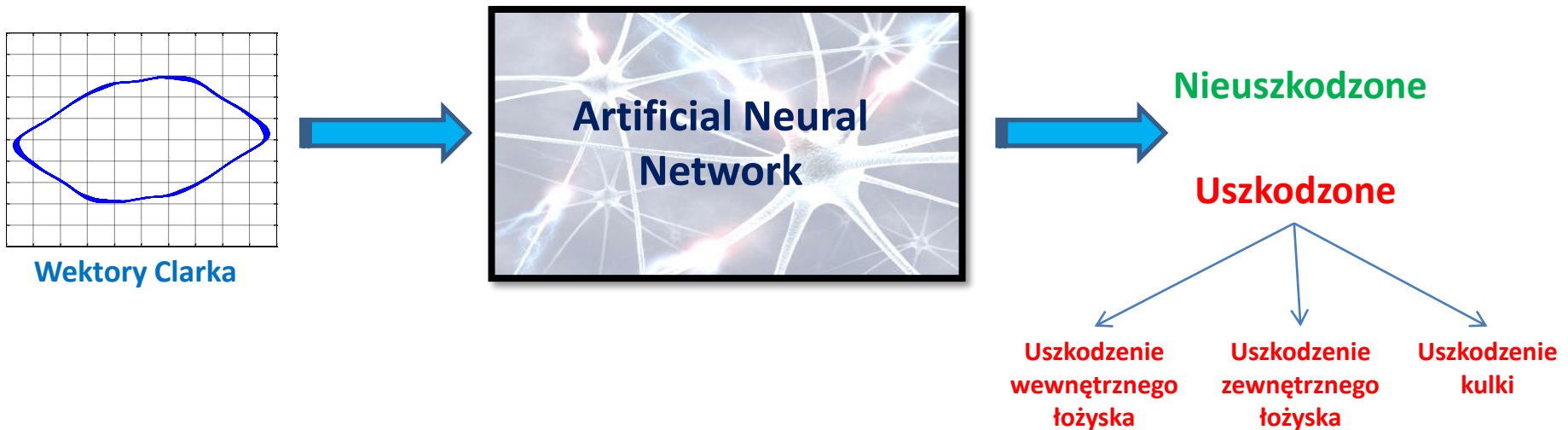


Wektory Clarka

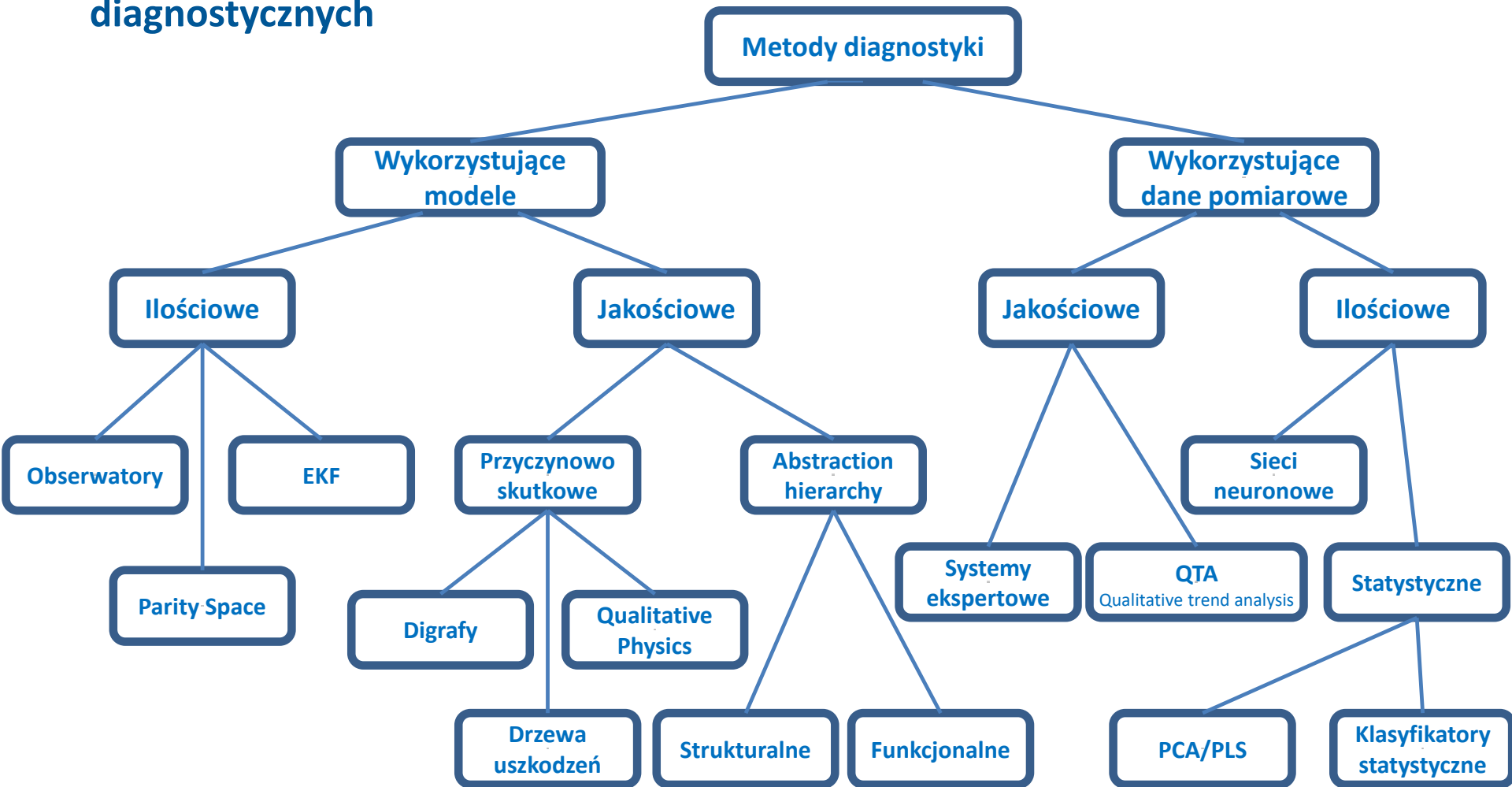
Diagnostyka jako proces rozpoznawania wzorców

Przykład – detekcja i identyfikacja uszkodzeń łożysk tocznych silnika indukcyjnego

źródło: Use of neural networks in diagnostics of rolling-element bearing of the induction motor. L.Swędrowski, K.Duzinkiewicz, M.Grochowski, T.Rutkowski. V Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej 2012 - Kraków



Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych



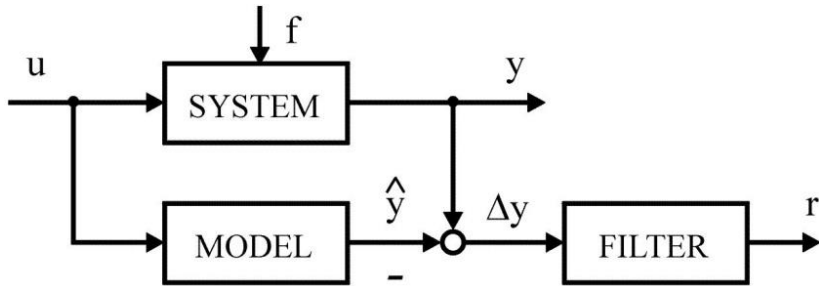
źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych:

Metody ilościowe wykorzystujące modele

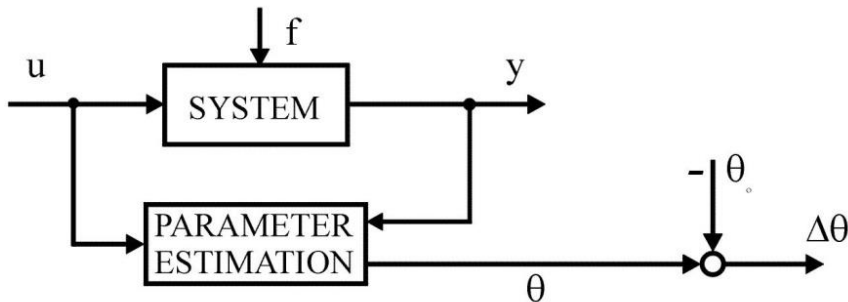
- Obserwatory
- Filtry Kalmana
- Parity Space

Metody ilościowe wykorzystujące modele

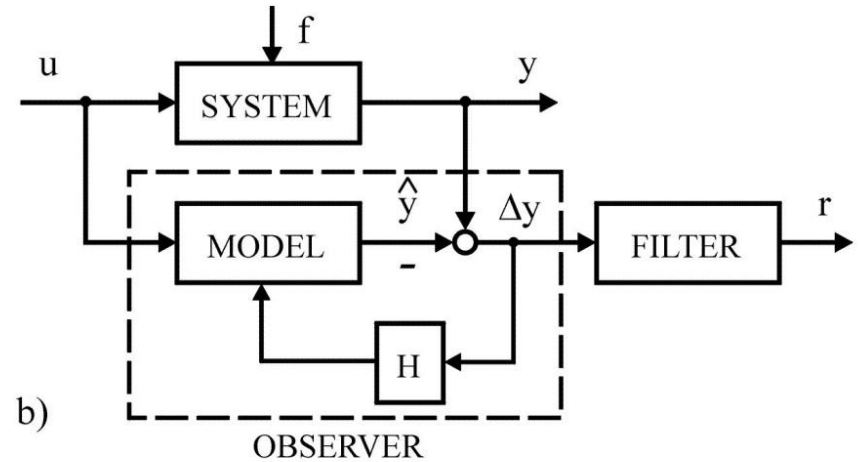


Parity space

(Parity equations – równania parzystości (zgodności))



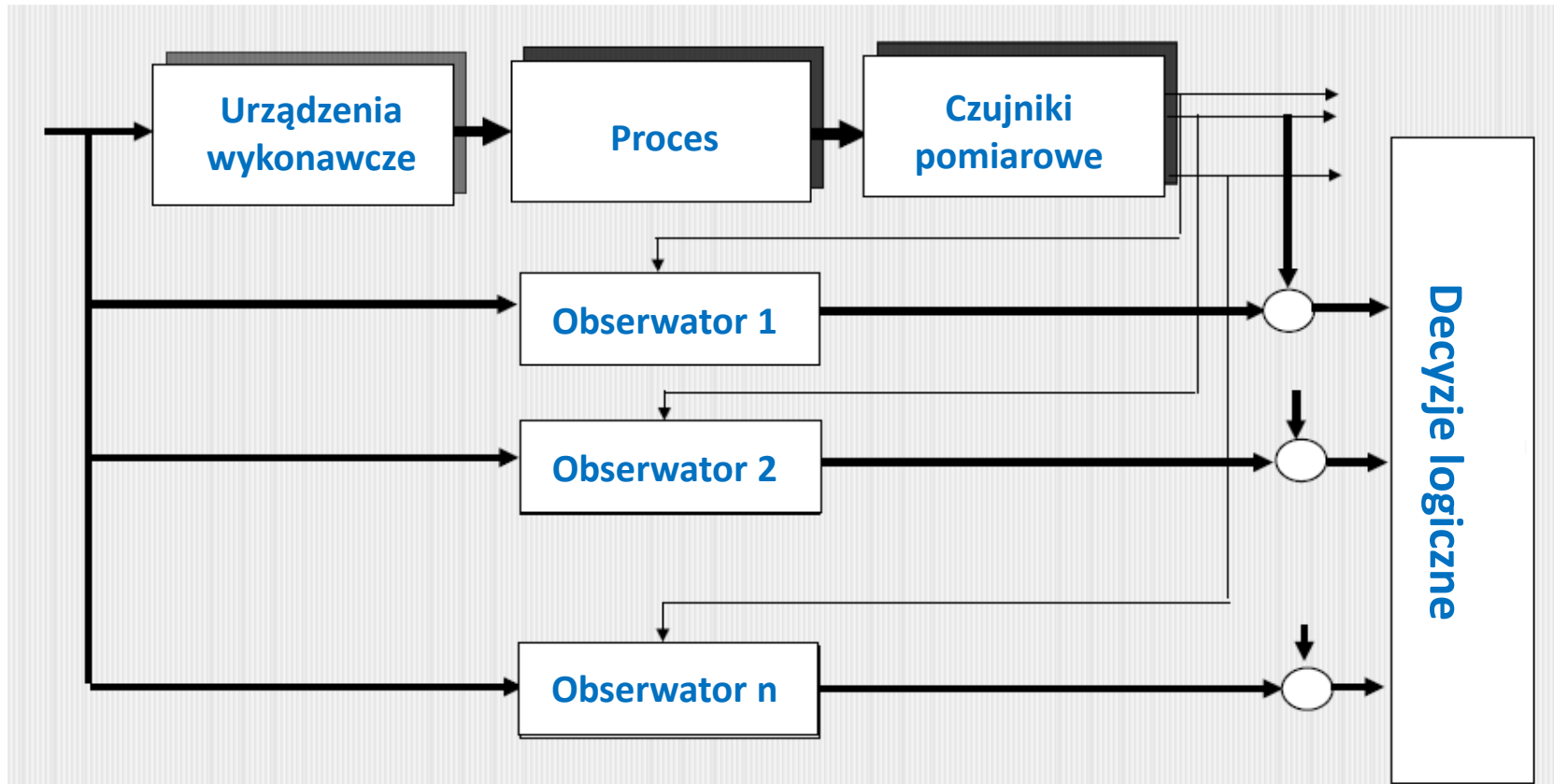
Podejście poprzez estymację parametrów



Podejście wykorzystujące obserwatory
i/lub Filtry Kalmana

Metody ilościowe wykorzystujące modele

Banki obserwatorów



Metody ilościowe wykorzystujące modele

Podsumowanie:

- W diagnostyce stosuje się modele typu wejście-wyjście, modele w przestrzeni stanu, modele fenomenologiczne, modele częstotliwościowe ...
- Modele fenomenologiczne są rzadko używane ze względu na trudności z uzyskaniem odpowiednio dokładnych modeli i z dużym obciążeniem obliczeniowym przy ich wykorzystaniu;
- Najbardziej popularnymi modelami w tej grupie są modele wejście-wyjście oraz modele w przestrzeni stanu;
- Posiadając model, najczęściej w procesie diagnozowania występują dwa kroki:
 - Generacja residuów (redundancja analityczna);
 - Wybór odpowiedniej reguły podejmowania decyzji.
- W stanie bezuszkodzeniowej pracy systemu, residua powinny oscylować wokół zera. Wystąpienie uszkodzenia zmienia relacje pomiędzy zmiennymi co powoduje powstanie niezerowych wartości residuów;
- Wykorzystywane modele mogą być typu white – box lub black box co implikuje późniejszą zdolność do izolacji uszkodzeń;
- Większość modeli diagnostycznych jest liniowa lub wymaga linearyzacji w punkcie pracy.

Ogólna charakterystyka modeli i ich wykorzystania do diagnostyki:

Podsumowanie:

- Schematy diagnozowania w tym podejściu najczęściej sprowadzają się do estymacji zmiennych stanu i parametrów, filtracji, adaptacyjnej filtracji itp....
- Często tworzone są banki obserwatorów przystosowanych do wykrywania konkretnego uszkodzenia;
- Najbardziej efektywnymi modelami wydają się być Filtry Kalmana (rozszerzone);
- Najważniejszą zaletą podejścia z wykorzystaniem modeli ilościowych jest fakt iż posiadamy dużą kontrolę i przejrzystość procesu diagnozowania;
- Największą wadą jest praktyczna ograniczoność do modeli liniowych i pewnej klasy modeli nieliniowych.

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych:

Metody jakościowe wykorzystujące modele

- Modele przyczynowo skutkowe
- Drzewa uszkodzeń
- Digrafy

Metody jakościowe wykorzystujące modele

Digrafy (grafy skierowane)

Przykład:

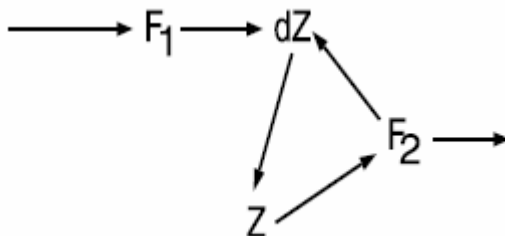
Model zbiornika z cieczą:

$$F_1 - F_2 = \frac{dZ}{dt}$$

Gdzie:

- F_1 – dopływ cieczy do zbiornika,
- F_2 – odpływ cieczy ze zbiornika,
- Z – wysokość cieczy w zbiorniku

Digraf zbiornika z cieczą:



źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Metody jakościowe wykorzystujące dane pomiarowe

Główna zaleta:

- Przejrzystość procesu diagnozowania

Główna wada:

- Generacja nieprawdziwych rozwiązań

Klasyfikacja algorytmów diagnostycznych:

Metody wykorzystujące dane pomiarowe

- Systemy ekspertowe
- QTA
- Analiza Składników Podstawowych - PCA
- Sieci neuronowe

Metody jakościowe wykorzystujące dane pomiarowe

Systemy ekspertowe

- Głównymi składnikami systemów ekspertowych są:
 - Pozyskiwanie wiedzy (knowledge acquisition);
 - Wybór sposobu reprezentacji wiedzy;
 - Kodowanie wiedzy w bazach wiedzy;
 - Opracowanie procedur wnioskowania systemu;
- Zalety:
 - Łatwość implementacji;
 - Przejrzystość wnioskowania
 - Zdolność do wnioskowania przy niepewności;
 - Zdolność do tłumaczenia rozwiązania;
- Wady
 - Operują w wąskich dziedzinach wiedzy;
 - Są trudne w aktualizacji;

Metody jakościowe wykorzystujące dane pomiarowe

Qualitative Trend Analysis (Jakościowa analiza trendów)

- Polega na identyfikacji i późniejszej analizie trendów w pomiarach (dużo przetwarzania i filtracji sygnałów);
- Często uszkodzenie objawia się w postaci dodatkowego trendu danych;
- Przy analizie danych stosuje się dekompozycję sygnałów dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.

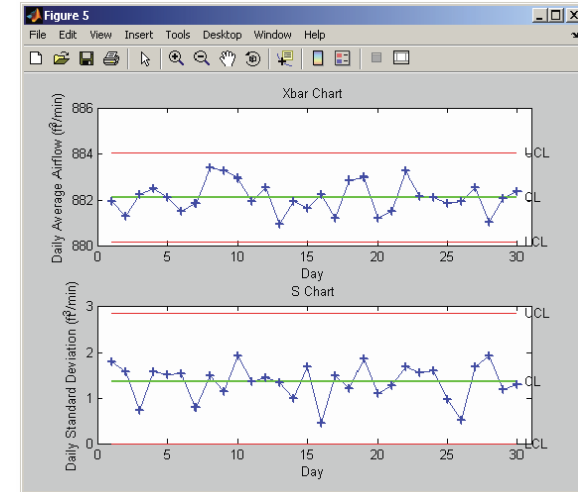
Powody:

- Zmiany trendów zachodzą (są widoczne) w różnych skalach
 - i z różną częstotliwością i dynamiką;
-
- Najlepszą z metod dekompozycji czasowo-częstotliwościowej jest transformacja falkowa;

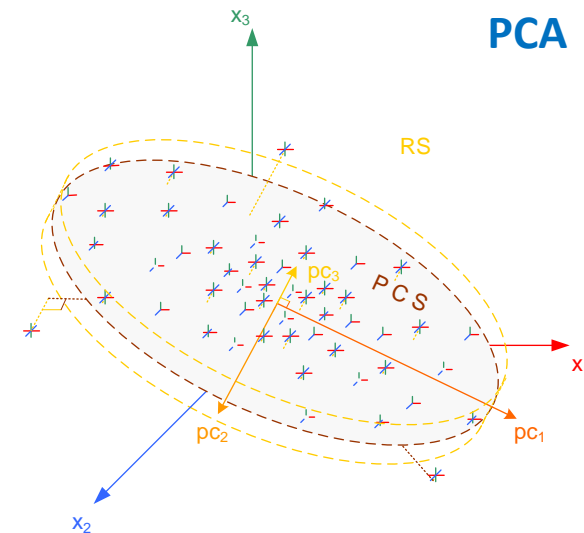
Metody ilościowe wykorzystujące dane pomiarowe

SPC

- Główne narzędzia – Sieci neuronowe, PCA, klasyfikatory Bayesa;
- Najczęściej metody ilościowe oparte o dane prowadzą się do problemu klasyfikacji /rozpoznawania wzorców;
- Celem jest zaklasyfikowanie danych z procesu do jednego z predefiniowanych wzorców;
- Metody statystyczne zapoczątkowane zostały przez karty kontrolne – szeroko stosowane do dziś;
- Obecnie prym wiodą SPC (Statistical Process Control) oraz coraz częściej SixSigma;
- Wadą jest fakt operowania jedynie w przestrzeni jednowymiarowej – nie uwzględniają („nie widzą”) korelacji pomiędzy zmiennymi;
- W przestrzeniach wielowymiarowych operuje np. PCA.



PCA



Metody ilościowe wykorzystujące dane pomiarowe

Analiza składników podstawowych (Principle Components Analysis – PCA)

Wykład 5-6

Metody ilościowe wykorzystujące dane pomiarowe

Sieci neuronowe

- Jako klasyfikatory;
- Jako modele referencyjne;
- Jako systemy samouczące.

Podsumowanie:

Porównanie różnych algorytmów diagnostyki procesów

Etapy diagnozowania

	Obserwatory	Digrafy	QTA	Sieci neuronowe
Przestrzeń pomiarów	Pomiary	Pomiary	Pomiary	Pomiary
Przestrzeń cech	Residua	Stany jakościowe/ częściowe wzorce	Trendy	Neurony warstwy ukrytej/ wyrażna cecha
Przestrzeń decyzji	Ostre residua/ klasy uszkodzeń	Klasy uszkodzeń	Miary prawdopodobieństwa	Neurony warstwy wyjściowej
Przestrzeń klas	Klasy uszkodzeń	Klasy uszkodzeń	Klasy uszkodzeń	Klasy uszkodzeń

źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Podsumowanie:

Porównanie różnych algorytmów diagnostyki procesów

Pożądane cechy systemów diagnostycznych

	Obserwatory	Digrafy	Abstraction hierarchy	Systemy ekspertowe	QTA	PCA	Sieci neuronowe
Szybka detekcja i diagnoza	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
Izolacja uszkodzenia	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Krzepkość	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Identyfikacja nowych stanów	?	✓	✓	✗	?	✓	✓
Błąd klasyfikacji	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Adaptowalność	✗	✓	✓	✗	?	✗	✗
Tłumaczenie skutków	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Wymagania modelowania	?	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gromadzenie danych i obliczenia	✓	?	?	✓	✓	✓	✓
Wykrywanie wielokrotnych uszkodzeń	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗

źródło: Venkatasubramanian i inni, 2002

Podsumowanie:

- Występuje wyraźna luka pomiędzy badaniami naukowymi a wykorzystaniem przemysłowym (łatwość adaptowalności systemów, łatwość implementacji, koszty, poziom kompetencji „operatorów”, brak wiary w skuteczność metod);
- Najwięcej zastosowanych w przemyśle systemów diagnostycznych jest zbudowanych w oparciu o dane historyczne;
- Są one stosunkowo łatwe do implementacji;
- Wymagają niewielkiego wysiłku związanego z modelowaniem i niewielkiej wiedzy a priori o procesie;
- W przypadkach w których istnieją modele, są one przeważnie modelami statycznymi;
- Dokładne modele dynamiczne są najczęściej zbyt złożone (obliczenia) i zbyt niepewne (parametry);
- Najczęściej w zastosowaniach przemysłowych systemy diagnostyczne służą do wykrywania awarii czujników pomiarowych (choć to się bardzo szybko zmienia);

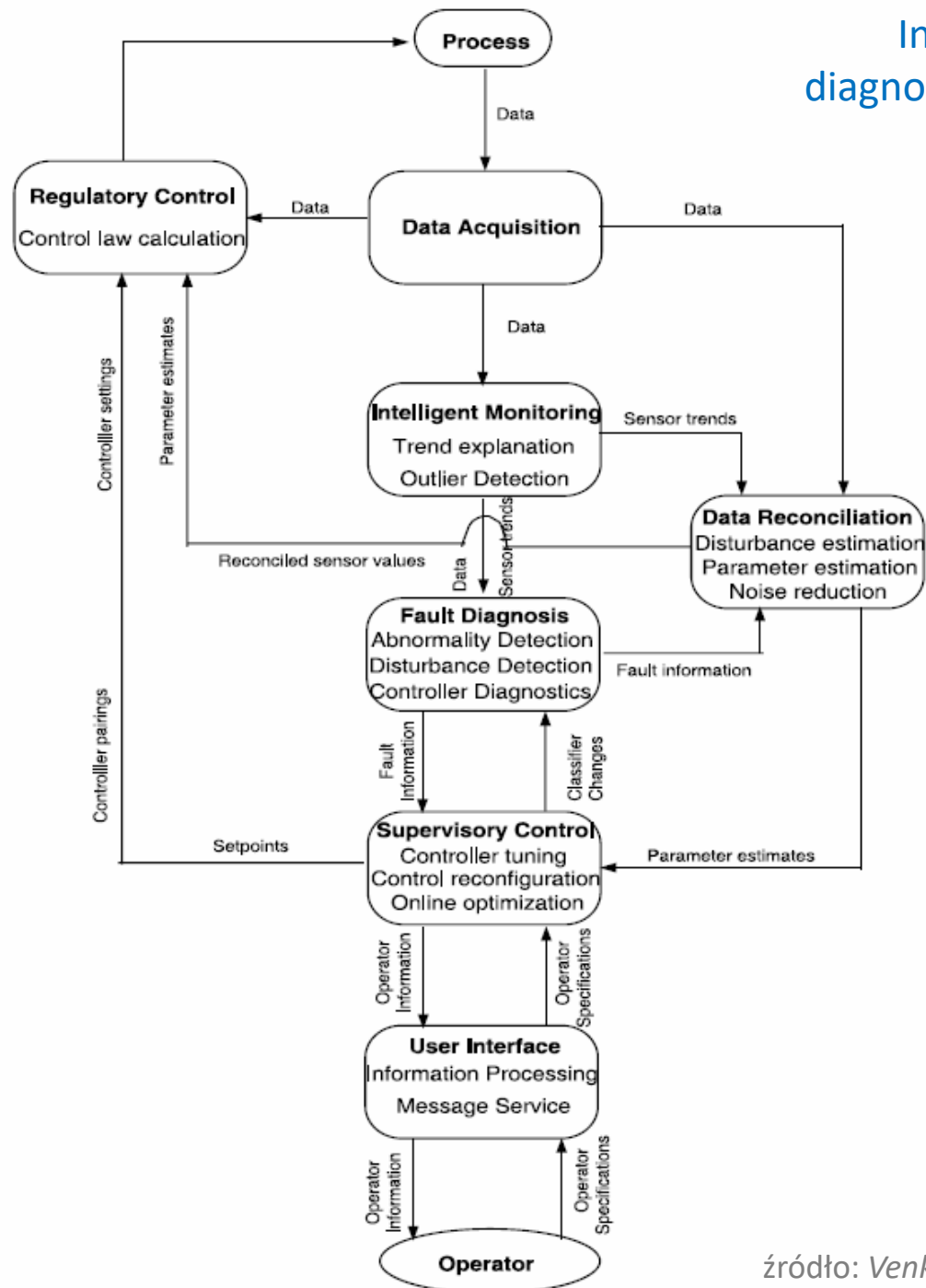
Podsumowanie:

- Spośród metod opartych o dane, najczęściej stosowane są algorytmy statystyczne (PCA). Powody: są łatwe do opracowania; doskonale spisują się w detekcji anomalii/uszkodzeń (gorzej w identyfikacji/izolacji); istnieje wiele dobrze funkcjonujących w przemyśle systemów diagnostycznych;
- Inne często stosowane metody to QTA (Qualitative trend analysis) oraz sieci neuronowe.
- Podejścia ilościowe z wykorzystaniem modelu są rzadko wykorzystywane (z wyjątkiem filtrów Kalmana) ponieważ:
 - Większość procesów jest nieliniowych;
 - Większość ilościowych modeli są modelami wejście – wyjście i jeżeli są ograniczone do zależności liniowych to korzyści z ich stosowania są niewielkie w porównaniu do np. PCA
- Metody są „tak dobre jak dostarczane im informacje” ale różne z metod lepiej lub gorzej wykorzystują informacje różnego typu;
- Różne metody inaczej się spisują w różnych zastosowaniach, np. metody grafowe są znakomite w zagadnieniach tłumaczenia przyczyn/skutków uszkodzenia (*Explanation facility*), natomiast słabo się spisują w izolowaniu uszkodzeń;
- Żaden (!!!) z systemów diagnostycznych nie wypełnia wszystkich postulatów stawianych systemom diagnostycznym – konieczne jest podejście hybrydowe;
- Najlepsze efekty przynosi synergiczne wykorzystywanie różnych podejść i algorytmów.

Podsumowanie:

- Praktyka przemysłowa wskazuje że efektywne systemy diagnostyczne wykorzystują co najmniej trzy algorytmy:
 - Szybka detekcja – algorytmy oparte o dane np. PCA, sieci neuronowe;
 - Wykrywanie trendów – transformacja falkowa, QTA;
 - Tłumaczenie zagadnień przyczynowo skutkowe operatorom – jakościowe metody z wykorzystaniem modeli.
- Bardzo ważną rolę odgrywa jakość i ilość posiadanych informacji. Kluczową sprawą jest optymalne rozmieszczenie sensorów (obserwowalność, wykrywalność, separowalność);
- Bardzo ważną rolę w procesie diagnozowania odgrywa przetwarzanie wstępne danych (usuwanie danych oddalonych, brakujących danych, trendów, szumów... - metody od prostych po bardzo zaawansowane np. *Data reconciliation*);
- Postępuje coraz większa integracja systemów diagnostycznych z systemami sterowania, planowania, zarządzania.

Integracja systemu diagnostycznego ze strukturą sterowania



Dziękuję za uwagę