

Anna SZTYBER

Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszaw-
ska, Warszawa

PROBLEM DOBORU OPTYMALNEGO ZBIORU SENSORÓW NA POTRZEBY DIAGNOSTYKI

Słowa kluczowe

Diagnostyka, sieć sensorów, analiza strukturalna, graf przyczynowo-skutkowy.

Streszczenie

W tym artykule przedstawiony jest przegląd stanu badań dotyczących zagadnienia projektowania zbioru sensorów wykorzystywanych w diagnostyce procesów przemysłowych. Szczególna uwaga poświęcona została rozwiązaniom wykorzystującym analizę strukturalną lub opis procesu w postaci grafu. Na zakończenie przedstawiona została propozycja alternatywnego podejścia do problemu.

Wprowadzenie

Przy projektowaniu układu sterowania i monitorowania procesu ważnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniego zbioru sygnałów pomiarowych, pozwalających na realizację założonych celów. Zwykle ten problem ma więcej niż jedno rozwiązanie, więc należy wybrać sieć sensorów optymalną według przyjętych kryteriów. W artykule przedstawiony został przegląd rozwiązań dotyczących problemu doboru zestawu czujników pomiarowych w układach diagnostyki.

1. Problem doboru sieci sensorów

Przegląd metod i kryteriów doboru sieci sensorów dla procesów przemysłowych przedstawił Bagajewicz [1, 2]. Podstawowym zadaniem zespołu czujników pomiarowych jest estymacja zmiennych procesowych istotnych dla celów sterowania, monitorowania lub optymalizacji procesu. Należy zwrócić uwagę, że nie wszystkie kluczowe zmienne muszą być bezpośrednio mierzone. Część z nich może być wyznaczana na podstawie pozostałych pomiarów za pomocą znanych zależności. Do oceny sieci sensorów mogą być wykorzystywane następujące kryteria:

- minimalny koszt lub minimalna liczba sensorów,
- dokładność pomiarów,
- maksymalna niezawodność, czyli minimalne prawdopodobieństwo uszkodzenia,
- możliwość wykrywania uszkodzonych sensorów,
- zdolność do estymacji wartości kluczowych zmiennych przy uszkodzonych sensorach,
- zdolność do eliminacji efektów nieprawidłowej kalibracji sensorów.

Zadania wykrywania uszkodzeń sieci i prawidłowej pracy w przypadku występowania uszkodzeń lub błędów kalibracji mogą być realizowane tylko wtedy, jeśli w systemie występuje pewna redundancja (sprzętowa lub analityczna). W pracy [21] przedstawiona została metoda projektowania sieci sensorów odpornej na uszkodzenia. Metody projektowania układów czujników pomiarowych, zapewniających obserwowalność procesu i optymalnych pod względem różnych kryteriów można znaleźć między innymi w pracach [6, 13, 18]. Bagajewicz [1, 2] wskazuje, że problem doboru zbioru pomiarów dla celów diagnostyki jest ciągle otwarty.

2. Dobór sensorów dla celów diagnostyki

Sieć sensorów wykorzystywanych przez system diagnostyczny powinna być dobierana według któregoś lub kilku z powyższych ogólnych kryteriów. Ponadto powinna umożliwiać realizację następujących celów:

- wykrywalność danego zbioru uszkodzeń,
- założony poziom rozróżnialności uszkodzeń.

Należy zwrócić uwagę, że dodawanie kolejnych czujników pomiarowych powiększa zbiór możliwych uszkodzeń o uszkodzenie nowego sensora. Przy projektowaniu systemu diagnostycznego należy zatem podjąć decyzję, czy uszkodzenia dodatkowych czujników pomiarowych również mają być wykrywalne i rozróżnialne.

W ciągu ostatnich dziesięciu lat powstało wiele prac podejmujących problem projektowania sieci sensorów na potrzeby systemu diagnostycznego. Dla

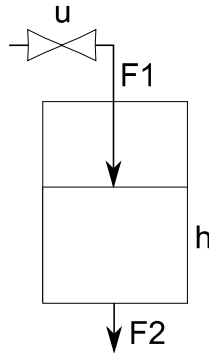
rozwiązania problemu doboru sieci sensorów najistotniejsze są związki pomiędzy zmiennymi procesowymi, dlatego większość prac opiera się na analizie strukturalnej lub reprezentacji procesu w postaci grafu. Zaletą takiego podejścia jest uniezależnienie rozwiązania od charakteru zależności opisujących proces. Sposób rozwiązania jest taki sam niezależnie, czy proces jest opisany liniowymi równaniami różniczkowymi, zależnościami nieliniowymi czy np. w postaci tabelic. Rozwiązania te zostaną bliżej opisane w następnych częściach artykułu. Propozycję rozwiązania dla procesu opisanego liniowymi równaniami różniczkowymi można znaleźć w pracy [15].

3. Rozwiązania wykorzystujące przeszukiwanie grafu

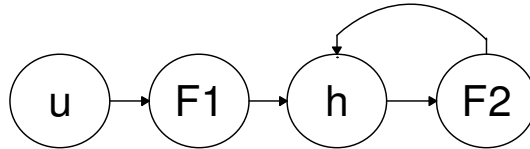
Problem doboru sieci sensorów odpowiedniej dla systemu diagnostycznego był rozważany dla procesu przedstawionego za pomocą Bond-grafu [11]. W pracach [7, 8] przedstawiona została metoda doboru sensorów oparta na reprezentacji równań opisujących proces w postaci grafu skierowanego. Autorzy swoje rozwiązanie opierają na separatorach wejść-wyjść. Poszukiwany jest zbiór residuów, takich, że każde z nich jest wrażliwe tylko na jedno uszkodzenie, co wydaje się założeniem trudnym do realizacji w praktyce. Ponadto dopuszczona jest możliwość pomiaru samego uszkodzenia, co również często jest niemożliwe do zrealizowania.

W pracach [3, 4] przedstawione jest rozwiązanie problemu dla procesu przedstawionego w postaci grafu obrazującego związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy zmiennymi. Brana jest pod uwagę możliwość uwzględnienia kierunku oddziaływań pomiędzy zmiennymi w postaci znaków + i – umieszczanych przy krawędziach grafu. Ciekawym spostrzeżeniem jest uwzględnienie możliwości dodawania kilku sensorów mierzących jedną zmienną. Pozwala to na prawidłowe działanie układu diagnostycznego w przypadku awarii jednego z czujników pomiarowych. W pracy [23] dla podobnego podejścia przeprowadzona została analiza uwzględniająca prawdopodobieństwa fałszywych alarmów generowanych przez system diagnostyczny. Metoda poszukiwania optymalnego zbioru sensorów dla procesu przedstawionego w postaci grafu zostanie przedstawiona bliżej dla prostego przykładu.

Weźmy układ zbiornika przedstawiony na rysunku (rys. 1). Dopływ wody do zbiornika oznaczony jest $F1$, odpływ $F2$, poziom h , a położenie grzyba zaworu u . Układ możemy przedstawić za pomocą grafu obrazującego zależności między zmiennymi. Graf przyczynowo-skutkowy dla układu zbiornika przedstawiony jest na rysunku (rys. 2).

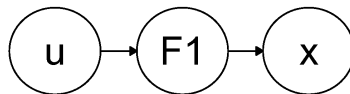


Rys. 1. Układ zbiornika



Rys. 2. Graf układu zbiornika

Pierwszym krokiem przy wyszukiwaniu odpowiedniego zbioru sensorów jest znalezienie wszystkich cykli w grafie i zastąpienie każdego cyklu jednym wspólnym wierzchołkiem. Uproszczony graf dla układu zbiornika przedstawiony jest na rysunku (rys. 3). Wierzchołki $F2$ i h zostały zastąpione jednym wspólnym wierzchołkiem x .



Rys. 3. Graf układu zbiornika po usunięciu cykli

Następnie wyszukiwane są wierzchołki posiadające jedynie wchodzące krawędzie. Zbiór takich wierzchołków jest wrażliwy na wpływ wszystkich pozostałych zmiennych w procesie (przy założeniu, że graf jest spójny). Według [3, 4] pomiar zmiennych odpowiadających takim wierzchołkom wystarcza dla wykrywalności wszystkich uszkodzeń. Dla przykładu zbiornika takim wierzchołkiem jest x , co oznacza, że wystarczający jest pomiar jednej z wielkości tworzących wierzchołek x , czyli h lub $F2$. Należy zwrócić uwagę, że detekcja

uszkodzenia jest tu utożsamiana z przekroczeniem granic alarmowych przez pewne wielkości mierzone, np. poziom w zbiorniku h . Takie podejście powoduje jednak znaczne wydłużenie czasu do wykrycia dużych uszkodzeń i możliwość pominięcia mniejszych uszkodzeń. Czasem wpływ uszkodzeń może być maskowany przez układy regulacji. Przykładowo wyciek ze zbiornika może być maskowany przez układ regulacji poziomu.

Uszkodzenia, rozumiane jako przekroczenie granic alarmowych przez zmienne procesowe są rozróżniane na podstawie różnych zbiorów zmiennych na które mają wpływ. Przykładowo zmniejszenie poziomu w zbiorniku będzie miało wpływ na zmniejszenie wypływu $F2$, ale nie będzie wpływać na strumień dopływający do zbiornika $F1$. Autorzy [3, 4] proponują „zachłanny” algorytm poszukiwań, który nie zawsze znajduje rozwiązanie optymalne.

4. Rozwiązania wykorzystujące analizę strukturalną

W ostatnich latach powstało wiele prac wykorzystujących analizę strukturalną na potrzeby projektowania systemów diagnostycznych [5]. Diagnostyka systemu prowadzona jest w oparciu o residua generowane na podstawie redundancji analitycznej. Przykładowo wypływ ze zbiornika $F2$ można obliczyć na podstawie poziomu h . Różnica między pomiarem $F2$ a wyliczoną wartością może oznaczać uszkodzenie, polegające np. na przytkaniu odpływu. Analiza strukturalna jest wygodnym narzędziem do wyszukiwania tego typu analitycznej redundancji [12]. Co za tym idzie, powstały prace dotyczące doboru optymalnego zbioru sensorów spełniających określone wymagania dotyczące diagnostyki. W pracy [16] zaproponowany został algorytm dodawania kolejnych sensorów według kryterium minimalnego kosztu, nie ma możliwości kilkukrotnego pomiaru tej samej zmiennej. W pracach [17, 22] podane są algorytmy badające wszystkie możliwe kombinacje czujników pomiarowych. Dla takich algorytmów czas obliczeń rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem liczby mierzalnych zmiennych i dla większych procesów może być nieakceptowalny. W pracy [20] do przeszukiwania wykorzystywane są algorytmy genetyczne, optymalizowanym kryterium jest stosunek liczby rozróżnialnych klas uszkodzeń do całkowitego kosztu. Chromosomy są ciągami zer i jedynek oznaczającymi umieszczenie lub nie czujnika pomiarowego w danym miejscu. Problematyka doboru sensorów na potrzeby diagnostyki za pomocą analizy strukturalnej poruszana jest również w pracach [9, 24]. Bliżej przedstawione zostanie rozwiązanie zaprezentowane w pracy [10].

Sposób doboru sensorów rozważymy na przykładzie układu zbiornika. Układ można opisać za pomocą następujących równań:

$$F1 = f(u) \tag{1}$$

$$\frac{dh}{dt} = F1 - F2 \quad (2)$$

$$F2 = c\sqrt{h} \quad (3)$$

Strukturę zależności między zmiennymi występującymi w równaniach można zapisać w postaci macierzy widocznej w tabeli (tab. 1).

Tabela 1. Zależności pomiędzy zmiennymi występującymi w równaniach dla układu zbiornika

Równanie	u	$F1$	h	$F2$
e1	1	1	0	0
e2	0	1	1	1
e3	0	0	1	1

Przy czterech nieznanach zmiennych i trzech równaniach opisujących układ nie możemy podać rozwiązania. Wprowadźmy dodatkowe znane zmienne związane z sygnałami pomiarowymi i sygnałem sterującym. Niech CV oznacza sygnał sterujący położeniem zaworu, Yh pomiar poziomu w zbiorniku i $YF2$ pomiar przepływu na odpływie ze zbiornika. Jeśli sterowanie i czujniki pomiarowe działają poprawnie, to możemy dodać kolejne równania:

$$u = CV \quad (4)$$

$$h = Yh \quad (5)$$

$$F2 = YF2 \quad (6)$$

Po dodaniu znanych zmiennych otrzymujemy macierz opisującą zależności występujące w układzie przedstawioną w tabeli (tab. 2).

Tabela 2. Macierz zależności z uwzględnieniem znanych zmiennych

Równanie	u	$F1$	h	$F2$	Yh	$YF2$	CV
e1	1	1	0	0	0	0	0
e2	0	1	1	1	0	0	0
e3	0	0	1	1	0	0	0
e4	0	0	1	0	1	0	0
e5	0	0	0	1	0	1	0
e6	1	0	0	0	0	0	1

Przed zaprojektowaniem systemu diagnostycznego należy określić zbiór możliwych uszkodzeń. Dla układu zbiornika mogą występować uszkodzenia przedstawione w tabeli (tab. 3).

Tabela 3. Uszkodzenia

	Uszkodzenie
f1	uszkodzenie toru pomiarowego h
f2	uszkodzenie toru pomiarowego $F2$
f3	uszkodzenie toru sterującego
f4	wyciek ze zbiornika
f5	uszkodzenie zaworu
f6	przytkanie odpływu

Wpływ uszkodzeń na pracę układu reprezentowany jest jako zaburzenie zgodności odpowiednich równań. Wpływ uszkodzeń na poszczególne równania przedstawiony jest w tabeli (tab. 4).

Tabela 4. Macierz zależności z uwzględnieniem znanych zmiennych

Równanie	f1	f2	f3	f4	f5	f6
e1	0	0	0	0	1	0
e2	0	0	0	1	0	0
e3	0	0	0	0	0	1
e4	1	0	0	0	0	0
e5	0	1	0	0	0	0
e6	0	0	1	0	0	0

Algorytm wyznaczania zbioru sensorów zapewniającego wykrywalność i rozróżnialność wszystkich uszkodzeń wykonuje następujące kroki. Najpierw układ dzielony jest na zbiory zmiennych wzajemnie powiązanych o takiej samej liczbie nieznanymi zmiennymi i równań. Wymagane jest, aby w sytuacji początkowej cały proces był obserwowalny. Następnie określana jest kolejność wyznaczania poszczególnych zmiennych na podstawie równań. Potem dodawane jest kolejne równanie obrazujące pomiar jednej ze zmiennych. Jeżeli pomiar zapewnia odpowiednią redundancję, tzn. można wykryć niezgodności w każdym z pozostałych równań, to wszystkie uszkodzenia oddziałujące na dany podzbiór równań są wykrywalne. Dla każdego podzbioru sensorów zapewniających wykrywalność uszkodzeń przeprowadzana jest analiza rozróżnialności. Przy analizie rozróżnialności danego uszkodzenia od pozostałych usuwane jest równanie, na które wpływa dane uszkodzenie. Następnie powtarzany jest algorytm zapewniający wykrywalność wszystkich uszkodzeń. Uszkodzenia wykrywalne w układzie bez usuniętego równania są rozróżnialne od danego uszkodzenia. Krok ten jest powtarzany dla wszystkich uszkodzeń. Zbiór sensorów zapewniających maksymalną rozróżnialność uszkodzeń jest sumą zbiorów zapewniających rozróżnialności poszczególnych uszkodzeń.

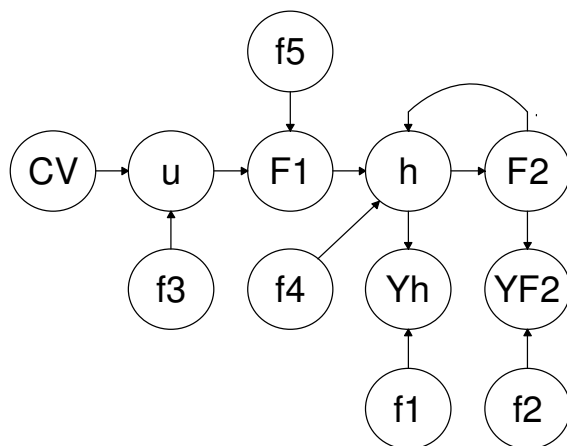
Dla rozważanego przykładu obliczenia zostały wykonane za pomocą programu SensPlaceTool [19]. Wyniki obliczeń wskazują, że należy dodać pomiar $F1$. Zapewnia to wykrywalność wszystkich uszkodzeń i rozróżnialność uszkodzeń $f1, f2$ i $f6$. Uszkodzenia $f3, f4$ i $f5$ są nierozróżnialne.

5. Propozycja nowego podejścia do problemu

Przedstawione powyżej rozwiązania oparte na grafie przyczynowo-skutkowym nie biorą pod uwagę występowania redundancji, potrzebnej dla skutecznej detekcji uszkodzeń. Analiza strukturalna wymaga znajomości równań opisujących proces, a przynajmniej ich struktury. Ponadto wymagane jest, aby na podstawie istniejących pomiarów dawało się wyznaczyć wartości wszystkich uwzględnianych w analizie zmiennych procesowych. Dla bardziej skomplikowanych procesów, zwłaszcza w fazie projektu, założenie to nie musi być spełnione. Ponadto właściwie wszystkie rozwiązania oparte są o residua generowane na podstawie znanych analitycznych zależności. W ostatnim czasie w diagnostyce coraz większą rolę odgrywają rozmyte i neuronowe modele procesów i potrzebne jest narzędzie uwzględniające możliwości zastosowania tych modeli w systemach diagnostycznych.

Kolejnym problemem jest forma uwzględniania uszkodzeń. W podejściach opartych na analizie strukturalnej uszkodzenia uwzględniane są jako kolejne zmienne w równaniach. Kilka uszkodzeń zaburzających to samo równanie jest z założenia nierozróżnialne.

Zadanie projektowania zbioru sensorów odpowiedniego dla celów diagnostyki można oprzeć o graf przyczynowo-skutkowy procesu zdefiniowany w pracy [14]. Taki graf dla układu zbiornika przedstawiony jest na rysunku (rys. 4).



Rys. 4. Graf układu zbiornika z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń i pomiarów

Istotną różnicą w stosunku do dotychczas wykorzystywanych grafów jest bezpośrednio uwzględnienie uszkodzeń w grafie jako dodatkowych wierzchołków. Uwzględnione zostały również czujniki pomiarowe i sygnał sterujący.

Graf przyczynowo-skutkowy ma następujące pozytywne cechy, które mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu systemów diagnostycznych:

- Wymagana jest jedynie wiedza jakościowa o procesie.
- Wygodny sposób uwzględniania uszkodzeń.
- Możliwość analizy propagacji uszkodzeń.
- Możliwość wyznaczania struktur modeli rozmytych i neuronowych wykorzystywanych w diagnostyce
- Prosty sposób uwzględnienia kierunków zależności pomiędzy zmiennymi (oddziaływanie na plus lub na minus).

Podsumowanie

Przedstawiony został stan badań dotyczących doboru sensorów na potrzeby systemów diagnostycznych. Na prostym przykładzie układu zbiornika przedstawione zostały wybrane metody. Na zakończenie przedstawiony został pomysł alternatywnego podejścia do problemu. Proponowane podejście oparte jest na jakościowym opisie procesu w postaci grafu przyczynowo-skutkowego. Takie podejście nie wymaga znajomości równań opisujących proces i pozwala na uwzględnienie wpływu uszkodzeń bezpośrednio w opisie procesu. Pozwala również na analizę pewnych niepodejmowanych wcześniej problemów, takich jak residua budowane na podstawie modeli neuronowych lub rozmytych.

Bibliografia

1. Bagajewicz M.J.: *Process Plant Instrumentation: Design and Upgrade*. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania 2001.
2. Bagajewicz M.J.: A review of techniques for instrumentation design and upgrade in process plants. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2002, 80(1), 3–16.
3. Bhushan M., Narasimhan S., Rengaswamy R.: Robust sensor network design for fault diagnosis. *Computers & Chemical Engineering*. 2008, 32(4–5), 1067–1084.
4. Bhushan M., Rengaswamy R.: Design of sensor location based on various fault diagnostic observability and reliability criteria. *Computers & Chemical Engineering*. 2001, 24(2–7), 735–741.
5. Blanke M., Kinnert M., Lunze J., Staroswiecki M.: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer, Berlin 2003.
6. Chamseddine A., Noura H., Ouladsine M., Raharijaon T.: Observability of complex systems: Minimal cost sensor network design. 17th World Con-

- gress The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea. 2008.
7. Commault C., Dion J.M.: Optimal sensor location for fault detection and isolation in linear structured systems. European Control Conference. 2003.
 8. Commault C., Dion J.M., Agha S.Y.: Structural analysis for the sensor location problem in fault detection and isolation. *Automatica*. 2008, 44(8), 2074–2080.
 9. Düstegör D., Frisk E., Cocquempot V., Krysander M., Staroswiecki M.: 2006. Structural analysis of fault isolability in the damadics benchmark. *Control Engineering Practice*. 2006, 14(6), 597–608.
 10. Frisk E., Krysander M.: Sensor placement for maximum fault isolability. 2007.
 11. Khemliche M., Bouamama B.O., Haffaf H.: Sensor placement for component diagnosability using bond-graph. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006, 132(2), 547–556.
 12. Krysander M., Nyberg M.: Structural analysis for fault diagnosis of dae systems utilizing graph theory and mss sets. 2002.
 13. Meyer M., Lann J.M.L., Koehret B., Enjalbert M.: Optimal selection of sensor location on a complex plant, using a graph oriented approach. *Computers & Chemical Engineering*. 1994, 18(1), 535–540.
 14. Ostasz A.: Graf przyczynowo-skutkowy procesu i jego zastosowanie w wyznaczaniu zbioru residuów i relacji diagnostycznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.
 15. Peng T., Xie Y., Gui W., Chen J.: Optimum design for fault detection filter with sensor location. WRI Global Congress on Intelligent Systems. 2009, 207–210.
 16. Rosich A., Sarrate R., Puig V., Escobet T.: Efficient optimal sensor placement for model-based fdi using an incremental algorithm. 46th IEEE Conference on Decision and Control. 2007, 2590–2595.
 17. Sarrate R., Puig V., Escobet T., Rosich A.: Optimal sensor placement for model-based fault detection and isolation. 46th IEEE Conference on Decision and Control. 2007, 2584–2589.
 18. Sen S., Narasimhan S., Deb K.: Sensor network design of linear processes using genetic algorithms. *Computers & Chemical Engineering*. 1998, 22(3), 385–390.
 19. SensPlaceTool 2009. Strona internetowa <http://www.fs.isy.liu.se/software/sensplacetool/>.
 20. Spanache S., Escobet T., Travé-Massuyès L.: Sensor placement optimization using genetic algorithms. Proceedings of the 15th International Workshop on Principles of Diagnosis. 2004.

21. Staroswiecki M., Hoblos G., Aitouche A.: Sensor network design for fault tolerant estimation. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2004, 18(1), 55–72.
22. Travé-Massuyès L., Escobet T., Milne R.: Model-based diagnosability and sensor placement application to a frame 6 gas turbine subsystem. *17th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2001.
23. Yang F., Xiao D., Shah S.L.: Optimal sensor location design for reliable fault detection in presence of false alarm. *Sensors*. 2009, 9, 8579–859.
24. Yassine A.A., Ploix S., Flaus J.M.: A method for sensor placement taking into account diagnosability criteria. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2008, 18(4), 497–512.

Recenzenci:
Wiesław WAJS
Jerzy GŁUCH
Andrzej MAJCHER

The problem of optimal sensor placement for fault detection and isolation

Key words

Diagnosis, sensor network, structural analysis, cause-effect graph.

Summary

In this article, a review of publications related to sensor placement for the diagnosis of process plants is presented. The main tasks of a sensor network and criteria used for sensors selection are indicated. A summary of methods used for the best selection of measurements is presented. Particular attention is devoted to solutions based on structural analysis and algorithms using a graph as a model of the monitored process plant. A simple example of single tank system is presented and results obtained on this system using different methods of sensor placement are compared. At the end of the article, an idea for a new problem description using a cause-effect graph is presented. A cause-effect graph is a qualitative model of a process plant containing casual relationships between process variables. This kind of process description allows one to directly include faults in the model. Other advantages of that description are mentioned.