

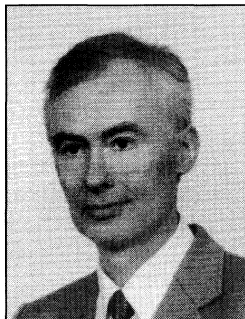
## Piotr WASIEWICZ, Michał BARTYŚ, Bogdan SOCHAN

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I ROBOTYKI  
CUKROWNIA LUBLIN S.A.

### Diagnostyka urządzeń wykonawczych automatyki – badania przemysłowe<sup>1</sup>

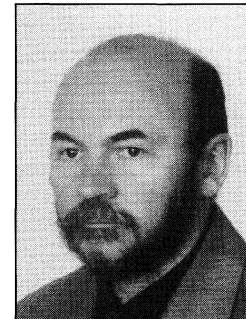
#### dr inż. Michał BARTYŚ

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Automatyki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Autor zajmuje się zawodowo zagadnieniami związanymi z konstrukcją inteligentnych przetworników i elementów wykonawczych automatyki, układami sterowania cyfrowego, sieciami komputerowymi automatyki, zastosowaniami logiki rozmytej w automatyce. Autor ok. 60 publikacji, 21 konstrukcji unikalnych przyrządów, 4 patentów i jednego wdrożenia przemysłowego.



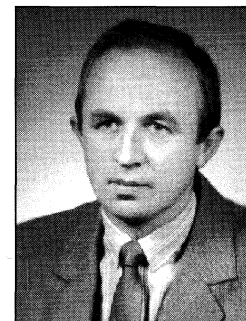
#### dr inż. Piotr WASIEWICZ

Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Automatyki I Robotyki Politechniki Warszawskiej. Autor zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi diagnostyki procesów przemysłowych i układów automatyki tolerujących uszkodzenia oraz zastosowaniami przemysłowymi i szkoleniem w zakresie sterowników programowalnych PLC oraz systemów SCADA – monitorowania i nadzorowania procesów przemysłowych.



#### mgr inż. Bogdan SOCHAN

Jest kierownikiem Działu Automatyki w Cukrowni Lublin S.A. Autor jest członkiem sekcji technicznej Stowarzyszenia Techników Cukrowników, w którym pracuje na rzecz upowszechnienia postępu techniczno - organizacyjnego w przemyśle. Współpracuje ze specjalistami Instytutu Przemysłu Cukrowniczego, Politechniki Łódzkiej, Warszawskiej i Lubelskiej oraz Akademii Rolniczej w Lublinie. Wykorzystując swoje zdolności pedagogiczno - dydaktyczne jest nauczycielem zawodu w Lubelskim Centrum Edukacji Zawodowej oraz konsultantem i opiekunem studentów, praktykantów oraz autorów prac naukowych.



#### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano przyjętą koncepcję badań przemysłowych dla potrzeb weryfikacji algorytmów diagnostycznych dla urządzeń wykonawczych. Badania prowadzone są w ramach projektu RTN-5FP (2000-2003): *DAMADICS*, sponsorowanego przez Unię Europejską oraz Komitet Badań Naukowych. Badane są głównie metody sztucznej inteligencji bazujące na sieciach neuronowych i logice rozmytej. Obiektem badań są trzy odpowiedzialne urządzenia wykonawcze ze stacji wyparnej i walczaka kotła parowego Cukrowni Lublin S.A. Dla celów badawczych wprowadzono szereg sztucznych uszkodzeń tych zaworów w czasie kampanii cukrowniczej 2001. Dla celów badań porównawczych przygotowano również odpowiedni model elementu wykonawczego w środowisku Matlab-Simulink. Zamieszczono wstępne wyniki badań.

#### Abstract

The idea of industrial investigations for verification of diagnostic algorithms for actuators has been given in the paper. The research is performed in the framework of RTN-5FP (2000-2003): *DAMADICS* project granted by European Union and National Research Committee - KBN. The methods of artificial intelligence based on neural networks and fuzzy logic are mainly considered. The diagnostic object consists of three chosen actuators installed in evaporation station and steam boiler of „Lublin” Sugar Factory. A number of artificial faults have been introduced into the process during sugar campaign 2001. The appropriate model of actuator in the Matlab-Simulink environment has been also prepared. Initial research results has been shown also.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, systemy SCADA, modelowanie układów dynamicznych, uszkodzenia elementów wykonawczych automatyki

#### 1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono zakres badań przemysłowych realizowanych w projekcie *RTN*, w ramach Piątego Programu Ramowego Unii Europejskiej, pt.: *Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems, DAMADICS* (2000-2003). W realizacji projektu bierze udział 8 znanych w Europie zespołów badawczych w zakresie diagnostyki: z Wielkiej Brytanii, Francji, Hiszpanii, Portugalii, Niemiec, Włoch, i Polski. Koordynatorem projektu jest prof. Ronald J. Patton z University of Hull w Wielkiej Brytanii. Koordynatorem zespołu Instytutu Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej (IAiR PW) jest prof. Jan M. Kościelny, natomiast koordynatorem zespołu Instytutu Sterowania i Systemów Informatycznych Uniwersytetu Zielonogórskiego jest prof. Józef Korbicz). Partnerem przemysłowym jest Cukrownia Lublin S.A.

Głównym celem projektu jest prowadzenie badań i szkoleń w zakresie rozwoju i integracji metod diagnostyki (metody analityczne, metody sztucznej inteligencji wykorzystujące sieci neuronowe i logikę rozmytą, metody jakościowe, strukturalne, statystyczne oraz grafy przyczynowo-skutkowe, tzw. bond-grafy). Badania porównawcze różnych metod diagnostycznych stosowanych przez poszczególne zespoły badawcze prowadzone są z wykorzystaniem danych procesowych, pochodzących z Cukrowni Lublin, w której zainstalowano specjalną stację archiwizacji danych pomiarowych dotyczących trzech wytypowanych urządzeń

<sup>1)</sup> Pracę wykonano częściowo w ramach realizacji projektu *DAMADICS* piątego programu ramowego Unii Europejskiej nr HPRN-CT-2000-00110 pt. *Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems* oraz projektu KBN na mocy decyzji nr 134/E-365/SPUB-M/5PR UE/DZ 55/2001.

wykonawczych, mających kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa procesu. Dodatkowo w kampanii cukrowniczej 2001 wprowadzone zostały fizyczne uszkodzenia tych urządzeń wykonawczych. Dane te zostały udostępnione na specjalnie przygotowanym w IAiR PW serwerze internetowym.

Badania prowadzone w ramach projektu są skoncentrowane na zagadnieniach:

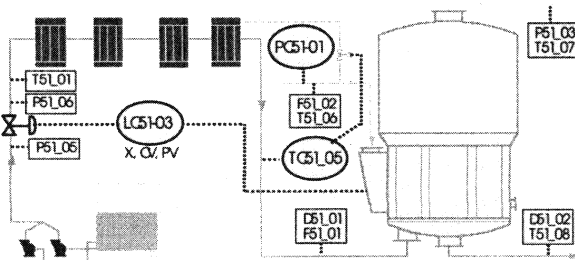
- modelowania rozmytego dla potrzeb detekcji uszkodzeń urządzeń wykonawczych
- detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem modeli rozmytych i neuronowych
- zastosowania wnioskowania rozmytego do lokalizacji uszkodzeń.

Dla detekcji uszkodzeń rozwijane są algorytmy bazujące na zmodyfikowanych modelach rozmytych Wang'a i Mendel'a [5] oraz rozmyte sieci neuronowe. Badania obejmują również algorytmy wykorzystujące sieci perceptronowe. Oddzielne badania dotyczą lokalizacji uszkodzeń z zastosowaniem logiki rozmytej i rozmytych sieci neuronowych. Baza reguł jest generowana na podstawie binarnej macierzy diagnostycznej lub systemu informacyjnego opisującego relację uszkodzenia-symptomy [4]. Rozmyta ocena reszduów umożliwia uwzględnienie niepewności symptomów.

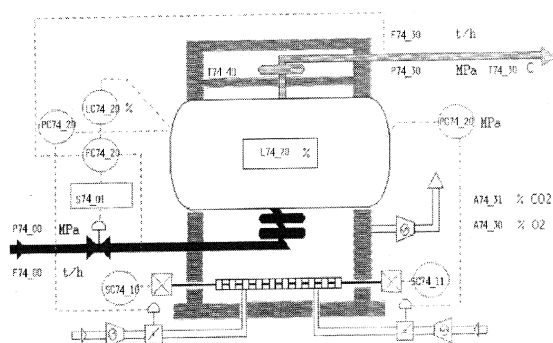
## 2. BADANIA PRZEMYSŁOWE W CUKROWNI LUBLIN

Do badań wytypowano trzy zawory:

- zawór na dopływie soku rzadkiego do stacji wyparnej w układzie regulacji poziomu soku w pierwszej wyparce - LC51\_03 (rys.1)
- zawór na odpływie soku gęstego ze stacji wyparnej w układzie regulacji przepływu soku - FC57\_03
- zawór na dopływie wody do kotła parowego w układzie regulacji poziomu wody w walczaku - LC74\_20 (rys.2).

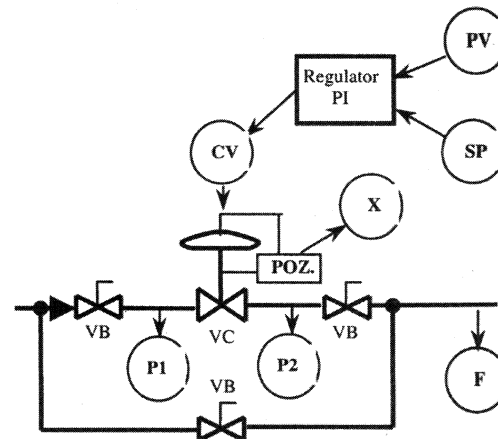


Rys.1. Schemat synoptyczny pierwszej sekcji stacji wyparnej CUKROWNI LUBLIN S.A. LC51-03 - zawór w układzie regulacji poziomu soku rzadkiego.



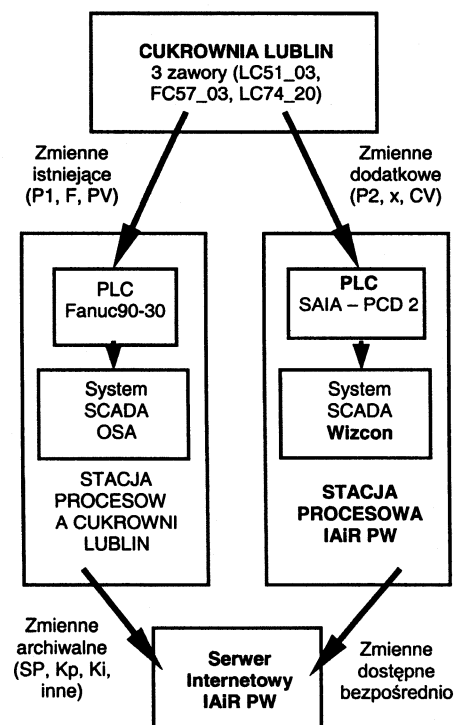
Rys. 2. Schemat synoptyczny kotła parowego w CUKROWNI LUBLIN S.A. LC74\_20 - zawór w układzie regulacji poziomu wody w walczaku.

Każde urządzenie wykonawcze wyposażone zostało w jednakowy zestaw siedmiu przetworników pomiarowych (Rys.3), umożliwiającą uzyskanie danych pomiarowych niezbędnych do detekcji i lokalizacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych rozważanych samodzielnie, w oderwaniu od procesu i pozostałych elementów układu regulacji.



Rys.3. Schemat urządzenia wykonawczego z wykazem zmiennych pomiarowych. Symbole: VC - zawór regulacyjny, VB - zawory bocznikujące, POZ. - pozycjoner, Regulator PI sterownika programowalnego Fanuc90-30 cukrowni Lublin, PV - zmienna procesowa, SP - wartość zadana, CV - sygnał sterujący, X - położenie tłoczyska siłownika zaworu, P<sub>1</sub> - ciśnienie medium przed zaworem, P<sub>2</sub> - ciśnienie medium za zaworem, F - natężenie przepływu medium (w przypadku układów regulacji LC51\_03 oraz FC57\_03 medium stanowi sok a w przypadku LC74\_20 - woda).

Badania prowadzone w ramach projektu DAMADICS obejmują również metody diagnostyczne wymagające uwzględnienia urządzenia wykonawczego wraz z całym układem regulacji. Przykładem może tu być metoda banków obserwatorów GOS (Generalized Observer Scheme) [6]. Tego typu metody wymagają dysponowania modelami matematycznymi procesów. W związku z tym, oprócz danych związanych bezpośrednio z urządzeniami wy-



Rys. 4. Schemat stacji procesowej w Cukrowni Lublin

konawczymi, archiwizowane zostały dodatkowo ważniejsze zmienne procesowe, na które wpływ ma stan każdego z wytypowanych zaworów (łącznie 32 zmienne z okresem próbkowania 1 s). Schemat ideowy stacji procesowej zainstalowanej dla potrzeb projektu DAMADICS w Cukrowni Lublin przedstawiono na rys. 4.

### 3. IDEA BADAŃ PORÓWNAWCZYCH

W projekcie DAMADICS przygotowano dwa profile badań pozwalających na ocenę przydatności praktycznej rozwijanych algorytmów detekcji i lokalizacji uszkodzeń.

- badania porównawcze bazujące na modelach symulacyjnych procesu oraz
- badania porównawcze z wykorzystaniem rzeczywistych danych procesowych uzyskanych w stanach pracy normalnej i w stanach sztucznie generowanych uszkodzeń.

Dla realizacji badań porównawczych bazujących na modelach symulacyjnych przygotowano odpowiedni model referencyjny elementu wykonawczego automatyki [1] w środowisku Matlab-Simulink. Model ten umożliwia symulację do 19 uszkodzeń pojedynczych lub wielokrotnych, zarówno o charakterze katastroficznym jak i o charakterze uszkodzeń wolno narastających. Model ten może być wykorzystywany jako generator ciągów uczących dla stanów awaryjnych. Model może być wykorzystywany także na etapie oceny przydatności aplikacyjnej rozwijanych algorytmów FDI.

Badania z wykorzystaniem rzeczywistych danych procesowych ze stanów z uszkodzeniami wymagają wprowadzenia sztucznych uszkodzeń do procesu. Wynikają z tego określone konsekwencje związane z zachowaniem bezpieczeństwa operatorów procesu, samego procesu i środowiska. Biorąc to pod uwagę skonstruowano odpowiednio scenariusze możliwych uszkodzeń. W odróżnieniu od pierwszego typu badań ograniczono liczbę uszkodzeń możliwych do wprowadzenia.

Dane uzyskane z badań przemysłowych z kampanii cukrowniczej w 2001 roku i dotyczące trzech elementów wykonawczych zainstalowanych w Cukrowni Lublin S.A. wraz ze szczegółową specyfikacją są dostępne w sieci internetowej pod adresem <http://diag.mchtr.pw.edu.pl/damadics>.

### 4. PRZYKŁAD KONIECZNOŚCI STOSOWANIA DIAGNOSTYKI W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH

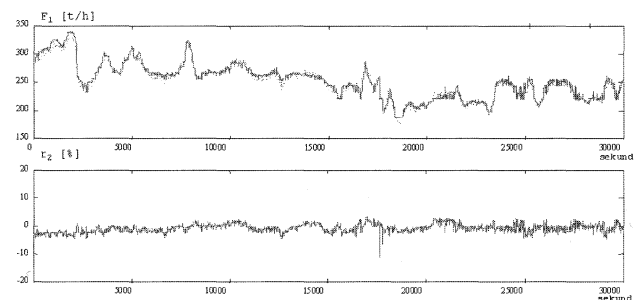
O istotnej roli jaką odgrywa diagnostyka w zastosowaniach przemysłowych nie trzeba nikogo przekonywać zwłaszcza w takich przemysłach jak chemiczny, rafineryjny czy energetyczny. Poniżej podany zostanie przykład ilustrujący możliwość istotnego polepszenia bezpieczeństwa procesu w przemyśle cukrowym. Skoncentrujemy naszą uwagę na pierwszym stopniu stacji wyparnej, której schemat synoptyczny przedstawiono na rys.1. Stacja ta jest typowym i znanym obiektem w wielu cukrowni na całym świecie. Sok buraczany o niskiej zawartości cukru jest tłoczony do pierwszej stacji wyparnej. W stacji wyparnej następuje częściowe odparowanie wody, a zagęszczony sok przekazywany jest do następnego stopnia wyparnego w celu dalszego zagęszczenia. Układ regulacji kontroluje poziom soku w stacji wyparnej oddziałując na element wykonawczy. Wartość zadana poziomu soku w stacji wyparnej wynosi 500mm (50% wartości zadanej) i jest utrzymywana w granicach kilku procent (por. rys. 4). Możliwe są dwa groźne scenariusze rozwoju sytuacji w przypadku uszkodzenia elementu wykonawczego. W pierwszym wariantcie może nastąpić zamknięcie lub istotne zdławienie dopływu soku, w drugim może nastąpić całkowite otwarcie dopływu. W pierwszym przypadku może nastąpić przegrzanie aparatu wyparnego, w drugim przypadku może dojść do sytuacji wyrzutu cząsteczek cukru do oparów i zanieczyszcze-

nie instalacji. Jeśli weźmiemy pod uwagę, że strumień objętościowy przepływu jest rzędu 360m<sup>3</sup>/h, to progi alarmowe zostaną przekroczone po czasie 30s dając jeszcze ok. 30s na reakcję operatora. Jeśli zostałyby zastosowane dostatecznie efektywne algorytmy diagnostyki bieżącej stanu elementu wykonawczego sygnalizujące rozwijające się uszkodzenie, lub dostatecznie szybko wypracowujące diagnozę w przypadku uszkodzenia katastroficznego, to prawdopodobieństwo zaistnienia stanu awarii mogłoby być znacznie mniejsze, a czas reakcji operatora mógłby być istotnie wydłużony.

### 5. PRZYKŁAD MODELU PROCESU UZYSKANY NA PODSTAWIE DANYCH PRZEMYSŁOWYCH

Dostęp do danych procesowych umożliwia tworzenie modeli cząstkowych procesu przy wykorzystaniu metod modelowania bazującego na sieciach neuronowych [2] lub rozmytych sieciach neuronowych [3].

Na rys. 5 pokazano przykład ilustrujący wyniki modelowania strumienia soku rzadkiego przepływającego przez zawór regulacyjny T51\_01 pierwszej stacji wyparnej (rys. 1) W tym przypadku w modelu zastosowano wielowarstwową sieć neuronową. Jak widać z rysunku jakość modelowania w sensie wartości residuum  $r_2$  w stanach bezawaryjnych można uznać za zadawalającą.



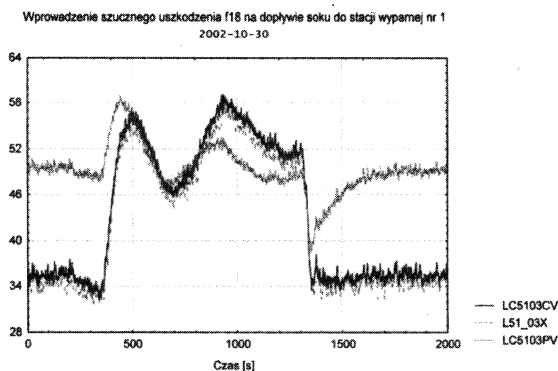
Rys. 5. Przykład wyników modelowania strumienia soku rzadkiego wpływającego do pierwszego stopnia stacji wyparnej (por. rys.1)

### 6. PRZYKŁADY ILUSTRUJĄCY WYNIKI BADAŃ

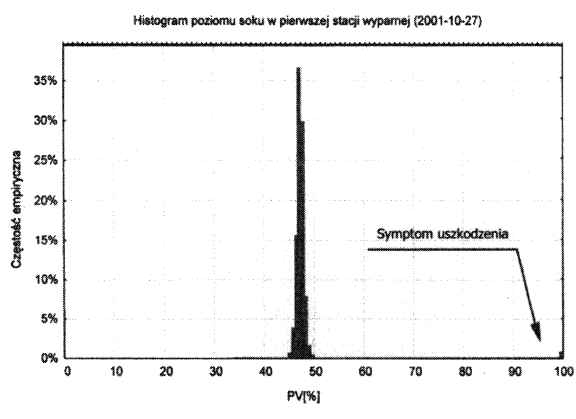
Scenariusz uszkodzeń elementów wykonawczych obejmuje ogółem 19 pozycji tworzących cztery grupy [1]. W pierwszej fazie badań wprowadzono uszkodzenia należące do grupy uszkodzeń zewnętrznych dla trzech wytypowanych zespołów wykonawczych. Przykłady uzyskanych wyników w formie wykresów czasowych uszkodzeń przedstawiono na rys. 6. Na rys. 7 przedstawiono obraz statystyczny sztucznego stanu awaryjnego, a na rys. 8. rekonstrukcję charakterystyki przepływowej zaworu regulacyjnego. Na rys 9. pokazano graficznie detekcyjne właściwości zmiennej zagregowanej jaką może być np. współczynnik przepływowości zaworu.

### 7. PODSUMOWANIE

Wstępne wyniki badań wykazały przydatność rozważanych metod modelowania bazującego na sieciach neuronowych i rozmytych sieciach neuronowych przy tworzeniu modeli cząstkowych procesu z użyciem danych procesowych zebranych w stanach bezawaryjnych. Bardzo wartościowe okazały się również dane archiwalne dotyczące sztucznie wprowadzonych uszkodzeń. W kampanii cukrowniczej 2001 ograniczono się do wprowadzenia uszkodzeń z grupy uszkodzeń zewnętrznych [1]. Natomiast w roku 2002 planuje się generowanie również innych uszkodzeń.



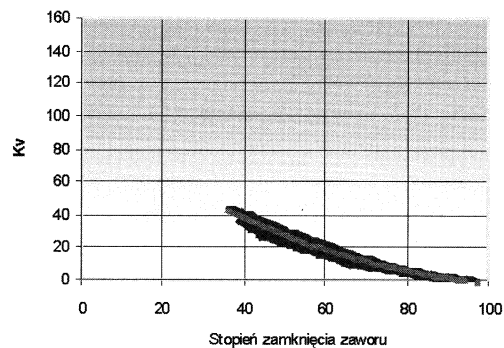
Rys. 6. Wynik wprowadzenia sztucznego uszkodzenia w postaci częściowego otwarcia a następnie zamknięcia zaworu obejściowego (uszkodzenie f18) w układzie elementu wykonawczego sterującego dopływem soku do pierwszego stopnia wyparnego. Widoczne jest wyraźne zdławienie przepływu przez zawór sterujący (wzrost sterowania LC5103CV oraz sygnału stopnia zamknięcia zaworu L51\_03X). Wysoki współczynnik korelacji obu sygnałów (0,85) wskazuje na poprawną pracę zespołu ustawnik pozycyjny-siłownik pneumatyczny.



Rys. 7. Histogram poziomu soku w pierwszej stacji wyparnej w dniu 30-10-2002. Widoczny w prawym dolnym rogu niewielki prostokąt wskazuje na krótkotrwały stan awaryjny (przekroczenie dopuszczalnego poziomu soku w stacji wyparnej)

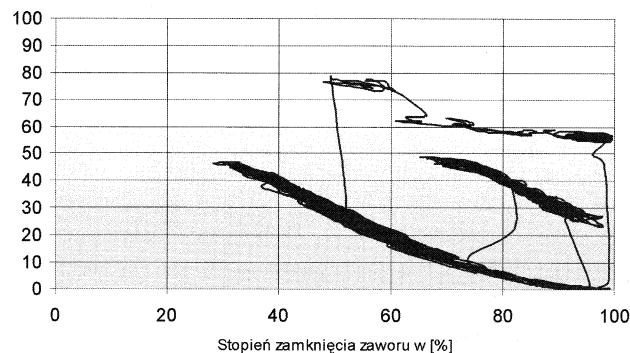
## LITERATURA

- [1] Bartyś M., de las Heras S.: *Model symulacyjny elementu wykonawczego automatyki dla potrzeb badań porównawczych algorytmów do detekcji i izolacji uszkodzeń*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, No 2/2002.
- [2] Korbicz J.: *Sztuczne sieci neuronowe i ich zastosowanie w diagnostyce procesów przemysłowych*. *Pomiary-Automatyka-Kontrola*, No 4/1998, s. 129-133.
- [3] Kościelny J.M., Syfert M., Bartyś M.: *Fuzzy Logic Fault Diagnosis of Industrial Process Actuators*. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol.9, No.3/1999, 653-666.
- [4] Kościelny J.M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów*



Rys. 8. Rekonstrukcja charakterystyki przepływowej zaworu doprowadzającego wodę do kotła. Stan pracy normalnej.

Współczynnik przepływu zaworu Kv  
30 października 2001 wprowadzono sztuczne uszkodzenie f18



Rys. 9. Rekonstrukcja charakterystyki przepływowej zaworu doprowadzającego wodę do kotła. Stan pracy z uszkodzeniami. Symulowano uszkodzenie f18 (częściowe otwarcie odcinającego zaworu obejściowego). Widoczne wyraźnie pozorne zmiany współczynnika przepływu zaworu Kv są symptomatyczne dla nieuszczelnności zewnętrznych torów obejściowych lub wewnętrznych zaworu.

*przemysłowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.

- [5] Kościelny J.M., Jankowska A., Syfert M., Ostasz A., Nowak J.: *Metody detekcji uszkodzeń bazujące na modelach rozmytych i neuronowych - badania dla wybranych obiektów przemysłowych*. IV Krajowa Konferencja N-T „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”, Kazimierz Dolny, 1999, 49-64.
- [6] Frank P.M.: *Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results*, *Automatica*, 1990, Vol. 26, pp. 459-474.