

WOJCIECH Z. CHMIELOWSKI\*

HIERARCHICZNY REGULATOR ROZMYTY  
STERUJĄCY PRZEJŚCIEM FALI POWODZIOWEJ  
PRZEZ ZBIORNIK RETENCYJNY.  
CZEŚĆ II. SYMULACJA

---

HIERARCHICAL FUZZY REGULATOR  
CONTROLLING TRANSFER OF A FLOOD  
WAVE THROUGH A STORAGE RESERVOIR.  
PART II

Streszczenie

Sterowanie procesami technologicznymi (w których model procesu jest wysoce złożony, skomplikowany, nieliniowy i trudny do zrealizowania z zastosowaniem klasycznych regulatorów) może być z powodzeniem przeprowadzone z wykorzystaniem regulatorów rozmytych. W artykule przedstawiono odpowiednio uformowany hierarchiczny regulator rozmyty, który stanowi element układu sterującego przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Przeprowadzono kilka symulacji przejścia fali powodziowej przez zbiornik w funkcji jego początkowego wypełnienia.

*Słowa kluczowe: logika rozmyta, regulatory rozmyte, sterowanie, gospodarka wodna*

Abstract

Technological processes of very complex, complicated and non-linear models are difficult to be controlled by classic regulators but this can be efficiently done with help of fuzzy regulators. In the first part of the paper the authors present basic elements of a fuzzy regulator constructed on the basis of a fuzzy sets theory. The paper presents an hierarchical fuzzy regulator as an element of a system which is to control transformation of a flood wave through a storage reservoir. A couple of simulations were carried out for different initial reservoir capacities.

*Keywords: fuzzy logic, fuzzy logic sets, control, water management*

---

\* Dr hab. inż. Wojciech Z. Chmielowski, prof. PK, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

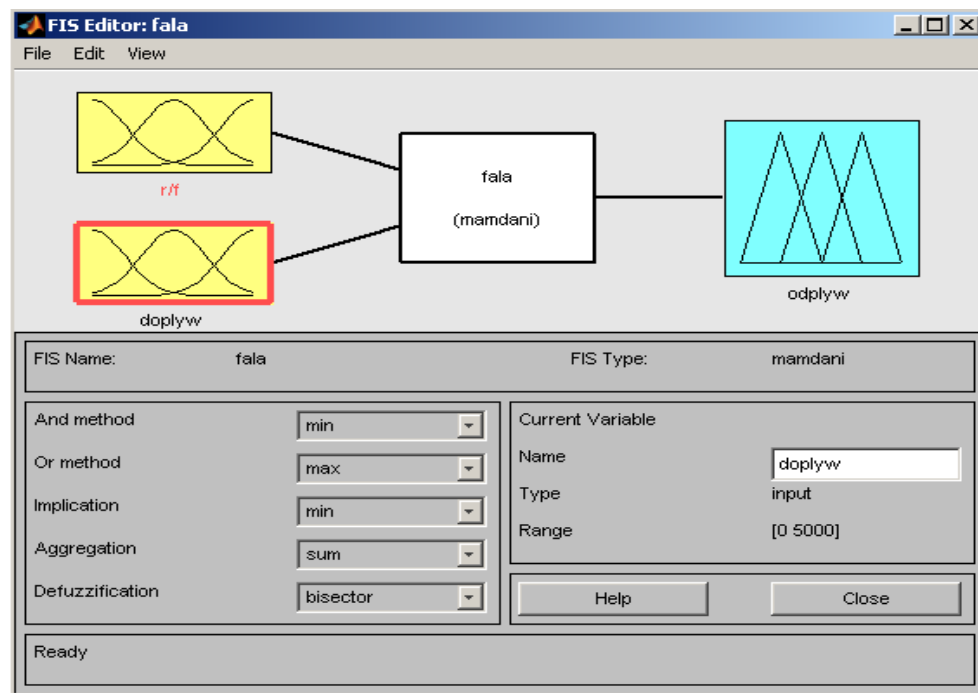
## 1. Wstęp

Regulator rozmyty (*fuzzy set*) oraz symulacyjny układ sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik zrealizowano w środowisku Matlab/Simulink z zastosowaniem modułu (Toolbox) Fuzzy.

Konstrukcję regulatora rozpocząć należy od zdefiniowania, oznaczenia i określenia tzw. FIS (*fuzzy interface system*). Następnie zdefiniowany regulator rozmyty zastosowany zostanie w układzie regulacji. Układ regulacji zrealizowany jest w module Matlab/Simulink. Symulację sterowania falą powodziową przez hipotetyczny zbiornik przeprowadzono na podstawie danych syntetycznych, a dostrojenie parametrów regulatora dokonane zostało z wykorzystaniem AG (algorytmu genetycznego). Zbudowany w ten sposób układ sterowania można testować historycznymi falami powodziowymi zaistniałymi na wybranych zbiornikach, np. w dorzeczu Górnej Wisły.

Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące, co świadczy o niezwyklej skuteczności działania układów deskryptywnego sterowania rozmytego.

## 2. FIS (*fuzzy interface system*)



Ryc. 1. FIS (*fuzzy interface system*). Edytor zmiennych wejściowych, bazy reguł, zmiennych wyjściowych

Fig. 1. FIS (Fuzzy interface system). Editor of input variables, rules and of output variables

Wektor zmiennych wejściowych został zdefiniowany następująco

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T \quad (1)$$

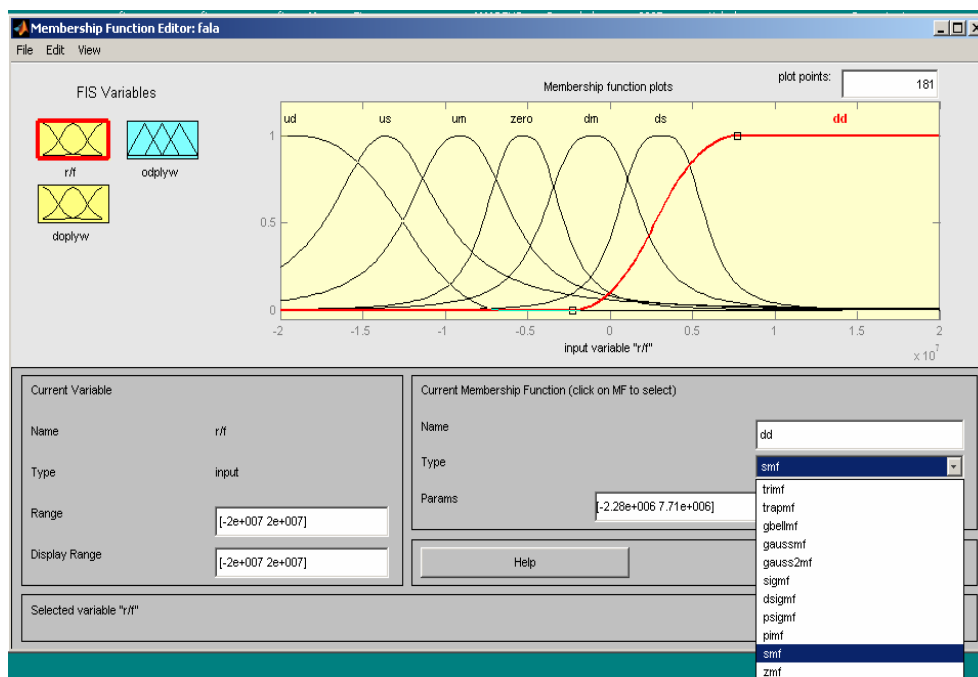
gdzie:

$x_1(t)$  – różnica wynikająca z wolnej objętości zbiornika a prognozowanej objętości fali powodziowej na najbliższe 4 h [m<sup>3</sup>]. Wolna objętość to różnica między pojemnością maksymalną zbiornika a chwilowym stanem zbiornika  $\forall t \in [0, T]$ ,

$x_2(t)$  – rzeczywisty dopływ do zbiornika [m<sup>3</sup>/s]  $\forall t \in [0, T]$ .

Dla wektora  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T$  przyjęto uniwersum  $\mathbf{U}^T = [u_1 \quad u_2]$

$$u_1 = [-2 \cdot 10^7 \quad 2 \cdot 10^7], [m^3] \text{ oraz } u_2 = [0 \quad 5000], [m^3/s]$$



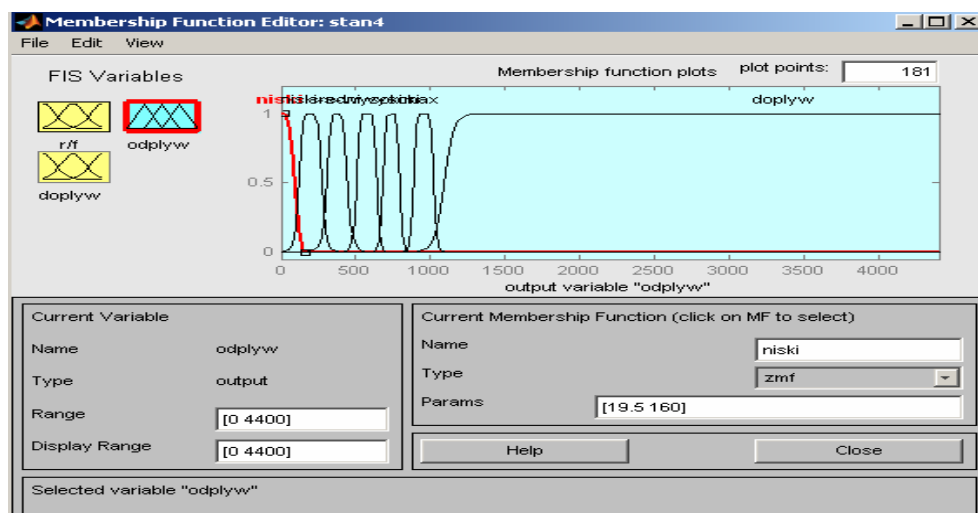
Ryc. 2. Uniwersum i zbiór termów dla zmiennej  $x_1(t)$

Fig. 2. Universum and set of terms for variable  $x_1(t)$

Wektor termów  $\mathbf{T}_{x_1}$  dla zmiennej wejściowej  $x_1(t)$  (ryc. 2) zdefiniowano jak następuje

$$\mathbf{T}_{x_1} = [t_{x_1,1} = ud \quad t_{x_1,2} = us \quad t_{x_1,3} = um \quad t_{x_1,4} = zero \quad t_{x_1,5} = dm \quad t_{x_1,6} = ds \quad t_{x_1,7} = dd] \quad (2)$$





Ryc. 4. Uniwersum i zbiór termów dla zmiennej wyjściowej  $y_1(t)$

Fig. 4. Universum and set of terms for output variable  $y_1(t)$

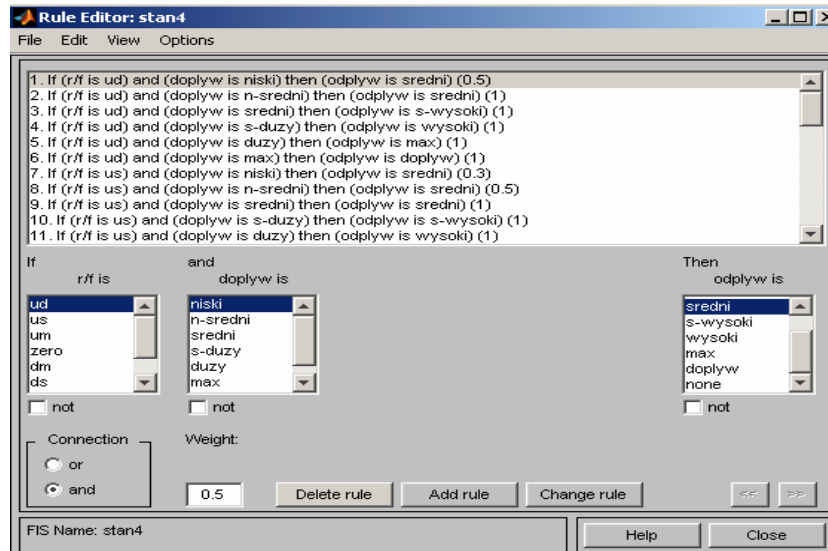
Baza reguł (ryc. 5) zawiera 42 zależności logiczne między zmiennymi wejściowymi  $X(t) = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T$  a zmienną wyjściową  $y(t)$ . Jest to z pewnością najtrudniejsza do zaprojektowania część regulatora rozmytego. Regulator wnioskuje na podstawie informacji zawartych w bazie reguł. Reguły są odzwierciedleniem wiedzy, doświadczenia i znajomości sterowanego procesu.

Jak zaznaczono [9], deskryptywne sterowanie rozmyte stanowi pewien system ekspercki, w którym zakłada się, że:

- nie dysponujemy modelem sterowanego procesu lub, ze względu na jego złożoność, skomplikowaną formę, nieliniowość itp., nie chcemy lub nie możemy go zastosować w procesie sterowania,
- dysponujemy instrukcjami dyspozytorskimi, wiedzą, doświadczeniem, intuicją instruktorów, decydentów, w wyniku której posiadamy informacje, jak sterować procesem bez znajomości jego modelu,
- wyżej wymienioną wiedzę, intuicję, doświadczenia operatorzy systemu (decydenci) mogą przekazać jedynie w postaci naturalnej (werbalnej), a nie w postaci dokładnej, np. numerycznej.

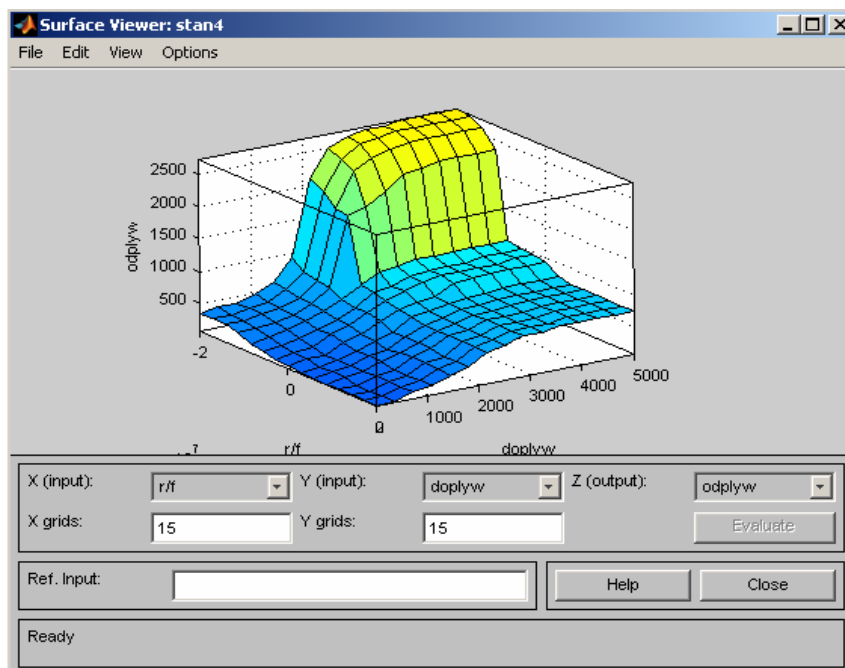
Niewłaściwe zestawienie bazy reguł wynikające z braku dostatecznej wiedzy na temat sterowanego procesu prowadzi w konsekwencji do złego wnioskowania i często absurdalnych wyników.

Należy również podkreślić, że na potrzeby zaprezentowania modelu symulacyjnego przyjęto w sposób wysoce dowolny zakres uniwersum poszczególnych zmiennych wejściowych i wyjściowych. Zastosowanie regulatora dla konkretnego obiektu sterowania (konkretnego zbiornika) wymaga dostosowania uniwersum poszczególnych zmiennych do fizycznych parametrów obiektu.



Ryc. 5. Baza reguł dla rozpatrywanego problemu

Fig. 5. A rule base for the problem under consideration



Ryc. 6. Powierzchnia decyzyjna wynikająca z bazy reguł

Fig. 6. Decision surface resulting from a rule base

### 3. Układ sterowania z zastosowaniem hierarchicznego regulatora rozmytego

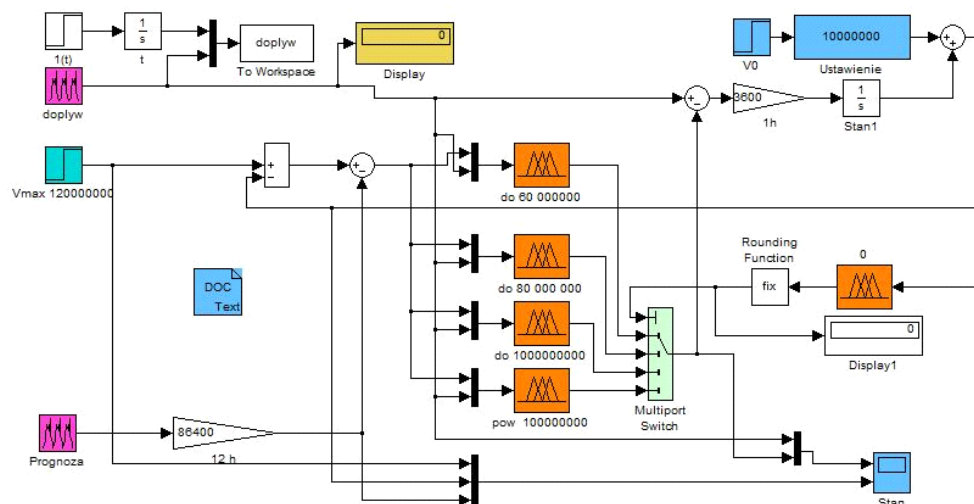
Regulator o strukturze hierarchicznej to regulator, który zmienia algorytm działania w trakcie zmian jednego lub kilku parametrów stanu obiektu sterowanego. W nadrzędnej warstwie regulator rozmyty rozpoznaje aktualny stan obiektu i kieruje dalsze działanie do odpowiedniego regulatora rozmytego warstwy podrzędnej. Można zatem uznać, że w trakcie realizacji procesu zachodzi korygowanie powierzchni decyzyjnej stosownie do wytycznych pochodzących z warstwy nadrzędnej. Korekcje parametrów modelu uzyskuje się dzięki sprzężeniom zwrotnym. Takie podejście zdecydowanie upraszcza bazę reguł regulatora na skutek eliminacji elementów wektora zmiennych wejściowych (w tym przypadku z trzech do dwóch).

Układ sterowania przejściem fali powodziowej przez hipotetyczny zbiornik zrealizowano w module Matlab/Simulink. Danymi wejściowymi do układu są:

- godzinowy dopływ do zbiornika [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- prognozowana objętość fali powodziowej na najbliższe 24 h [ $\text{m}^3$ ],
- aktualny stan zbiornika [ $\text{m}^3$ ] zmieniający algorytm regulatora,
- pojemność początkowego wypełnienia zbiornika w chwili rozpoczęcia symulacji (chwili traktowanej jako początek fali powodziowej) [ $\text{m}^3$ ].

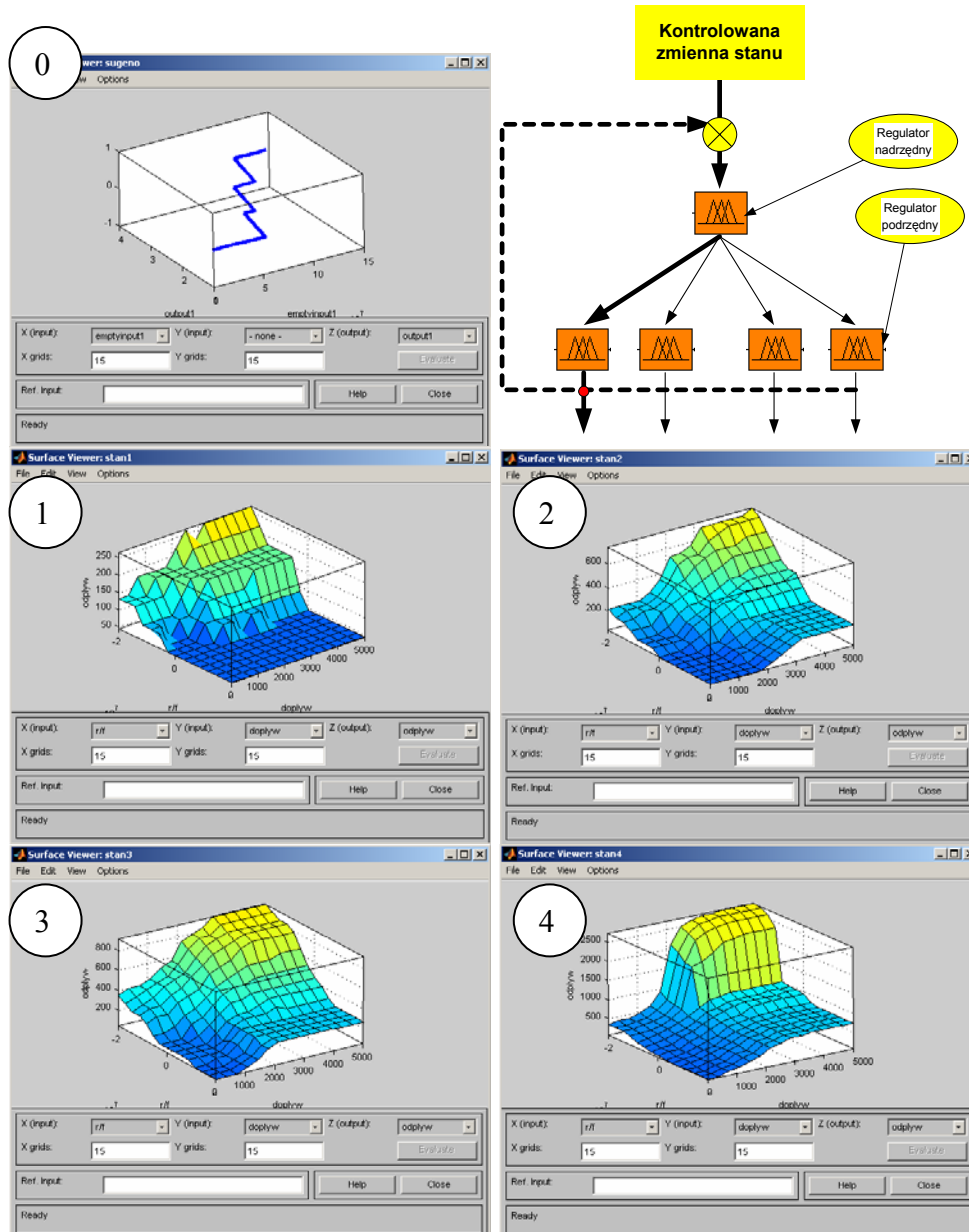
W trakcie pierwszej symulacji (ryc. 9) postawiono bardzo trudne warunki początkowe sprowadzające się do:

- zerowej rezerwy powodziowej (zbiornik całkowicie wypełniony),
- dopływu do zbiornika o bardzo dużych wartościach godzinowych,
- serii następujących po sobie kulminacji fal powodziowych,
- prognozowanej objętości każdej fali powodziowej rzędu 35% całkowitej objętości zbiornika.



Ryc. 7. Układ sterowania z zastosowaniem hierarchicznego regulatora rozmytego

Fig. 7. Control scheme with a hierarchical fuzzy regulator



Ryc. 8. Zmiana powierzchni decyzyjnej regulatora w funkcji aktualnego stanu zbiornika

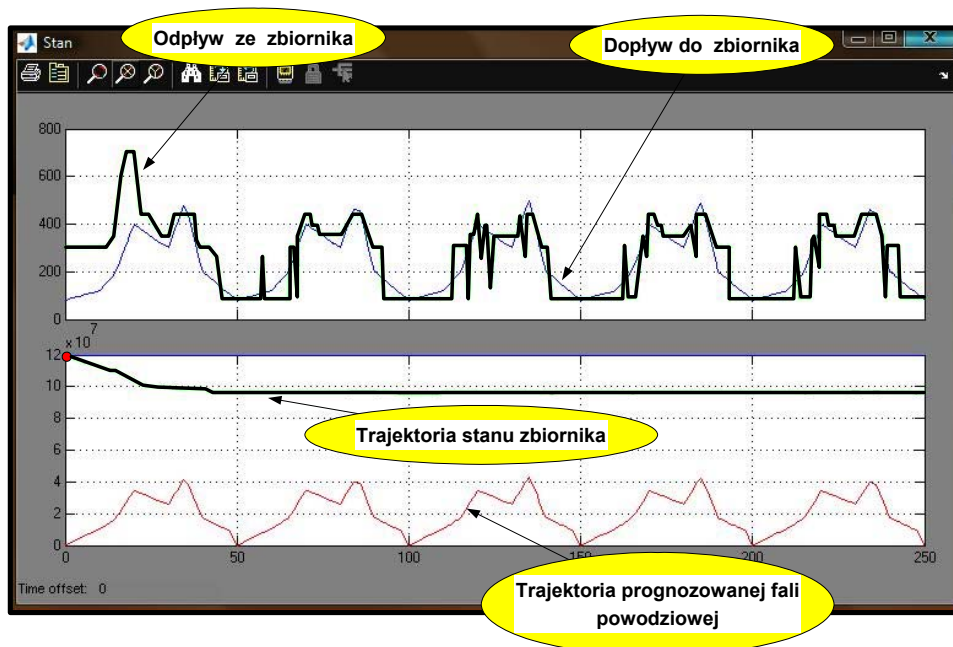
Fig. 8. Change of decision surface of a regulator as a function of the present reservoir state



Na rycinie 9 przedstawiono trajektorie zaistniałego dopływu  $x_2(t)$  oraz zadysponowanego przez regulator rozmyty odpływu ze zbiornika  $y(t)$ . Zaprezentowano również trajektorię uzyskanego w wyniku sterowania stanu zbiornika oraz trajektorie prognozowanych fal powodziowych w okresie obserwacji.

Rezultaty pracy regulatora rozmytego są zaskakująco dobre. W wyniku właściwego obcinania szczytu fali powodziowych trajektoria stanu zbiornika mieści się w ograniczeniach i w konsekwencji zastosowanych odpływów następuje stopniowe obniżanie stanu zbiornika mimo wielokrotnie następujących po sobie kulminacji.

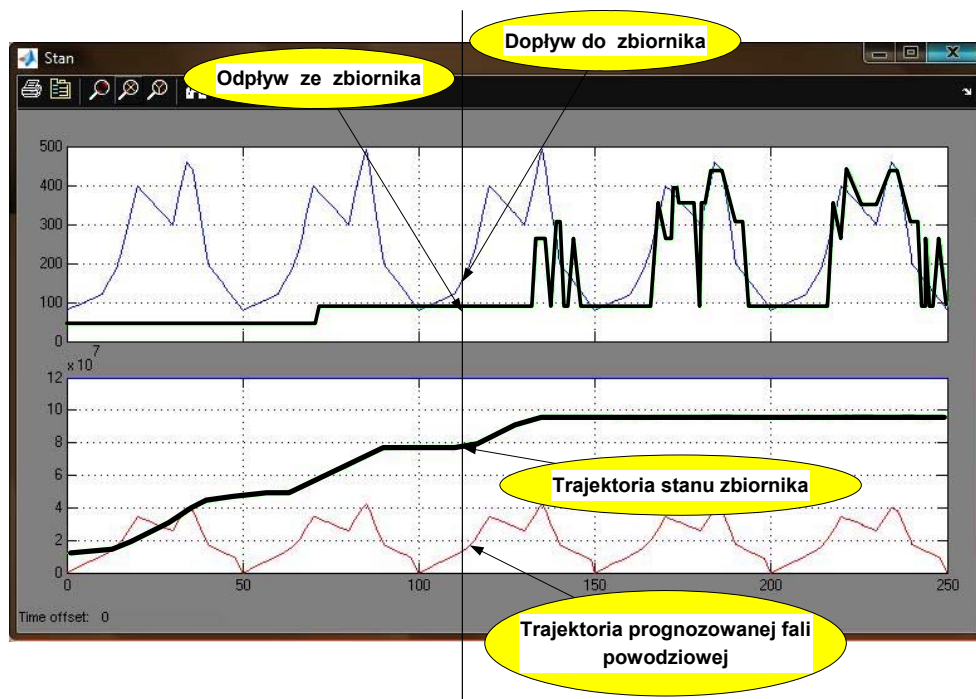
Warto zauważyć, że po osiągnięciu pewnej wartości stanu zbiornika (zwanej np. stanem ustalonym) trajektoria stanu utrzymuje się na jednakowym poziomie. Poziom „stanu ustalonego” możemy zadysponować w wyniku odpowiedniego ustalenia powierzchni decyzyjnej regulatora.



Ryc. 9. Trajektorie dopływu i sterowanego odpływu ze zbiornika. Trajektorie stanu zbiornika, prognozowanej objętości fal powodziowych

Fig. 9. Trajectories of inflows and controlled discharges from a reservoir. Trajectories of reservoir states and capacities of a forecasted flood wave

W drugiej symulacji zadysponowano wartości dopływów do zbiornika przy niższym wypełnieniu początkowym (większa rezerwa powodziowa). Rezultaty symulacji przedstawiono na ryc. 10.



Ryc. 10. Trajektorie dopływu i sterowanego odpływu ze zbiornika. Trajektorie stanu zbiornika, prognozowanej objętości fal powodziowych

Fig. 10. Trajectories of inflows and controlled discharges from a reservoir. Trajectories of reservoir states and capacities of a forecasted flood wave

Ponieważ początkowy stan zbiornika jest bliski najniższemu z możliwych stanów, w pierwszej fazie regulacji regulator nie reaguje na duże dopływy i prognozy dotyczące ewentualnej objętości fali powodziowej. W miarę napełniania zbiornika (zmiana stanu zbiornika) zachodzi przestrajanie regulatora, co skutkuje odpowiednimi odpływami i przeprowadzeniem zbiornika przez okres powodzi. Dla ustalonej prognozy hipotetycznej fali i ustalonego dopływu do zbiornika wszystkie pośrednie przypadki symulacji w funkcji wypełnienia początkowego mieszczą się między wariantami zaprezentowanymi na ryc. 9 i 10.

#### 4. Podsumowanie

W kolejnych punktach artykułu przedstawiono operacje i przekształcenia, konieczne przy formowaniu i projektowaniu hierarchicznego regulatora rozmytego. W tym konkretnym przypadku jest to regulator (regulatory) sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny.

Ciekawym rozwiązaniem jest hierarchiczna struktura regulatora rozmytego. Zmiana własności regulatora w funkcji zmiany stanu zbiornika zdecydowanie podnosi „jakość sterowania”, czyni regulator elastycznym narzędziem reagującym na zmianę jednej z najważniejszych zmiennych, jaką jest stan zbiornika.

Zastosowanie takiego rozwiązania daje podstawy sądzić, że w dalszych próbach będzie można wprowadzić inne zmienne stanu sterowanego obiektu bez konieczności zwiększania wymiaru wektora zmiennych wejściowych. Znane z literatury tzw. przekleństwo wymiarowości może zostać skutecznie ograniczone w wyniku zastąpienia niektórych elementów wspomnianego wektora zmiennych wejściowych wielopoziomowym regulatorem hierarchicznym.

#### Literatura

- [1] Aoki S., Kwachi S., *Application of fuzzy control for dead-time processes in a glass melting furnace*, Fuzzy Sets and System, Vol. 38, No. 5, 1990, 251-256.
- [2] Aracil J., Garcia-Cezero A., Ollero A., *Fuzzy control of dynamical system. Stability analysis based on the conicity criterion*, Proc. 4<sup>th</sup> Item, Fuzzy System Association Congress, Brussels, Belgium 1991, 5-8.
- [3] Arita S., Tsutsui T., *Fuzzy logic control of blood pressure through inhalational anesthesia*, Proc. Of the Int'l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, II Zuka, Japan 1990, 545-547.
- [4] Arita S., *Development of an ultrasonic cancer diagnosis system using fuzzy theory*, Japanese Journal of Fuzzy Theory and System, Vol. 3, No. 3, 1991, 215-230.
- [5] Babuska R., *Fuzzy modeling – a control engineering perspective*, Proc. Inter. Conf. FUZZ-IEEE/IFES '95 Yokohama, Japan 1995, 1897-1902.
- [6] Cao S.G., Rees N.W., Feng G., *Analisis and design for a class of complex control system*, Part I: *Fuzzy modeling and design*, Automatica, Vol. 33, No. 6, 1997, 1017-1028.
- [7] Cao S.G., Rees N.W., Feng G., *Analisis and design for a class of complex control system*, Part II: *Fuzzy controller design*, Automatica, Vol. 33, No. 6, 1997, 1029-1039.
- [8] Chmielowski W., Twaróg B., *Regulator rozmyty sterujący przejściem fali podwodzowej przez zbiornik retencyjny*, Czasopismo Techniczne z. 10-S/2006, Kraków.
- [8] Hajek M., *Optimization of fuzzy rules by using a genetic algorithm*, Proc. The Third International Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision ICARV '94, Vol. 4, Singapor, 1994, 2111-2115.
- [9] Kacprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001.
- [10] Kagayama Sh., *Blood glucose control by a fuzzy control system*, Int. 1 Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan 1990, 557-560.
- [11] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, EXIT, Warszawa 2001.
- [12] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 2003.
- [13] Rudkowska D., Piliński M., Rudkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, WN PWN, Warszawa 1997.
- [14] Tobi T., Hanafusa T., *A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system*, International Journal of Approximate Reasoning, No. 5, 1991, 331-348.
- [15] Yager R., Filev D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1995.