CZASOPISMO TECHNICZNE Ś
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 2-Ś/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6336

WOJCIECH Z. CHMIELOWSKI*

HIERARCHICZNY REGULATOR ROZMYTY STERUJĄCY PRZEJŚCIEM FALI POWODZIOWEJ PRZEZ ZBIORNIK RETENCYJNY. CZĘŚĆ III. ZBIORNIK DOBCZYCE

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

Streszczenie

W niniejszym artykule omówiono dwa układy sterowania odpływem ze zbiornika retencyjnego, w których zastosowano regulatory rozmyte. Pracę układu sterującego z zastosowaniem regulatorów rozmytych testowano w warunkach przejścia fali powodziowej przez Zbiornik retencyjny w Dobczycach. Następnie porównano otrzymane wyniki z wynikami uzyskanymi dzięki zastosowaniu standardowej reguły sterowania obowiązującej na Zbiorniku Dobczyce w warunkach rzeczywistych.

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

Abstract

The paper presents two systems of a retention reservoir control with the applied fuzzy regulators. The control systems were tested on the Dobczyce Reservoir for its operation in flood conditions and the results were compared with those achieved according to a real control regime which is now obligatory for that reservoir.

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

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

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Symulacje zrealizowano z zastosowaniem parametrów fizycznie istniejącego zbiornika (Zbiornik Dobczyce), przy wykorzystaniu historycznej fali powodziowej z 1997 r. na rzece Rabie.

Wdrożenie nowej metody sterowania obiektem, który dotychczas używany był wg istniejących prawideł, wymaga weryfikacji, porównania i oceny wprowadzanej metody pod kątem nowości, jakie wnosi w proces sterowania, korzyści z jej zastosowania, jak również powinno wskazać ewentualne ujemne strony wynikające z nowatorskiego podejścia.

Taka sytuacja ma miejsce m.in. w sterowaniu zbiornikami retencyjnymi, których reguły sterowania były wielokrotnie sprawdzane w ekstremalnych warunkach rzeczywistych, a w związku z powyższym niechętnie poddają się modyfikacjom wynikającym tylko z symulacji komputerowych.

2. Sterowanie wg klasycznej reguły sterowania

Reguła sterowania Zbiornikiem DOBCZYCE

		PIĘTRZENIE (V)		DYSPOZYCJA ODPŁYWU	REALIZACJA DYSPOZYCJI ODPŁYWU	
					elektrownia	upust denny
		[m n.p.m.]	[mnl m^3]	[m^3/s]	[m^3/s]	[m^3/s]
		1. Faza wypełniania zbiornika		**Dopływy do zbiornika > 300,0 [m^3/s]**		
A		***V* < 269,30**	***V* < 107,870**	Odpływ dysponowany stanowi kontynuację ostatnio realizowanego	max *U* = 10,1	0
B	W okresie od 15.03. do 15.09.			min U=10.1	z przepławką	
A		**269,3 < = *V* < 269,9**	**107,87 < = V < 113,70**	U = 200,0	max *U* = 10,1	*U* = 189,9
B	W okresie od 15.03. do 15.09.					
		***V* = 269,9**	***V* = 113,70**	*U* = 300,0	max *U* = 10,1	*U* = 289,9
		269,9 < = *V* < 272,60	**113,70 < = *V* < 141,74**	MAX (1, 2) 1. *U* = 300 [m^3/s] 2. *U* = (PV-Rp)/43200 jeżeli *Q* >= Q1%	*U* = 13,0 *U* = 13,0	*U* = 289,9 *U* = [(PV-Rp)/43200] - 13
		***V* = 272,60**	***V* = 141.74**	*U* = PV/43200	*U* = 13,0	*U* = PV/43200
		2. Faza odtwarzania rezerwy powodziowej		**Dopływy do zbiornika < 300,00 [m^3/s]**		
		272,60 > = *V* > 270,20	**141,74 > = *V* > 116,68**	*U* = 300,0	max *U* = 10,1	*U* = 289,9
A		**270,2 > = V > 269,3**	**116,68 > = *V* > 107,870**	*U* = 200,0	max *U* = 10,1	*U* = 189,9
B	W okresie od 15.03. do 15.09.			*Q* < 100 [m^3/s] *U* = *Q* + 10,1	max *U* = 10,1	*U* = *Q* + 10,1
		***V* < = 269,3**	***V* < = 107,870**	Odpływ dysponowany stanowi kontynuację ostatnio realizowanego	max *U* = 10,1	0

PV [m^3] = prognoza objętości 12-stogodzinnego dopływu
Q 1% = 1061 [m^3/s]
Rp [m^3] = nie zapełniona rezerwa

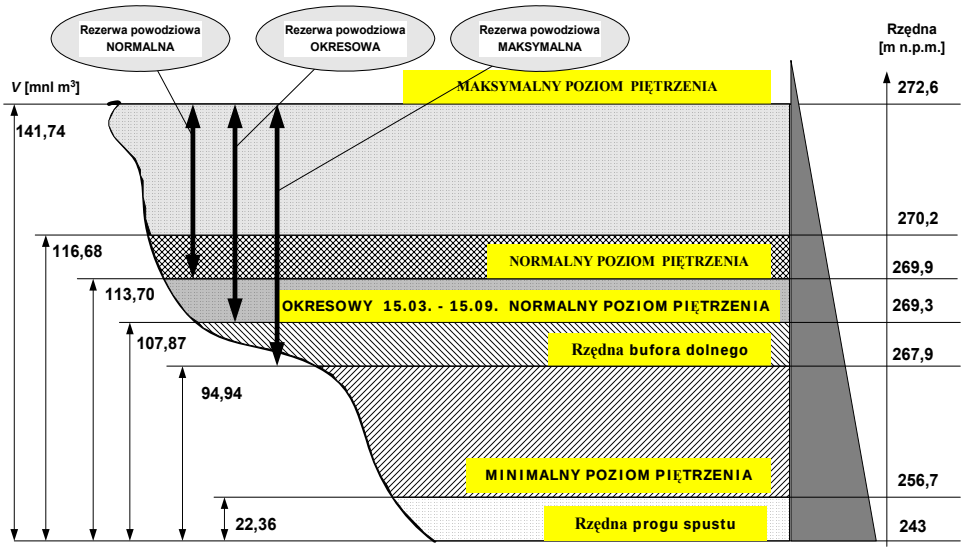
Ryc. 1. Reguła sterowania odpływem ze Zbiornika Dobczyce

Fig. 1. Control regime of a discharge from the Dobczyce Reservoir

Reguła sterowania Zbiornikiem retencyjnym Dobczyce przedstawiona została na ryc. 1. Dodatkowo ryc. 2. zawiera poglądowy przekrój zbiornika pozwalający zorientować się w rozmieszczeniu charakterystycznych warstw pojemności zbiornika.

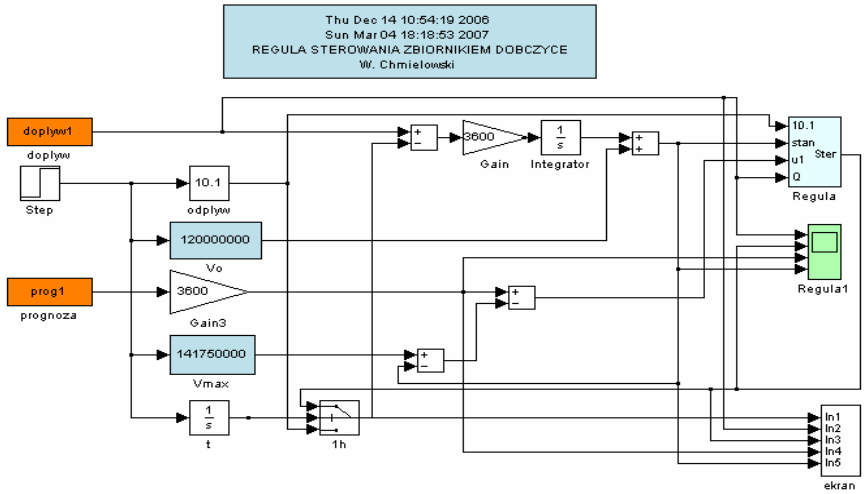
BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Aby otrzymać wyniki do porównań, zgodnie z istniejącą regułą zrealizowano program symulacyjny (ryc. 3–6), który przedstawia zachowanie się zbiornika (odpływ, stan) w funkcji dopływu powodziowego na rzece Rabie z 1997 r. oraz przy różnych warunkach wypełnienia początkowego zbiornika. Na rycinach 9–11 pokazano wyniki działania reguły sterowania przy V_0 = 50, 100, 120 mln m^3.



Ryc. 2. Podział pojemności zbiornika Dobczyce

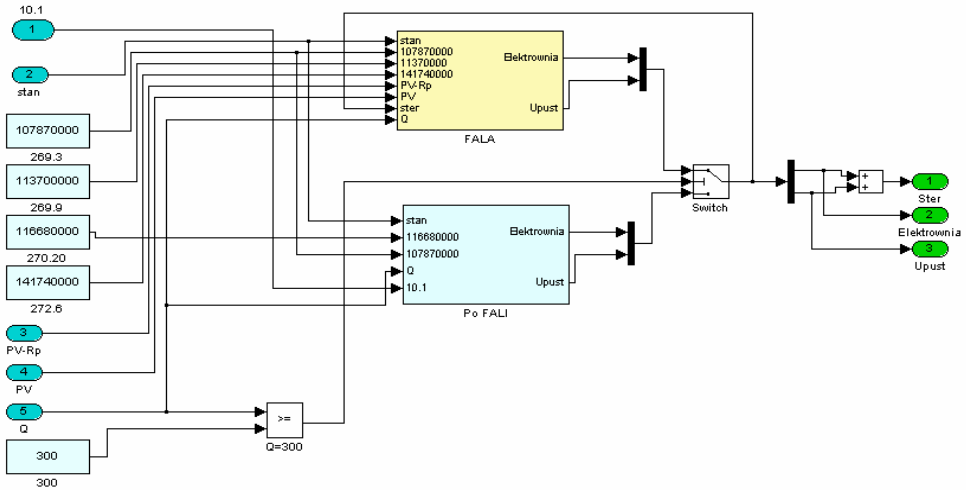
Fig. 2. Division of the Dobczyce reservoir capacity



Ryc. 3. Schemat algorytmu analogowego sterowania zbiornikiem

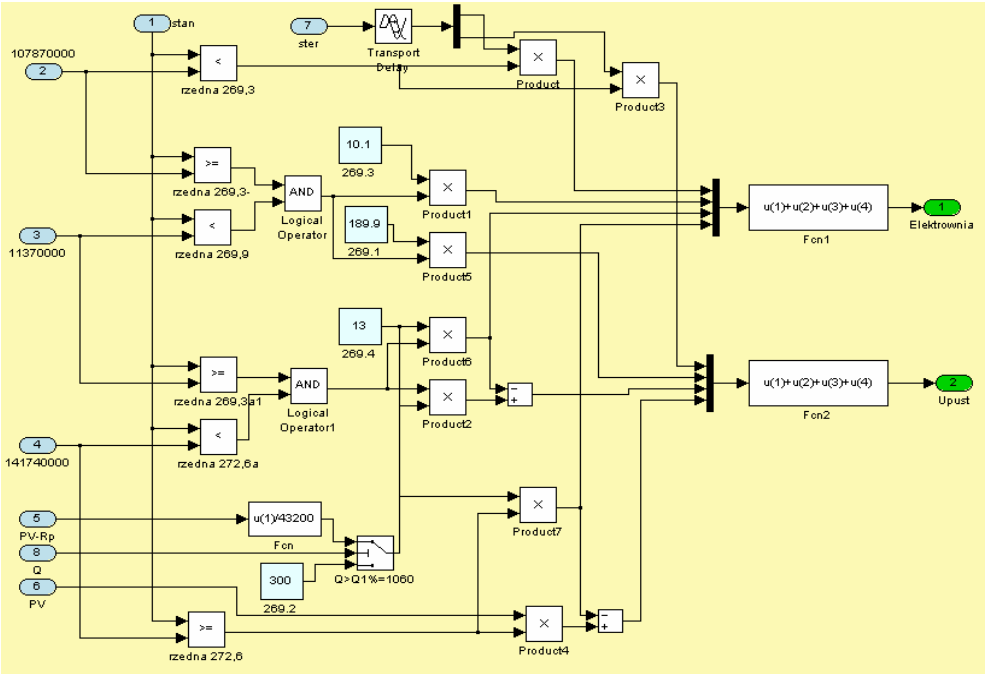
Fig. 3. Scheme of an analogue control of a storage reservoir

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 4. Schemat algorytmu analogowego sterowania zbiornikiem (reguła)

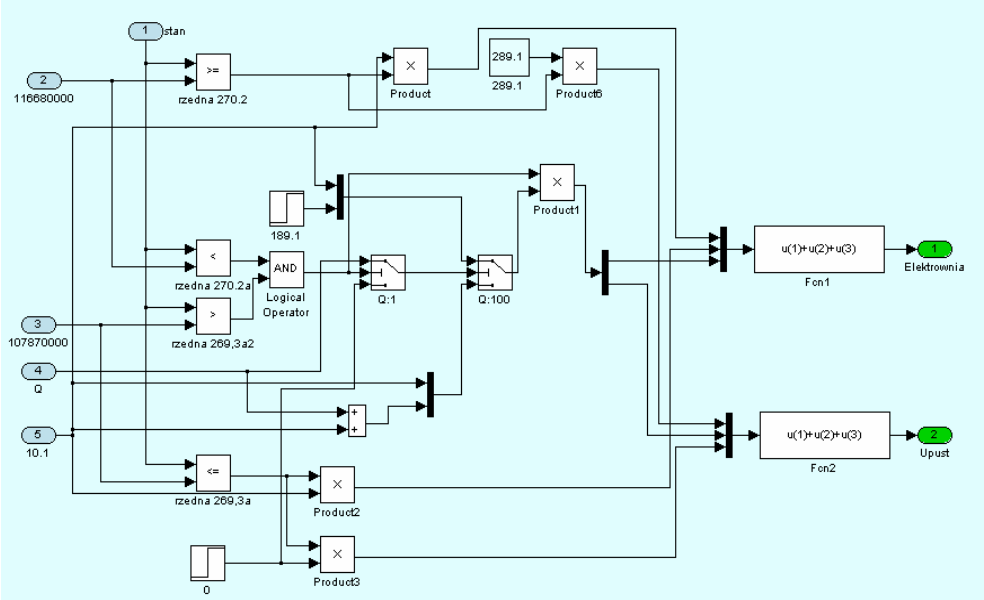
Fig. 4. Scheme of an analogue control of a storage reservoir (control regime)



Ryc. 5. Schemat algorytmu analogowego sterowania zbiornikiem (fala)

Fig. 5. Scheme of an analogue control of a storage reservoir (flood wave)

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 6. Schemat algorytmu analogowego sterowania zbiornikiem (po fali)

Fig. 6. Scheme of an analogue control of a storage reservoir (after flood wave)

W dalszej kolejności zaprojektowane zostały dwa regulatory rozmyte, działające na podstawie następujących założeń:

a) rozmyte odzwierciedlenie standardowej reguły sterowania zbiornikiem,
b) hierarchiczny regulator rozmyty, w którym zmiana powierzchni decyzyjnej regulatora (wynikająca ze zmian bazy reguł) uwarunkowana jest zmieniającym się stanem zbiornika [9].

W przypadku (a) danymi wejściowymi są:

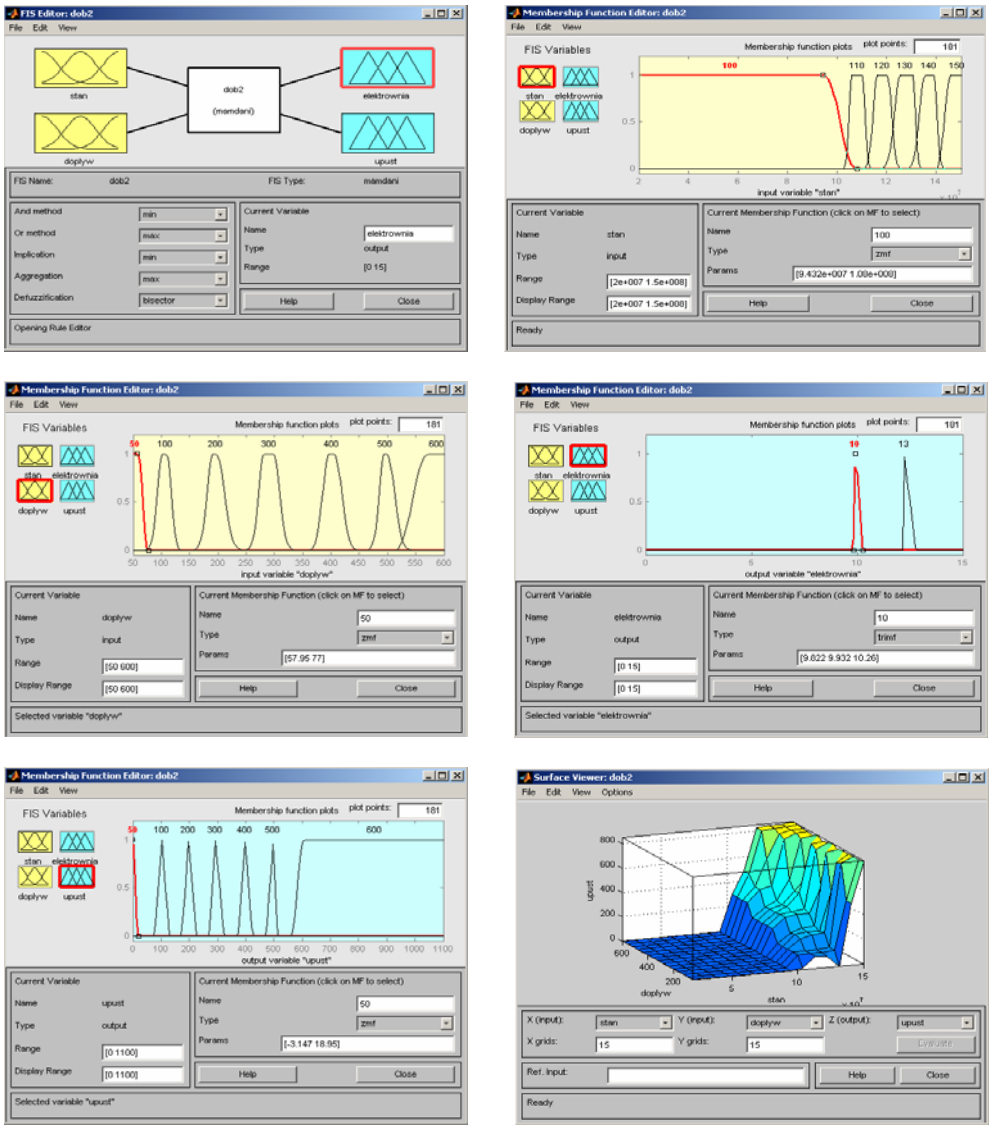
– rzeczywisty dopływ do zbiornika w chwili t,
– aktualny stan zbiornika w chwili t.

W przypadku (b) danymi wejściowymi są:

– rzeczywisty dopływ do zbiornika w chwili t,
– prognozowana objętość dopływu na najbliższe 12 h,
– hipotetyczna rezerwa objętości w chwili t powstała w wyniku porównania wolnej objętości zbiornika w chwili t z objętością przewidywanej fali powodziowej na 12 h w przód.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

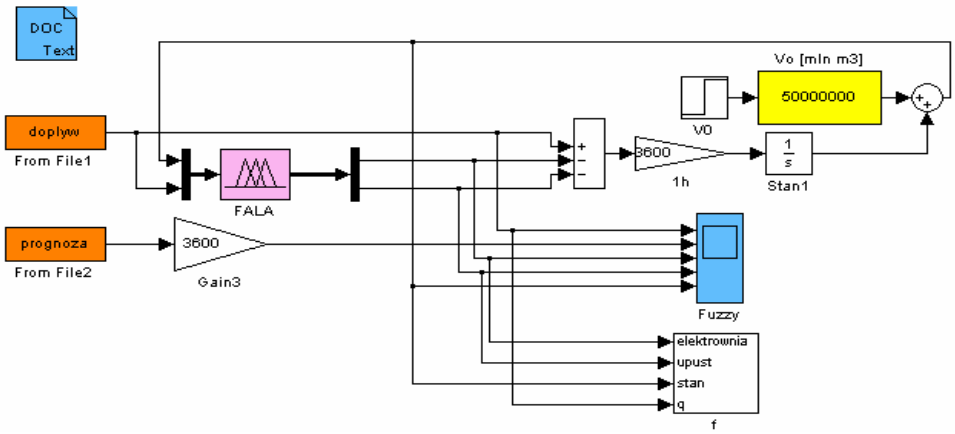
3. Sterowanie z zastosowaniem regulatora rozmytego typu (a)



Ryc. 7. Regulator rozmyty typu (a) FIS (*Fuzzy Interface System*)

Fig. 7. Fuzzy regulator – type (a) FIS (Fuzzy Interface System)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 8. Układ regulacji z zastosowaniem regulatora rozmytego typu (a)

Fig. 8. Regulatory system with a fuzzy regulator

Wejściami do regulatora rozmytego są:
- dopływ do zbiornika w chwili t,
- aktualny stan zbiornika w chwili t,

Wyjściami z regulatora są:
- odpływ ze zbiornika przez elektrownię,
- odpływ ze zbiornika przez upust.

Przyjmując te same przebiegi wejściowe (dopływ powodziowy na rzece Rabie z 1997 r.) oraz te same warunki początkowe wypełnienia zbiornika (V_0 = 50, 100, 120 mln m^3 na ryc. 9–11), porównano otrzymane trajektorie (sterowanie, stan) z wynikami uzyskanymi w drodze działania standardowej reguły sterowania. W każdym z trzech przypadków (różne wypełnienie początkowe zbiornika) wyniki są niemal identyczne, szczególnie przy porównaniu trajektorii stanu zbiornika, uzyskanych obiema metodami.

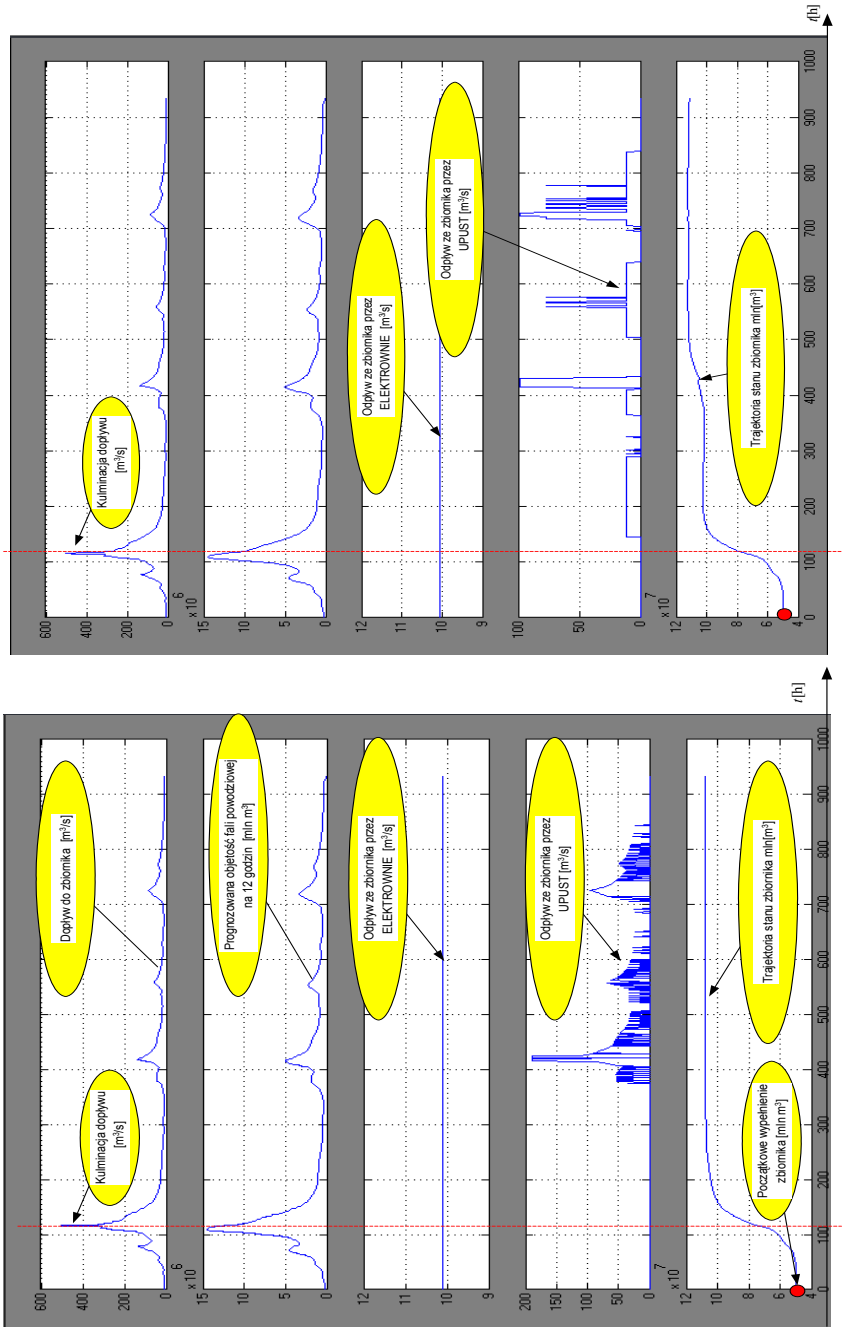
W przypadku zastosowania regulatora rozmytego trajektoria sterowania odpływem ze zbiornika (przez upust) cechuje się znacznie mniejszą ilością przełączeń (prawa część wykresu) zmieniających poziom upustu w m^3/s.

W praktyce inżynierskiej zmiana rzeczywistych nastawów regulatora realizującego odpływ ze zbiornika jest bardzo istotną kwestią, a generalnie rzecz ujmując, im mniej zmian, tym lepiej. W tym kontekście efekt działania regulatora rozmytego należy uznać za korzystniejszy w odniesieniu do standardowej reguły sterowania.

4. Sterowanie z zastosowaniem regulatora rozmytego typu (b)

Jak zaznaczono poprzednio [9], regulator o strukturze hierarchicznej to regulator, który zmienia swoje właściwości w trakcie zmian jednej (kilku) zmiennej stanu obiektu sterowanego.

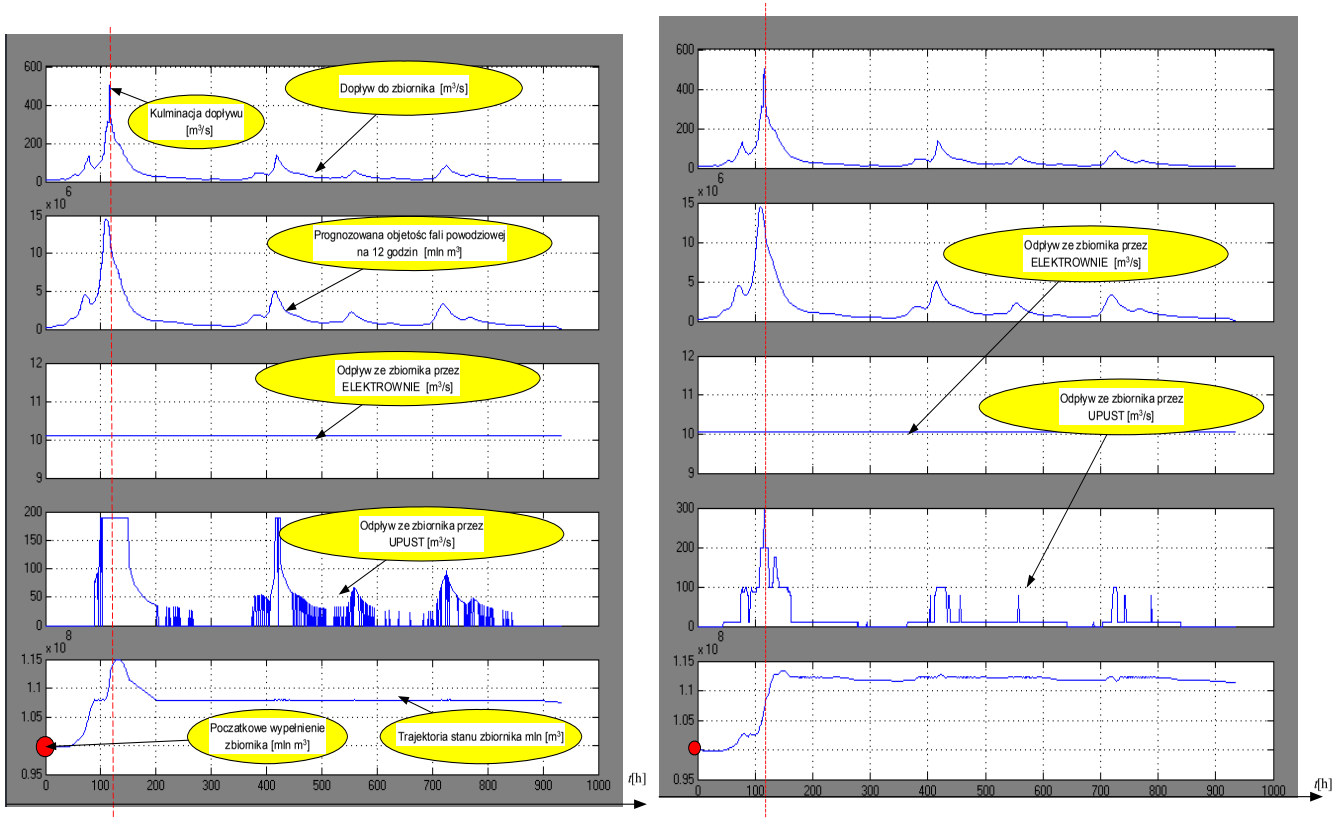
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 9. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 50 mln m^3

Fig. 9. Simulation. Initial reservoir capacity – 50 mln m^3

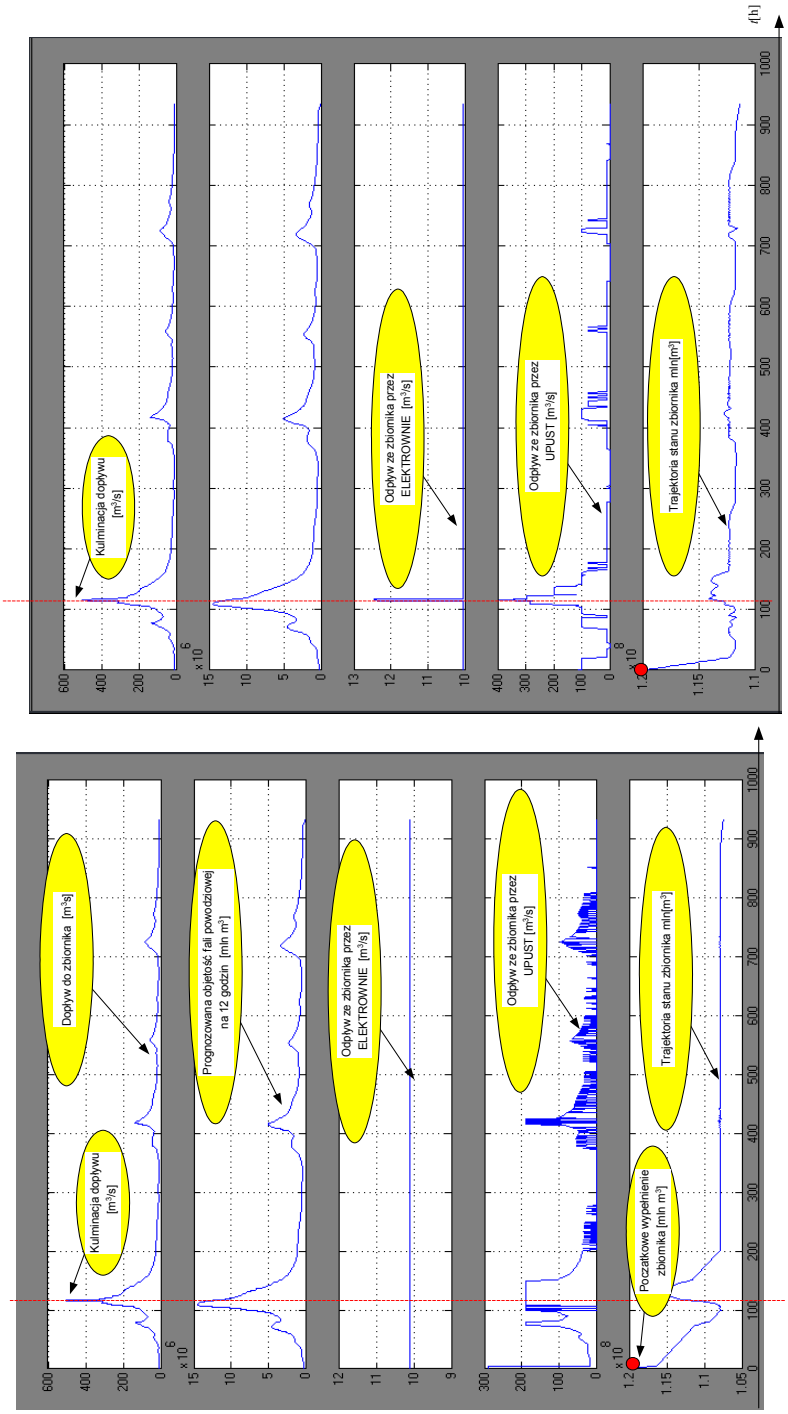
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 10. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 100 mln m^3

Fig. 10. Simulation. Initial reservoir capacity – 100 mln m^3

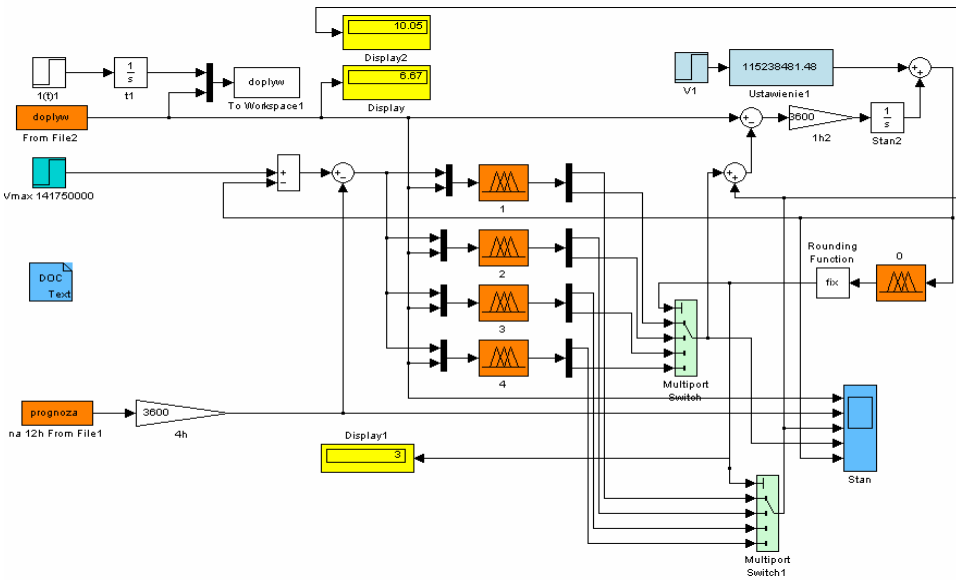
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 11. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 120 mln m^3

Fig. 11. Simulation. Initial reservoir capacity – 120 mln m^3

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 12. Schemat działania regulatora typu (b)

Fig. 12. Scheme of operation of a regulator (b)

W warstwie nadrzędnej regulator rozmyty rozpoznaje aktualną zmianę zmiennej stanu (wektor zmian zmiennych stanu) i na tej podstawie kieruje dalsze działanie do odpowiedniego regulatora rozmytego warstwy podrzędnej. Taka właśnie sytuacja ma miejsce w układzie sterowania z zastosowaniem regulatora typu (b).

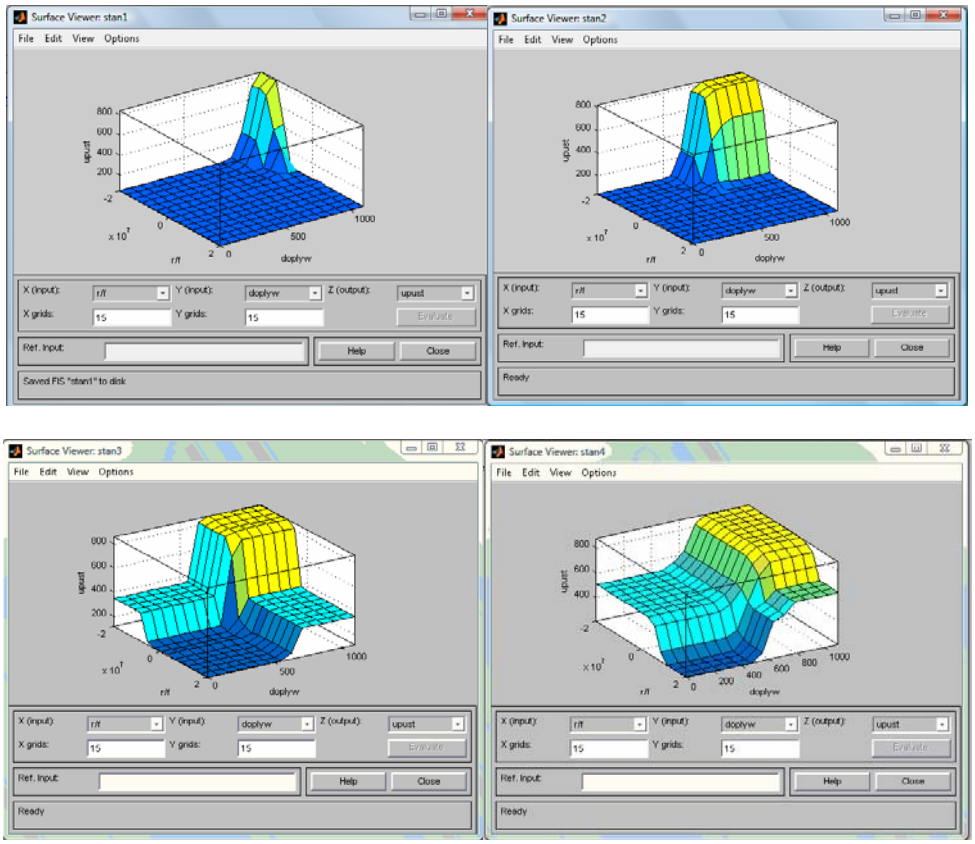
Regulator warstwy nadrzędnej (oznaczony na ryc. 12 numerem 0) rozpoznaje stan śledzonej zmiennej stanu (tym przypadku stanu zbiornika) i kieruje dalsze działanie do regulatorów nr 1 lub 2 lub 3 lub 4. Układ działa w układzie zamkniętym, a zatem każda zmiana stanu zbiornika wprowadzona na wejście regulatora nr 0 powoduje stosowną akcję regulatorów niższego poziomu.

Regulatory niższego poziomu działają dzięki autonomicznym powierzchniom decydującym, przedstawionym na ryc. 13.

Na rycinach 14–16 przedstawiono efekt sterowania odpływem ze Zbiornika Dobczyce z wykorzystaniem standardowej reguły sterowania (lewa część rysunków) oraz efekt sterowania z zastosowaniem hierarchicznego regulatora rozmytego (prawa część rysunków). Dla jednakowych parametrów i przebiegów wejściowych do zbiornika otrzymane trajektorie stanu zbiornika wykazują jedynie nieznaczne różnice w przedziale obserwacji.

Trajektoria sterowania odpływem ze zbiornika w przypadku regulatora rozmytego typu (b) pokazuje tendencje regulatora do działania w trybie zbliżonym do *Bang-bang* (zał/wył), (10/280 m^3/s). Takie zachowanie regulatora wynika ze zmian powierzchni decyzyjnych regulatorów niższego poziomu w wyniku zmian stanu zbiornika, który rzutuje na decyzję regulatora wyższego poziomu. Lepsze dostrojenie regulatorów nr 1, 2, 3, 4 prowadzić będzie do złagodzenia tego efektu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 13. Powierzchnie decyzyjne regulatorów niższego poziomu

Fig. 13. Decision surface of the lower level regulators

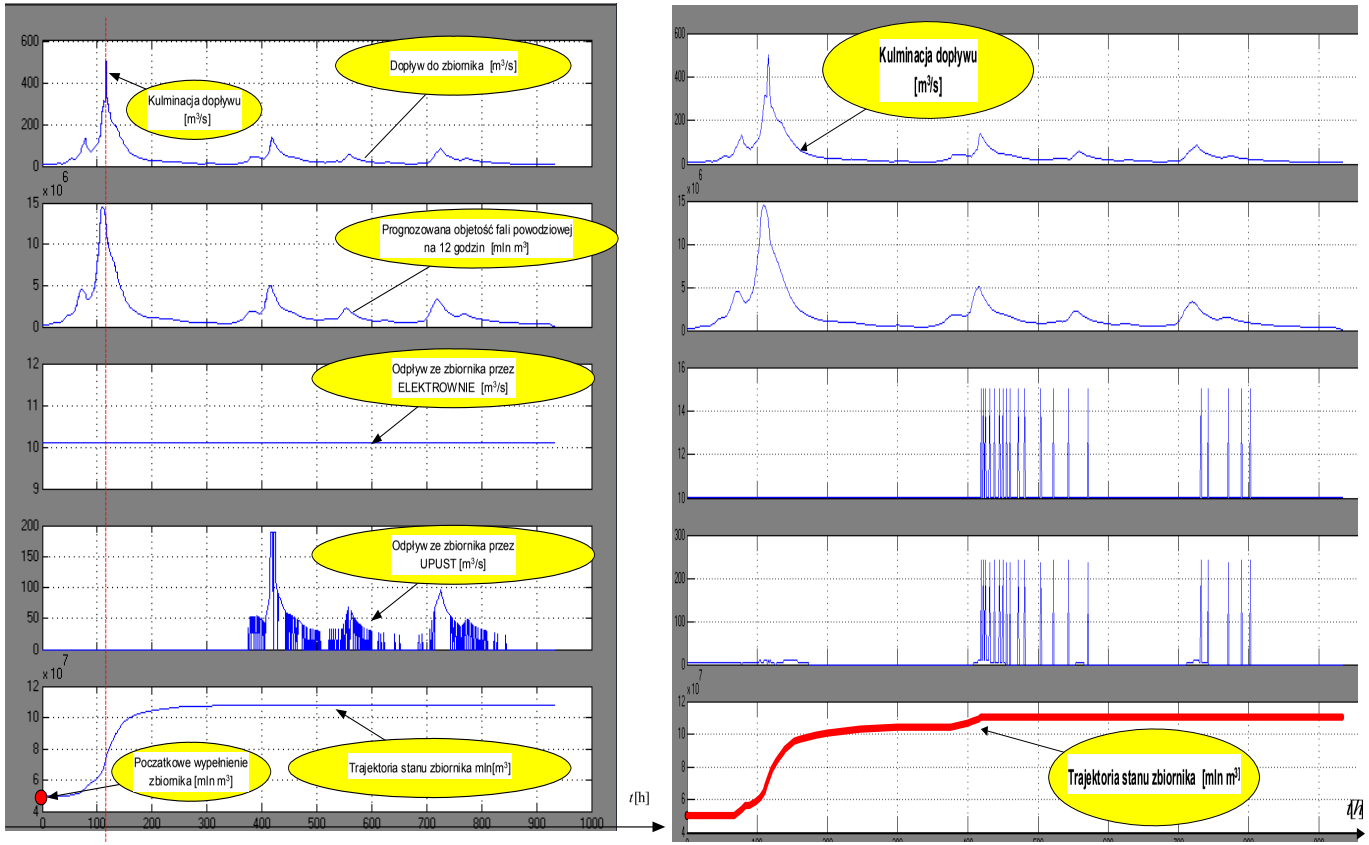
5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania układów sterowania odpływem ze zbiornika z zastosowaniem regulatorów rozmytych w odniesieniu do zbiornika retencyjnego Dobczyce usytuowanego na rzece Rabie w miejscowości Dobczyce.

Zaproponowano dwa układy sterowania:

a) z zastosowaniem pojedynczego regulatora rozmytego pracującego w układzie ze sprzężeniem zwrotnym,
b) z zastosowaniem hierarchicznego (dwupoziomowego) układu sterowania, składającego się z 5 regulatorów rozmytych (1 na poziomie nadrzędnym, 4 na poziomie podrzędnym), pracującego również w układzie zamkniętym.

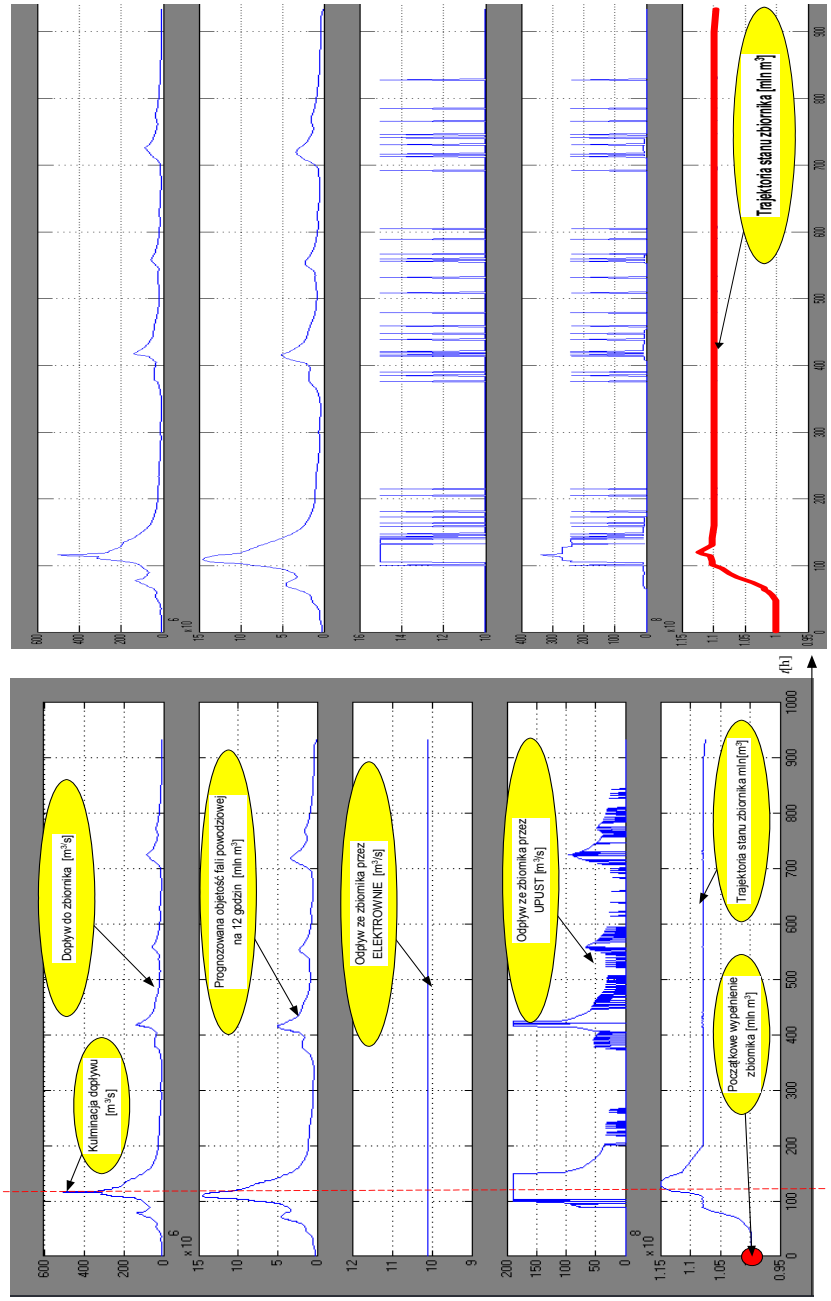
BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 14. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 50 mln m^3

Fig. 14. Simulation. Initial reservoir capacity – 50 mln m^3

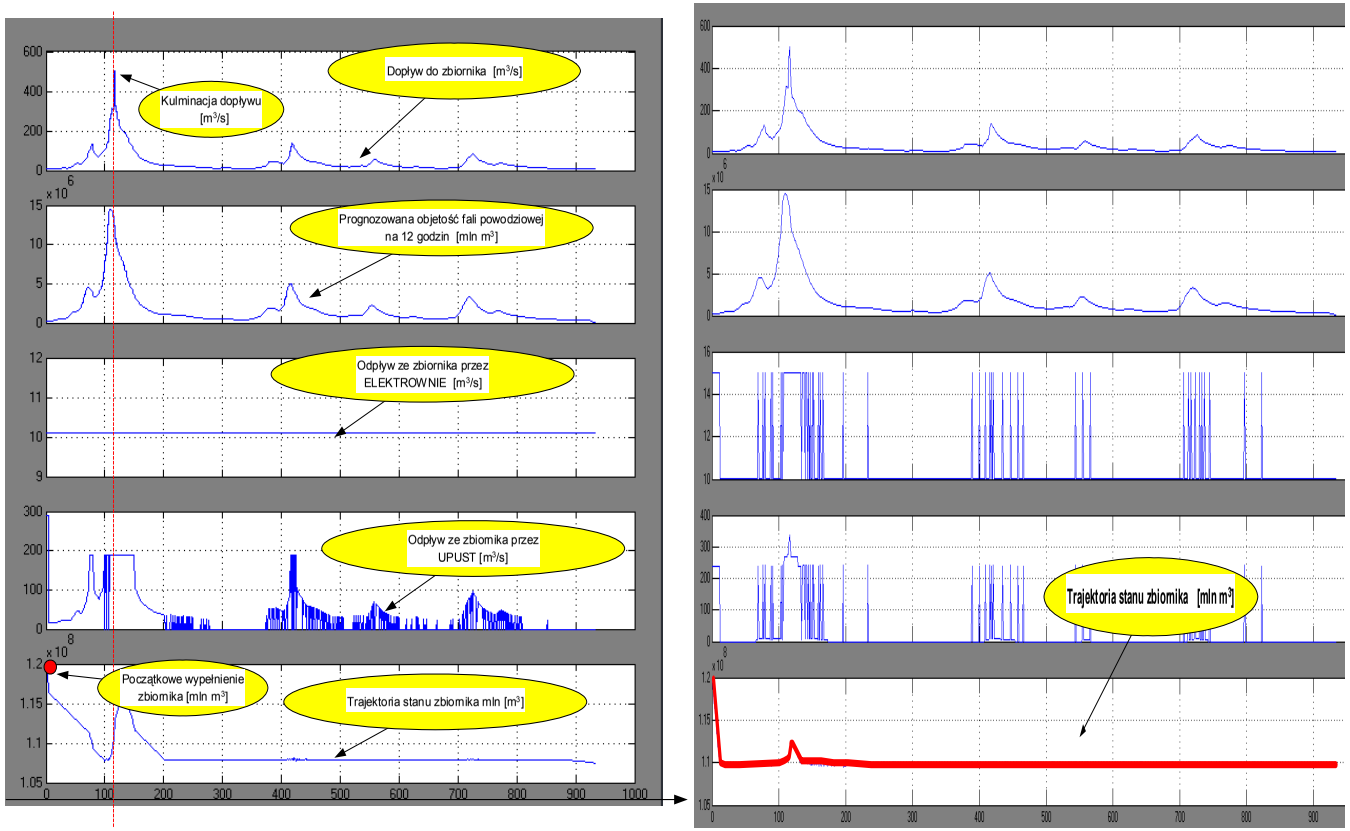
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 15. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 100 mln m^3

Fig. 15. Simulation. Initial reservoir capacity – 100 mln m^3

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 16. Symulacja. Wypełnienie początkowe zbiornika 120 mln m^3

Fig. 16. Simulation. Initial reservoir capacity – 120 mln m^3

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

ad. a) Opierając się na bazie reguł, aktualnym stanie zbiornika oraz aktualnym dopływie do zbiornika, regulator rozmyty dysponuje właściwy odpływ spełniający przyjęte założenia, tj. utrzymanie trajektorii zbiornika w ograniczeniach stanu,

ad. b) W przypadku hierarchicznego układu sterowania mamy do czynienia z regulatorem nadrzędnego poziomu, który na podstawie danych dotyczących aktualnego stanu zbiornika dokonuje wyboru regulatora rozmytego niższego poziomu. Każdy regulator niższego poziomu działa w oparciu o własną bazę reguł oraz parametr zwany umownie **hipotetyczną rezerwą**.

Ta ostatnia definiowana jest jako różnica między objętością wolną zbiornika a prognozowaną objętością dopływu do zbiornika w ciągu 12 h. Z kolei objętość wolna zbiornika to różnica między pojemnością maksymalną zbiornika a aktualnym stanem zbiornika.

Przyjmując do wszystkich symulacji jednakowe wartości wejściowe, wyniki otrzymane w trakcie symulacji działania układów regulacji z regulatorami typu (a) i (b) zestawiono z wynikami sterowania zbiornikiem w oparciu o standardową regułę sterowania.

Wnioski, jakie się nasuwają w wyniku przeprowadzenia symulacji komputerowych, sprowadzić można do kilku punktów:

1) działania układów sterowania odpływem ze zbiornika, w których zastosowano regulatory rozmyte, nie dają zdecydowanie lepszych efektów niż te, które wynikają ze standardowych reguł sterowania,
2) regulator rozmyty typu (a) wykazuje mniejszą czułość na zmiany stanu objętości zbiornika, co skutkuje niższą częstotliwością przełączeń między stanami sterowania w porównaniu z działaniem standardowej reguły sterowania,
3) regulator typu (b), ze względu na jego hierarchiczną strukturę, jest bardzo wrażliwy na zmiany stanu objętości zbiornika. Każda zmiana objętości zbiornika w obrębie charakterystycznych stanów, w których działają regulatory niższego poziomu, prowadzi do zmiany powierzchni decyzyjnych wynikających z pracy aktualnie włączonego regulatora. Konsekwencje takiego trybu pracy przekładają się na zwiększoną częstotliwość zmian stanu zmiennej sterowanej (odpływ ze zbiornika), co w praktyce inżynierskiej może być trudne lub wręcz niewykonalne,
4) układy sterowania odpływem ze zbiornika z zastosowaniem regulatorów rozmytych w prosty sposób można przekształcić w układy z nadrzędną funkcją celu, która będzie oceniać (wg przyjętego kryterium) „jakość" sterowania. Minimalizacja (maksymalizacja) przyjętej funkcji celu jest możliwa z zastosowaniem regulatorów rozmytych. Standardowa reguła sterowania nie daje takich możliwości, ale też jest to tylko standardowa reguła, a nie reguła sterowania optymalnego,
5) porównanie układów regulacji z regulatorem typu (a) oraz typu (b) skłania do następujących stwierdzeń:
   – stosując regulatory o hierarchicznej budowie (typ (b)), zdecydowanie (wielokrotnie) zmniejszamy bazę reguł wnioskowania, która w pierwotnej postaci konieczna jest w układach regulacji z zastosowaniem regulatorów typu (a),
   – rozłożenie wnioskowania rozmytego na kilka regulatorów niższego poziomu pozwala dokładniej śledzić proces sterowania, a w wyniku właściwego dostrojenia regulatorów (uformowanie powierzchni decyzyjnych) wpływa na jakość sterowania.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jak zaznaczono we wstępie, sterowanie zbiornikami retencyjnymi zgodnie ze standardowymi regułami sterowania (wielokrotnie sprawdzane w ekstremalnych warunkach rzeczywistych) stanowi bardzo silny i trudny do podważenia punkt odniesienia w kontekście aplikacji nowych układów sterowania. Nie oznacza to jednak, że nie należy poszukiwać kolejnych rozwiązań w tym zakresie z zastosowaniem nowoczesnych, niestandardowych technik modelowania. Przedstawiony materiał pokazuje inne niż dotychczasowe spojrzenie na możliwości sterowania obiektami hydrotechnicznymi. Zastosowanie logiki rozmytej niejako kłóci się z twardymi zasadami inżynierskimi w tym zakresie, a jednak w konsekwencji okazuje się, że układy sterowania z zastosowaniem regulatorów rozmytych dają jeżeli nie lepsze, to porównywalne wyniki, jednocześnie ukazując różne nowe aspekty czy możliwości układów sterowania.

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, Ollero A., *Fuzzy control of dynamical system. Stability analysis based on the conicity criterion*, Proc. 4th 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'1 Conf. on Fuzzy Logic and Neutral 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*, Antomatica, 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*, Antomatica, Vol. 33, No. 6, 1997, 1029-1039.

[8] Chmielowski W.Z., Twaróg B., *Regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Część I. Podstawy teoretyczne*, Czasopismo Techniczne z. 10-Ś/2006, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.

[9] Chmielowski W.Z., *Hierarchiczny regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Część II. Symulacja*, Czasopismo Techniczne z. 2-Ś/2007, Wyd. Politechniki Krakowskiej.

[10] 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.

[11] Kacprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001.

[12] Kageyama Sh., *Blood glucose control by a fuzzy control system*, Int. 1 Conf. on Fuzzy Logic and Neutral Networks, Iizuka, Japan 1990, 557-560.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[13] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, EXIT, Warszawa 2001.
[14] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 2003.
[15] Rudkowska D., Piliński M., Rudkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, WN PWN, Warszawa 1997.
[16] 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.
[17] Yager R.R., Filev D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1995.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ