

**Mirosław Tomera**  
**Andrzej Kasprowicz**  
**Akademia Morska w Gdyni**

## **ZASTOSOWANIE REGULATORÓW NEURONOWEGO I ROZMYTEGO DO STEROWANIA POZIOMEM WODY W UKŁADZIE KASKADOWYM DWÓCH ZBIORNIKÓW**

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawione zostały regulatory zbudowane w oparciu o metody sztucznej inteligencji. Klasyczny regulator PID zastosowany do sterowania poziomem wody w układzie kaskadowym dwóch zbiorników zastąpiony został regulatorami rozmytym i neuronowym. Struktura regulatora rozmytego działającego w oparciu o logikę rozmytą wzorowana była na klasycznym liniowym regulatorze PID. Regulator neuronowy jest równoważnikiem regulatora rozmytego zbudowanym w oparciu o sztuczną sieć neuronową o radialnych funkcjach bazowych (RBF). Wstępne badania układów sterowania z rozważanymi regulatorami wykonane zostały w środowisku obliczeniowym MATLAB/Simulink z użyciem modeli symulacyjnych. Badania docelowe przeprowadzone były w układzie fizycznym, w którym algorytmy sterowania zaprogramowane zostały w mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335, wykorzystanym do automatycznego sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku. Przy porównaniu uzyskanych wyników pod uwagę wzięty został również klasyczny regulator liniowy PID.

#### Słowa kluczowe:

sterowanie rozmyte, sterowanie neuronowe, radialne funkcje bazowe, układ kaskadowy dwóch zbiorników, mikrokontroler sygnałowy.

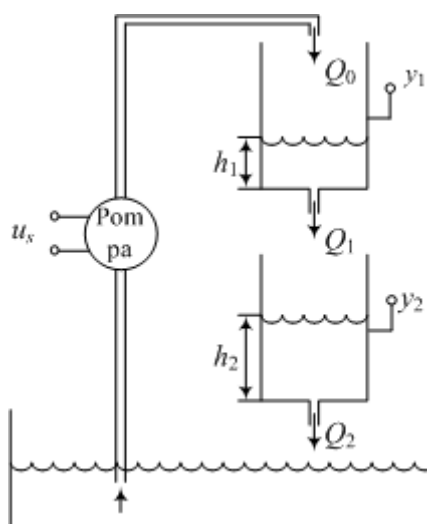
### **WSTĘP**

Logika rozmyta i sztuczne sieci neuronowe mają obecnie zastosowanie w wielu obszarach inżynierii sterowania. Logika rozmyta ma własności operowania na informacjach słabo określonych poprzez wyrażenia lingwistyczne [14], natomiast

sztuczne sieci neuronowe mają zdolności uczenia. W związku z ich komplementarnymi zaletami pojawiły się rozszerzone rozwiązania integrujące te dwa modele i popularnie zostały nazwane układami neuronowo-rozmytymi [13]. Jednym z najpopularniejszych rozwiązań neuronowo-rozmytych jest sztuczna sieć neuronowa o radialnych funkcjach bazowych (RBF — *Radial Basis Function*). Ten typ sieci ma strukturę obliczeniową zbliżoną do układów rozmytych [2].

W niniejszym artykule opisane i przebadane zostały w układzie kaskadowym dwóch zbiorników dwa algorytmy sterowania: rozmytego i neuronowo-rozmytego. Pierwszy regulator zrealizowany został w oparciu o logikę rozmytą i nazywany jest PDPI-FL (*Proportional-Derivative, Proportional-Integral, Fuzzy Logic*), drugi natomiast wykorzystujący sieci neuronowe o radialnych funkcjach bazowych nazwany został PDPI-RBF (*Proportional-Derivative, Proportional-Integral, Radial Basis Function*).

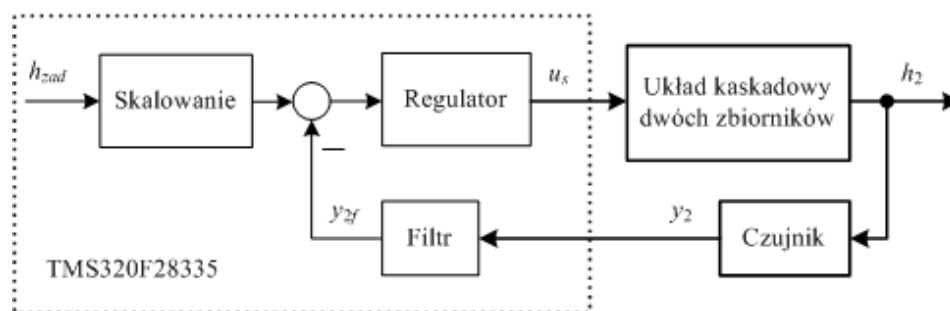
Badania rozważanych algorytmów sterowania przeprowadzone zostały na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w mikrokontroler sygnałowy TMS320F28335 wykorzystywany do sterowania poziomem wody w układzie dwóch zbiorników połączonych kaskadowo [3]. W sposób schematyczny zastosowany obiekt sterowania pokazany został na rysunku 1. Zadanie sterowania polegało na stabilizacji poziomu wody w dolnym zbiorniku.



Rys. 1. Układ dwóch zbiorników połączonych kaskadowo

Źródło: M. Tomera, J. Kęska, A. Kasprowicz, *Sterowanie poziomem wody w kaskadzie dwóch zbiorników przy użyciu mikrokontrolera TMS320F28335*, „Zeszyty Naukowe” Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, 2011, nr 30.

Zastosowany układ sterowania z badanymi regulatorami przedstawiony został na rysunku 2. Bloki 'Skalowanie', 'Filtr' i 'Regulator' zaimplementowane zostały w mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335 [8], pozostałe bloki przedstawiają elementy istniejące fizycznie.



Rys. 2. Struktura pętli układu sterowania

Źródło: opracowanie własne.

Równania zawarte w blokach 'Skalowanie', 'Filtr' i 'Regulator' zaimplementowane zostały w mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335 programowanym poprzez łącze USB z dodatkowego komputera, na którym zainstalowane jest oprogramowanie Code Composer Studio zawierające edytor i kompilator języka C [7].

Na wejściu układu sterowania znajduje się blok 'Skalowanie', w którym znajduje się pomierzona charakterystyka czujnika. Blok ten ma za zadanie przeskalowanie wartości zadanej poziomu wody w dolnym zbiorniku w taki sam sposób, w jaki dokonuje tego zastosowany czujnik pomiarowy. Chodzi o to, aby sygnały porównywane na węzle sumacyjnym znajdującym się na wejściu regulatora wyrażone były w tych samych jednostkach. W bloku 'Regulator' zawarte są algorytmy sterowania badanymi regulatorami. Blok 'Filtr' służy do filtracji sygnału napięciowego uzyskiwanego z czujnika mierzącego poziom wody w zbiorniku. Szczegóły dotyczące zastosowanego rozwiązania można znaleźć w pracach [6, 9].

W pierwszej kolejności rozważane algorytmy sterowania testowania poddane zostały próbom w badaniach symulacyjnych. Wymagało to znajomości modelu matematycznego istniejącego fizycznie układu kaskadowego dwóch zbiorników. W tym celu skorzystano z modelu matematycznego wyznaczonego wcześniej i opisanego w [9]. Synteza regulatora PID wykorzystywanego do porównań dokonana została metodą emulacji w sposób opisany w pracy [11]. Struktura regulatorów rozmytego PDPI-FL i neuronowego PDPI-RBF wzorowana była na strukturze klasycznego regulatora liniowego PID, natomiast parametry tych regulatorów dobierane były ręcznie na podstawie obserwacji zakresów sygnałów występujących w układzie sterowania z regulatorem liniowym PID.

## OPIS REGULATORA DZIAŁAJĄCEGO W OPARCIU O LOGIKĘ ROZMYTĄ

W tej części artykułu opisany jest uproszczony algorytm sterowania działający w oparciu o logikę rozmytą zaproponowaną w pracach [4, 5], następnie algorytm ten zastosowany zostanie w sieci o radialnych funkcjach bazowych.

### Algorytm regulatora rozmytego

Pod nazwą sterowania rozmytego kryje się algorytm, który opisany jest przez system zawierający reguły *JEŻELI*, *TO*, w którym wnioskowanie odbywa się przy wykorzystaniu logiki rozmytej. Każda reguła składa się z części *JEŻELI*, nazywanej poprzednikiem, oraz części *TO*, zwanej następnikiem. Poprzednik reguły zawiera zbiór warunków, następnik zawiera wniosek. Każda reguła działa w ten sposób, że jeśli spełnione są warunki poprzednika, to wykonuje się wnioski następnika. Zbiór tych reguł nazywany jest bazą wiedzy powiązaną z regulatorem rozmytym [12].

Ogólnie, dla układu o  $N$  wejściach i  $M$  wyjściach (MIMO), niech zmienne wejściowe oznaczone zostaną jako  $x_n$ , natomiast zmienne wyjściowe  $y_m$ , wówczas  $i$ -ta reguła sterowania rozmytego może zostać zapisana jako:

$$\begin{aligned} & \text{JEŻELI } X_1 \text{ jest } R_1^i \text{ I } \dots X_n \text{ jest } R_n^i \text{ I } \dots X_N \text{ jest } R_N^i \\ & \text{TO } Y_1 \text{ jest } S_1^i \text{ I } \dots Y_m \text{ jest } S_m^i \text{ I } \dots Y_M \text{ jest } S_M^i, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$X_n, Y_m$  — odpowiednio wejściowe i wyjściowe rozmyte zmiennymi lingwistycznymi odpowiadającymi wartościom numerycznym  $x_n, y_m$ ;

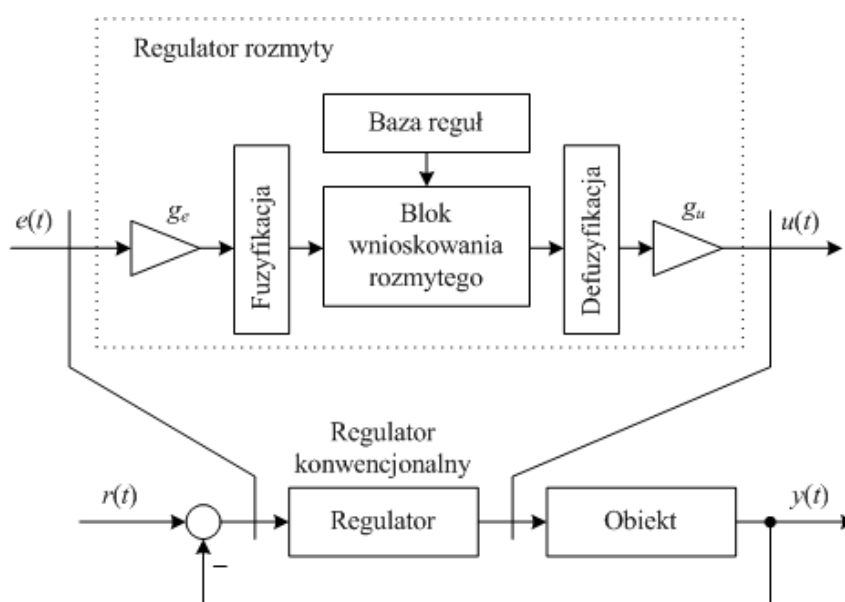
$R_n, S_m$  — rozmyte funkcje przynależności zdefiniowane na przestrzeniach rozważań, odpowiednio  $\underline{X}_n$  i  $\underline{Y}_m$ ;

$R_n^i, S_m^i$  — znormalizowane podzbiory rozmyte zastosowane do  $i$ -tej reguły.

Sterowanie wykorzystujące logikę rozmytą obejmuje trzy główne stopnie: fuzyfikację (rozmywanie), wnioskowanie rozmyte i defuzyfikację (wyostrzenie). Pierwszy i ostatni stopień są konieczne do przekonwertowania sygnałów ostrych na wartości rozmyte, i na odwrót. Mechanizm wnioskowania rozmytego oznacza proces polegający na wyznaczeniu wartości wyjściowych następnika reguły na podstawie

wartości wejściowych poprzednika reguły w koniunkcji z posiadaną bazą wiedzy. Procedura obliczania nierozmytego wyjścia bazy reguł regulatora rozmytego opisanych wzorem (1) oparta jest na następujących krokach. Pierwszy krok to wyznaczenie poziomu zapłonu każdej reguły. Poziom zapłonu reguły uzyskuje się jako maksimum stopnia dopasowania zbioru rozmytego poprzednika każdej reguły dla odpowiednich wartości wejściowych  $w_i \in [0, 1]$ . W drugim kroku, zwanym implikacją, funkcje przynależności zbiorów rozmytych następnika są obcinane od góry do poziomu odpowiedniego poziomu zapłonu, w ten sposób otrzymuje się zbiory rozmyte wnioskowane z poszczególnych reguł. W trzecim kroku, zwanym agregacją, reguły wyjścia poszczególnych reguł są agregowane i tworzą całkowite wyjście bazy reguł. Ostatni etap wyznaczania wyjścia regulatora rozmytego to wyostrzanie wykonywane najczęściej metodą środka ciężkości.

Na rysunku 3. pokazany został sposób, w jaki układ logiki rozmytej może zastąpić regulator konwencjonalny. Procedura zaadaptowana w rozważanym sterowaniu rozmytym polega na naśladowaniu działania regulatora konwencjonalnego przy użyciu reguł rozmytych.



Rys. 3. Regulator rozmyty i jego umiejscowienie w konwencjonalnej pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie  $r(t)$  jest sygnałem zadany,  $y(t)$  wielkością regulowaną,  $e(t)$  sygnałem uchybu,  $u(t)$  sygnałem sterującym

Źródło: M. Tomera, Porównanie jakości pracy trzech algorytmów typu PID: liniowego, rozmytego i neuronowego, „Automatyka — Elektryka — Zakłócenia”, 2011, nr 6, [www.elektro-innowacje.pl](http://www.elektro-innowacje.pl).

W rozważanym problemie sterowania poziomem wody w układzie kaskadowym dwóch zbiorników pokazanym na rysunku 2. regulator rozmyty będzie naśladował działanie regulatora PID zapisanego w następującej postaci czasowej:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (2)$$

Pierwszy składnik ze wzoru (2) podzielony zostanie na dwie jednakowe części, co można zapisać następująco:

$$u(t) = \frac{1}{2} K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{2} K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau = u_{PD}(t) + u_{PI}(t), \quad (3)$$

gdzie:

$e(t)$  — różnica pomiędzy wartością zadaną i pomierzoną wartością poziomu w dolnym zbiorniku.

Pierwsze dwa składniki (3) mają strukturę regulatora PD, natomiast dwa ostatnie strukturę regulatora PI. Utworzony w ten sposób regulator rozmyty PDPI-FL będzie składał się z dwóch regulatorów PD-FL i PI-FL połączonych równolegle. Dalsze szczegóły związane z uzyskanym regulatorem rozmytym można znaleźć w [10].

### **Sztuczna sieć neuronowa o radialnych funkcjach bazowych**

Radialne funkcje bazowe lokowane są wewnątrz dwuwarstwowej jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej. Taka sieć charakteryzowana jest przez zbiór wejść i zbiór wyjść. Pomiedzy wejściami i wyjściami znajduje się warstwa ukryta składająca się z neuronów zawierających radialne funkcje bazowe. Ogólny schemat blokowy sieci RBF o wielu wejściach i wyjściach pokazany został na rysunku 4.

Różne funkcje mogą być testowane jako funkcje aktywacji dla sieci RBF [1]. Najczęściej stosowaną funkcją aktywacji neuronów w warstwie ukrytej jest funkcja Gaussa o postaci

$$R_i(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - m_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (4)$$

gdzie:

$\mathbf{x}$  — wektor wejściowy;

$m_i$  — środek;

$\sigma_i$  — odchyłka standardowa funkcji Gaussa.

Wartości wyjściowe sieci obliczane są jako suma sygnałów wyjściowych kolejnych neuronów radialnych pomnożonych przez odpowiednie współczynniki wagowe

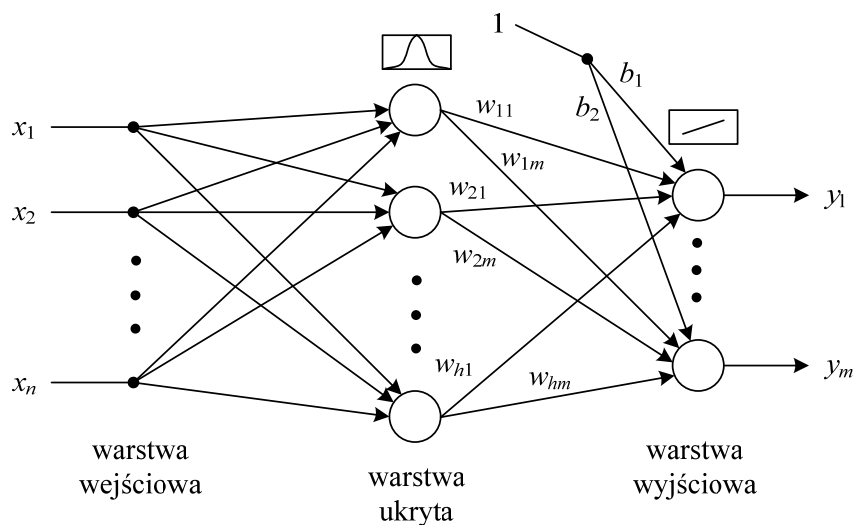
$$y_k = \sum_{i=1}^N w_{ik} R_i(\mathbf{x}) + b_k, \quad (5)$$

gdzie:

$y_k$  — wyjście  $k$ -tego neuronu wyjściowego;

$w_{ik}$  — współczynnik wagowy pomiędzy wyjściem  $i$ -tego neuronu warstwy ukrytej a  $k$ -tym neuronem wyjściowym;

$b_k$  — wartość współczynnika progowego  $k$ -tego neuronu wyjściowego (bias).



Rys. 4. Sztuczna sieć neuronowa typu RBF

Źródło: M. Tomera, *Porównanie jakości pracy trzech algorytmów typu PID: liniowego, rozmytego i neuronowego*, „Automatyka — Elektryka — Zakłócenia”, 2011, nr 6, [www.elektro-innowacje.pl](http://www.elektro-innowacje.pl).

### Konfiguracja sieci RBF na bazie regulatora rozmytego

Sieci RBF (rys. 4.) mają podobną procedurę obliczeniową do tej, która stosowana jest dla regulatorów rozmytych. Położenia środków funkcji radialnych są równoważne położeniom punktów centralnych zbiorów rozmytych wchodzących w skład funkcji przynależności. Przez właściwy wybór współrzędnych położenia środka radialnych funkcji bazowych, które będą tworzyły funkcje przynależności, sieć RBF

może zostać użyta do reprezentowania bazy reguł rozmytych. Liczba węzłów w warstwie ukrytej jest równa liczbie reguł sterowania rozmytego. Wyjście z każdego węzła jest skalowane przez wartość wynikającą z rozmytej bazy reguł [10].

Regulator neuronowy w identyczny sposób jak regulator rozmyty wpinany jest w układ sterowania pokazany na rysunku 3. Dalsze szczegóły związane z używanym regulatorem rozmytym można znaleźć w pracy [10].

## WSKAŹNIKI JAKOŚCI

Do oceny jakości pracy przyjęte zostały czasowe wskaźniki jakości definiowane na podstawie odpowiedzi skokowej, takie jak: czas narastania, czas regulacji i maksymalne przeregulowanie. Czas narastania zdefiniowany został jako odcinek czasu, w którym odpowiedź skokowa układu zmienia swoją wartość od 10% do 90% wartości ustalonej. Maksymalne przeregulowanie wyrażone w procentach zdefiniowane zostało jako iloraz amplitudy maksymalnego przeregulowania liczonej względem stanu ustalonego do wartości ustalonej odpowiedzi skokowej. Czas regulacji mierzony był przy 5% strefie dokładności. Wyznaczone zostały również dwa całkowite wskaźniki jakości wyrażone w postaci sumy — pierwszy opisany wzorem (6) liczony jako suma kwadratów uchybu, drugi natomiast opisany wzorem (7) jako suma z modułów uchybu.

$$J_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2 ; \quad (6)$$

$$J_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e_k| , \quad (7)$$

gdzie

$$e_k = e(kT) = h_2^{zad}(kT) - h_2(kT) . \quad (8)$$

Wartości zbierane do wyznaczanych całkowitych wskaźników jakości pobierane były z okresem próbkowania  $T = 2,5$  [s].

## WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Opisane w poprzednich podrozdziałach algorytmy sterowania zastosowane zostały do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku z jednakowym okresem



próbkowania  $T = 5$  [s] dla wszystkich typów badanych regulatorów. Algorytmy sterowania obiektem rzeczywistym zaimplementowane zostały w mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335 produkowanym przez firmę Texas Instruments.

Zanim uzyskana została pewność, że analizowane algorytmy sterowania będą poprawnie sterować obiektem rzeczywistym, prowadzone były badania symulacyjne w środowisku obliczeniowym Matlab/Simulink. Badane algorytmy sterowania we wstępnej fazie uruchamiania zapisane zostały w postaci S-funkcji w kodzie Matlaba, a następnie w celu użycia ich do sterowania w czasie rzeczywistym przetłumaczone zostały na język C.

Badane regulatory zastosowane zostały do stabilizacji poziomu wody w dolnym zbiorniku. Przeprowadzono dwa rodzaje prób przy poziomach stabilizacji znajdujących się w różnych odległościach od poziomu ( $h_2 = 10$  cm), przy których był linearyzowany model matematyczny obiektu i wyznaczona została transmitancja wykorzystana do syntezy parametrów regulatora PID. Badany obiekt jest nieliniowy i im dalej od punktu pracy wykorzystanego do linearyzacji wykonywana jest stabilizacja poziomu, tym bardziej dynamika obiektu odbiega od zlinearyzowanej.

Przeprowadzone badania miały za zadanie sprawdzenie jakości sterowania przy użyciu rozważanych regulatorów przy zmianach punktów pracy. W tym celu wygenerowany został sygnał zadany w postaci fali prostokątnej o czasie trwania pojedynczego poziomu równym 400 sekund. W pierwszej próbie odchyłki stabilizowanych poziomów od wartości wykorzystywanej w linearyzacji wynosiły 2 cm i stabilizacja odbywała się naprzemiennie na poziomach 12 cm i 8 cm, co powodowało skokową zmianę wartości zadanej o 4 cm. W drugiej próbie zwiększony został skok zmian do 6 cm i stabilizacja odbywała się na poziomach 7 cm i 13 cm.

Wartości parametrów (nastaw) regulatora PID do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku wyznaczone zostały metodą syntezy [11] na podstawie wyznaczonego wcześniej modelu matematycznego obiektu [9]. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych obiekt sterowania składający się z pompy, zbiorników i czujników zamodelowany został w postaci bloków w Simulinku. Charakterystyki statyczne pompy i czujników zamodelowane zostały na podstawie zarejestrowanych punktów pomiarowych, natomiast dynamiki zbiorników na podstawie opisujących je równań różniczkowych [9]. W blokach odwzorowujących zachowanie czujników zamodelowane zostały szумы pomiarowe przy użyciu generatora liczb losowych o zerowej wartości średniej i wariancji równej 0.01.

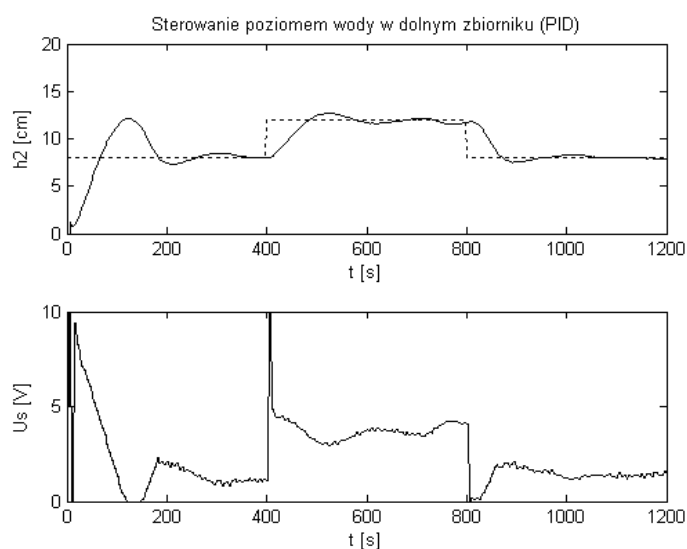
W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały badania symulacyjne z wykorzystaniem do sterowania poziomem w dolnym zbiorniku algorytmu dyskretnego regulatora liniowego PID. Wartości parametrów regulatora dyskretnego PID wyznaczone zostały metodą emulacji z okresem próbkowania  $T = 5$  [s] [11].

Kolejnym krokiem badania regulatora dyskretnego PID było zaimplementowanie tego algorytmu do sterowania poziomem wody w obiekcie rzeczywistym. Uzyskane wyniki przedstawione zostały na rysunkach 5. i 6. Porównując te rysunki, widać, że zwiększenie odchyłek poziomu zadanego od punktu pracy wykorzystanego do linearyzacji pogorszyło wyraźnie jakość sterowania, zwiększyły się amplitudy oscylacji i czasy regulacji.

Następnym badanym regulatorem był regulator rozmyty PDPI-FL, składający się z dwóch regulatorów rozmytych PD-FL i PI-FL połączonych równolegle. Wzmocnienia skalujące regulatora PDPI-FL dobierane były ręcznie w badaniach symulacyjnych przy wykorzystaniu regulatora liniowego PID, pozwalającego zorientować się w jakim zakresie zmieniają się sygnały wejściowe i wyjściowe. Wzmocnienia skalujące były dobierane w taki sposób, aby sygnały wejściowe znajdowały się w zakresie roboczym wejściowych funkcji przynależności pomiędzy nasyceniami i tak, aby wykorzystywane były wszystkie zbiory rozmyte. W wyniku ręcznego strojenia ustalone zostały następujące wartości wzmocnień skalujących:

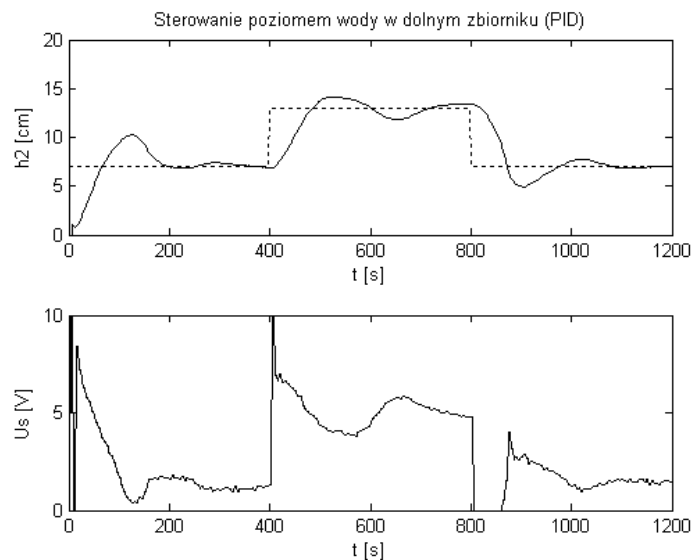
$$\text{PD-FL: } g_e = 1.0, \quad g_c = 0.02, \quad g_u = 5.0; \quad (9)$$

$$\text{PI-FL: } g_e = 1.0, \quad g_c = 0.02, \quad g_u = 0.2. \quad (10)$$



Rys. 5. Sterowanie PID ( $h_{zad} = 8-12$  cm)

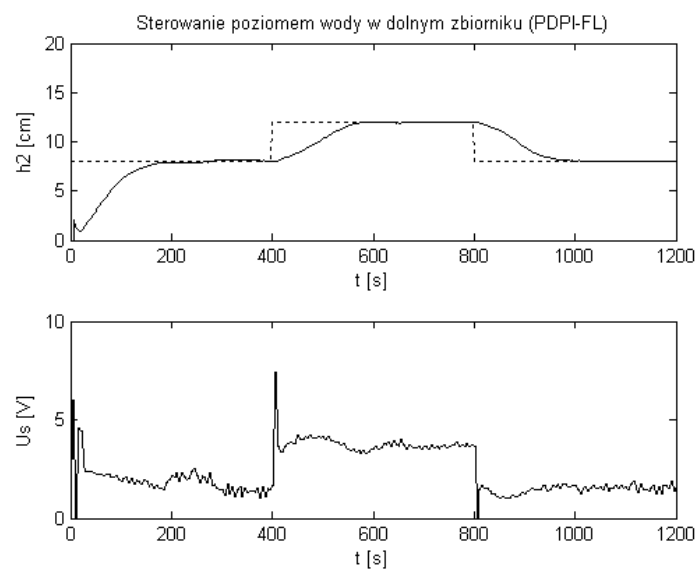
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Sterowanie PID ( $h_{zad} = 7 - 13$  cm)

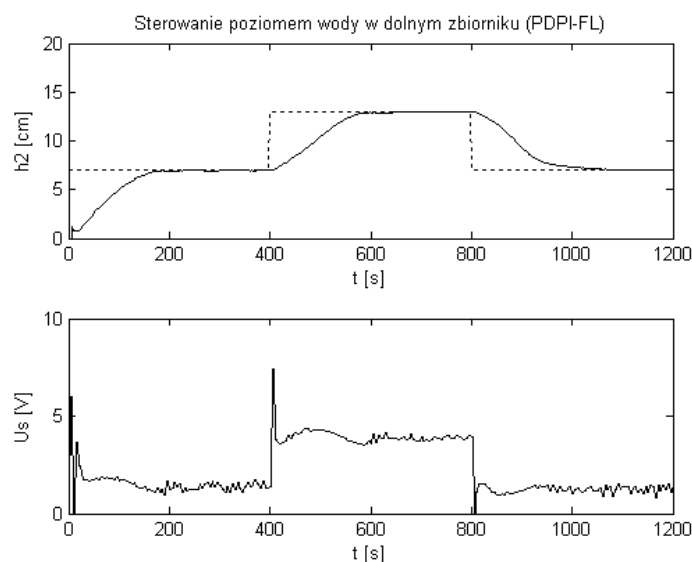
Źródło: opracowanie własne.

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych zaprojektowany regulator rozmyty PDPI-FL zastosowany został do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku na obiekcie rzeczywistym i uzyskane wyniki sterowania przedstawiono na rysunkach 7. i 8.



Rys. 7. Sterowanie rozmyte PDPI-FL ( $h_{zad} = 8-12$  cm)

Źródło: opracowanie własne.

Rys. 8. Sterowanie rozmyte PDPI-FL ( $h_{zad} = 7-13$  cm)

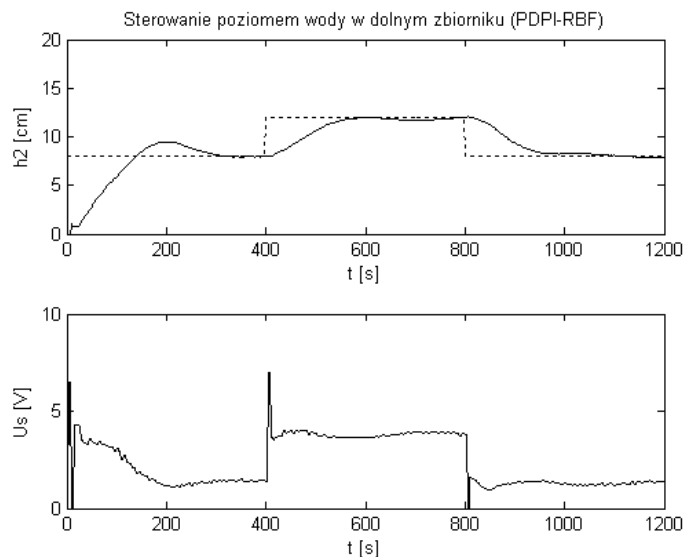
Źródło: opracowanie własne.

Ostatnim badanym regulatorem był regulator PDPI-RBF zbudowany na sieci neuronowej o radialnych funkcjach bazowych (RBF), składający się z dwóch regulatorów neuronowych PD-RBF i PI-RBF połączonych równolegle. Wzmocnienia skalujące regulatora neuronowego PDPI-RBF dobierane były w identyczny sposób jak to miało miejsce dla regulatora rozmytego. W wyniku ręcznego strojenia ustalone zostały następujące wartości wzmocnień skalujących:

$$\text{PD-RBF:} \quad g_e = 1.0, \quad g_c = 0.02, \quad g_u = 5.0 \quad (11)$$

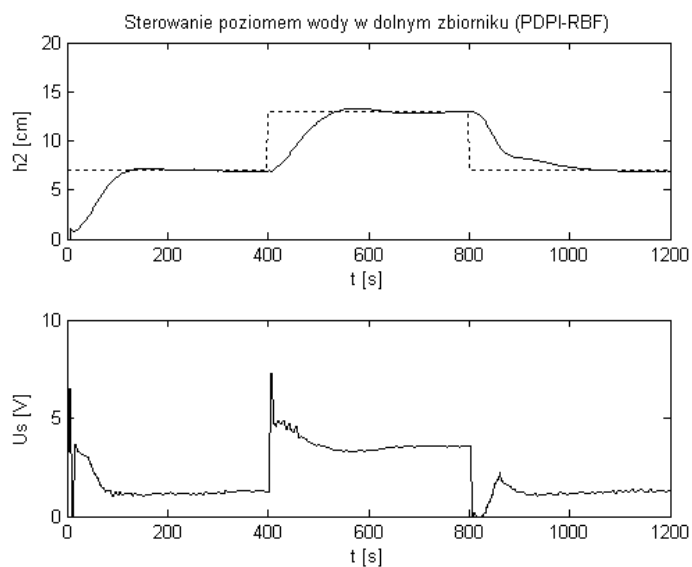
$$\text{PI-RBF:} \quad g_e = 1.0, \quad g_c = 0.02, \quad g_u = 0.2 \quad (12)$$

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych zaprojektowany regulator neuronowy PDPI-RBF zastosowany został do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku na obiekcie rzeczywistym i uzyskane wyniki sterowania przedstawione zostały na rysunkach 9. i 10.



Rys. 9. Sterowanie neuronowe PDPI-RBF ( $h_{zad} = 8-12$  cm)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Sterowanie neuronowe PDPI-RBF ( $h_{zad} = 7-13$  cm)

Źródło: opracowanie własne.

## ANALIZA PORÓWNAWCZA BADANYCH REGULATORÓW

Dla przeprowadzonych prób badawczych wyznaczone zostały czasowe wskaźniki jakości. Do oceny wybrano dwie skokowe zmiany poziomu zadanego — pierwszą przy skokowym zmniejszaniu wartości zadanej (odcinek 2.), drugą przy skokowym wzroście wartości zadanej (odcinek 3.). Wskaźniki jakości wyznaczone dla drugiego odcinka zawarte zostały w tabeli 1., natomiast dla odcinka trzeciego w tabeli 2. Analizując uzyskane wyniki zawarte w tabeli 1., wyraźnie widać, że najlepsza jakość sterowania uzyskana została po zastosowaniu regulatora rozmytego PDPI-FL. Przy użyciu tego regulatora uzyskano najmniejsze wartości maksymalnego przeregulowania, czasu regulacji oraz wartości całkowitych wskaźników jakości. Analizując wykresy czasowe widać, że tę najlepszą jakość uzyskano przy największej spośród badanych regulatorów aktywności sterowanej pompy wodnej (rys. 7. i 8.).

Tabela 1. Wskaźniki jakości wyznaczone na zboczu opadającym sygnału zadanego (odcinek 2.)

	$t_n$	$M_p$	$t_R$	$J_{c1}$	$J_{c2}$	$h_{zad}$
	[s]	[%]	[s]	[-]	[-]	[cm]
PID	60,0	17,4	–	119,8	56,2	8–12
	55,0	19,6	–	315,8	100,1	7–13
PDPI-FL	120,0	–	257,5	215,1	75,2	8–13
	130,0	–	232,5	476,6	114,2	7–13
PDPI-RBF	117,5	–	377,5	195,7	75,4	8–12
	90,0	5,2	340,0	362,4	90,1	7–13

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Wskaźniki jakości wyznaczone na zboczu narastającym sygnału zadanego (odcinek 3.)

	$t_n$	$M_p$	$t_R$	$J_{c1}$	$J_{c2}$	$h_{zad}$
	[s]	[%]	[s]	[-]	[-]	[cm]
PID	45,0	12,1	–	114,5	45,4	8–12
	40,0	34,5	340,0	379,8	102,2	7–13
PDPI-FL	120,0	–	217,5	209,4	73,3	8–12
	130,0	–	260,0	478,6	115,2	7–13
PDPI-RBF	115,0	5,0	–	212,4	79,2	8–12
	145,0	2,5	350,0	345,0	93,8	7–13

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie analizy wskaźników jakości zawartych w tabeli 1. niewiele słabiej od regulatora rozmytego wypadł regulator neuronowy PDPI-RBF. Jego zaletą było to, że sygnał sterujący pompą był prawie gładki (patrz rys. 9. i 10.). Najlepsze wyniki uzyskano z użyciem regulatora PID.

Analizując uzyskane wskaźniki zawarte w tabeli 2., już nie tak łatwo wskazać regulator, przy użyciu którego uzyskano najlepsze wyniki. Jeśli chodzi o wyznaczone całkowite wskaźniki jakości, najlepsze wyniki uzyskano z użyciem regulatora rozmytego PDPI-FL, ale najmniejsze maksymalne przeregulowania i czasy regulacji uzyskiwano przy użyciu regulatora neuronowego PDPI-RBF. Znow najslabiej wypadł regulator liniowy PID.

## UWAGI I WNIOSKI

Przebadane zostały trzy algorytmy sterowania, pierwszy liniowy PID i dwa inne (rozmyty i neuronowy) zbudowane w oparciu o strukturę regulatora liniowego PID. Wszystkie te trzy regulatory pracowały w czasie dyskretnym z okresem próbkowania  $T = 5$  [s]. W wyniku przeprowadzonych badań sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku w układzie kaskadowym składającym się z dwóch zbiorników uzyskane wskaźniki jakości sterowania pozwalają stwierdzić, że klasyczny regulator liniowy nie zawsze pozwala na uzyskanie najlepszej jakości sterowania. Regulatory rozmyty i neuronowy, które bazują na bardziej złożonych algorytmach przetwarzania sygnałów wejściowych od regulatora liniowego, pozwoliły na uzyskanie zdecydowanie lepszej jakości sterowania.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Chen S., Cowan C. F. N., Grant P. M., *Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis functions networks*, 'IEEE Transactions on Neural Networks', 1991, Vol. 2, No 2, pp. 302–309.
- [2] Katayama R., Kajitani Y., Kuwate K., Nishida Y., *Self generating radial basis function as neuro-fuzzy model and its applications to nonlinear prediction of chaotic time series*, Proceedings of 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Francisco, USA, Vol. 1, pp. 407–414.
- [3] Kęska J., *Sterowanie obiektem rzeczywistym przy użyciu cyfrowego procesora sygnałowego*, praca inżynierska, Akademia Morska, Gdynia 2010.
- [4] Lee T. H., Nie J. H., Tan W. K., *A self-organizing fuzzified basis function network control system applicable to nonlinear servomechanisms*, 'Mechatronics', 1995, Vol. 5, No 6, pp. 695–713.
- [5] Linkens D. A., Nie J., *Fuzzified RBF network-based learning control: structure and self-construction*, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco, 28 March — 1 April 1993, pp. 1016–1021.
- [6] Pozorski K., *Filtracja optymalna sygnałów pomierzonych w układzie kaskadowym dwóch zbiorników*, praca magisterska, Akademia Morska, Gdynia 2012.

- [7] Texas Instruments, *Code Composer Studio IDE Getting Started Guide. User's Guide*, 2005.
- [8] Texas Instruments, *TMS320F28335 Digital Signal Processor Data Manual*, 2010.
- [9] Tomera M., Kęska J., Kasproicz A., *Sterowanie poziomem wody w kaskadzie dwóch zbiorników przy użyciu mikrokontrolera TMS320F28335*, „Zeszyty Naukowe” Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, 2011, nr 30, s. 123–132.
- [10] Tomera M., *Porównanie jakości pracy trzech algorytmów typu PID: liniowego, rozmytego i neuronowego*, „Automatyka — Elektryka — Zakłócenia”, 2011, nr 6, s. 59–77, [www.elektro-innowacje.pl](http://www.elektro-innowacje.pl).
- [11] Tomera M., Talaśka M., *Porównanie jakości pracy regulatorów stanu i PID w układzie kaskadowym dwóch zbiorników* (przyjęty do druku w „Zeszytach Naukowych” Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, 2012).
- [12] Yager R. R., Filev D. P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1995.
- [13] Yamaguchi T., Takagi T., Mita T., *Self-organizing control using fuzzy neural networks*, ‘International Journal of Control’, 1992, Vol. 56, No 2, pp. 415–439.
- [14] Zadeh L. A., *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*, ‘IEEE Transactions Systems Man., and Cybernetics’, 1973, Vol. SMC-3, No 1, pp. 28–43.

## USE OF NEURAL AND FUZZY CONTROLLERS TO CONTROL WATER LEVEL IN TWO-TANK CASCADE SYSTEM

### ABSTRACT

This paper presents controllers built according to the methods of artificial intelligence. The classic PID controller used to control the level of water in a cascade of two tanks was replaced with regulators: fuzzy and neural. The structure of fuzzy controller acting on the fuzzy logic was based on a classical linear PID controller. A neural controller is equivalent to a fuzzy controller based on artificial neural network having radial base functions (RBF). Preliminary testing of control systems with the controllers considered were made in computing simulation MATLAB/Simulink. The final investigations were conducted in the target physical system in which the control algorithms were programmed in the signal processor TMS320F28335, used for automatic control of the water level in the lower tank. In comparing the results obtained the classic linear PID controller was considered.

#### Keywords:

fuzzy control, neural control, radial base functions, two-tank cascade system, digital signal processor.