

# Zaawansowane metody sterowania kaskadowym układem zbiorników

Piotr Bakun, Oskar Długoński, Robert Piotrowski

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

**Streszczenie:** W artykule analizowany jest układ trzech kaskadowo połączonych zbiorników z elementami wykonawczymi i pomiarowymi. Zadanie sterowania polega na takiej regulacji przepływem wody za pomocą pompy oraz stopniem otwarcia zaworów, aby jak najdokładniej i jak najszybciej osiągnąć zadaną wysokość słupa cieczy w każdym ze zbiorników. Zaprojektowano trzy układy regulacji poziomu wody w każdym ze zbiorników z wykorzystaniem algorytmów: klasycznego PI, wieloobszarowego i odpornego z modelem. Przeprowadzono analizę porównawczą opracowanych algorytmów sterowania dla stałej i zmiennej trajektorii zadanej. Badania wykonano w środowisku MATLAB/Simulink, komunikującym się z obiektem rzeczywistym za pomocą karty pomiarowej zainstalowanej w komputerze PC.

**Słowa kluczowe:** układ kaskadowy zbiorników, układ regulacji PI, wieloobszarowy układ regulacji, odporny układ regulacji z modelem

## 1. Wprowadzenie

Badanym obiektem są połączone kaskadowo trzy różne zbiorniki. Znajdują się one w laboratorium Katedry Inżynierii Systemów Sterowania (Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska) i zostały zakupione od firmy INTECO [1]. Urządzeniami wykonawczymi są pompa oraz trzy pary zaworów, po jednej dla każdego ze zbiorników. Każda para zaworów składa się z zaworu ręcznego i sterowanego. Pompa odpowiedzialna jest za dostarczanie wody ze zbiornika magazynującego do górnego zbiornika, natomiast zawory odpowiadają za przepływ wody między poszczególnymi rezerwuarami. Urządzeniami pomiarowymi są piezorezystancyjne czujniki ciśnienia, po jednym dla każdego ze zbiorników, wraz z przetwornikami zamieniającymi wartość ciśnienia na odpowiedni sygnał elektryczny odpowiadający wysokości słupa cieczy w zbiorniku. Wymiana danych między obiektem a oprogramowaniem MATLAB/Simulink, zainstalowanym na komputerze, odbywa się za pomocą karty akwizycji danych.

Kaskadowo połączone zbiorniki są często badanym obiektem sterowania. W pracy [2] przedstawiono układ kaskadowy dwóch zbiorników, w których sterowanie zrealizowano za pomocą regulatorów rozmytych i neuronowych. Celem była regulacja poziomu wody w dolnym zbiorniku przez sterowanie tylko pompą dostarczającą wodę do układu. Autorzy osiągnęli lepszą

jakość sterowania, czym udowodnili wyższość obu regulatorów nad regulatorem liniowym PID. W pracy [3] autorzy zdecydowali się na sterowanie poziomem wody w zbiornikach z wykorzystaniem regulatorów PID i metody alokacji biegunów.

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wyników sterowania poziomem wody we wszystkich trzech zbiornikach, przy zastosowaniu różnych układów regulacji: PI, wieloobszarowego oraz odpornego z modelem. Przeprowadzono testy symulacyjne jakości regulacji dla stałej i zmiennej trajektorii zadanej (wysokość słupa wody), sterując pompą oraz górnym i środkowym zaworem. Dolny zawór był otwarty, co umożliwiło ciągły transport cieczy, a tym samym ciągłą regulację.

## 2. Obiekt sterowania

### 2.1. Zbiorniki

Obiekt sterowania zbudowany jest z trzech zbiorników głównych oraz zbiornika odpowiadającego za magazynowanie wody (rys. 1). Górny zbiornik w kształcie prostopadłościanu, ze względu na stały przekrój poprzeczny, ma dynamikę liniową. Środkowy zbiornik w kształcie trapezu prostokątnego oraz dolny zbiornik w kształcie ćwierćokręgu mają zmienne przekroje poprzeczne, charakteryzują się więc nieliniową dynamiką. Na rys. 2 przedstawiono wymiary poszczególnych zbiorników w centymetrach.

### 2.2. Urządzenia wykonawcze

#### 2.2.1. Pompa

System wyposażono w pompę prądu stałego (rys. 3), zapewniającą transport cieczy ze zbiornika magazynującego do górnego zbiornika głównego. Pompa DC (ang. *Direct Current*) zasilana jest sygnałem PWM (ang. *Pulse Width Modulation*). Metoda ta polega na zmianie wypełnienia sygnału prądowego lub napięciowego przy stałej amplitudzie i częstotliwości [1].

#### Autor korespondujący:

Robert Piotrowski, robert.piotrowski@pg.gda.pl

#### Artykuł recenzowany

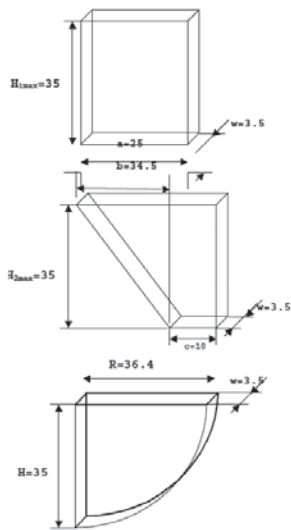
nadesłany 9.04.2015 r., przyjęty do druku 2.07.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Kaskada zbiorników  
Fig. 1. System of cascade tanks



Rys. 2. Wymiary zbiorników [1]  
Fig. 2. Tanks' dimensions [1]



Rys. 3. Pompa DC  
Fig. 3. DC Pump

### 2.2.2. Zawory

W badanym układzie wykorzystano trzy pary zaworów, po jednej dla każdego zbiornika. Para składa się z zaworu ręcznego oraz sterowanego (rys. 4). Zastosowane urządzenia, regulowane za pomocą sygnału PWM, charakteryzują się przepływem zmiennym proporcjonalnym do sygnału sterującego, nie wymagają minimalnego ciśnienia i mogą być montowane w dowolnej pozycji [4]. Podczas badań testowych zaobserwowano występującą strefę nieczułości, tj. mimo podania sygnału sterującego o pewnej wartości, zawory dalej pozostawały zamknięte. Wielkością graniczną dla sygnału PWM jest wartość bliska 0,6, co oznacza, że podanie sygnału o mniejszej wartości nie spowoduje otwarcia zaworu sterowanego.



Rys. 4. Para zaworów – ręczny (lewy), sterowany (prawy)  
Fig. 4. Pair of valves – manual (left), controllable (right)

### 2.3. Urządzenia pomiarowe

Wszystkie trzy zbiorniki wyposażono w piezorezystancyjne czujniki ciśnienia do pomiaru poziomu cieczy (rys. 5). Urządzenia te, wykorzystując efekt zmiany rezystancji mate-

riału pod wpływem działającego ciśnienia, zapewniają bardzo dokładny pomiar sygnału wyjściowego – proporcjonalny do ciśnienia wody w zbiorniku. Czujniki piezorezystancyjne zawierają mostek, najczęściej Wheatstone'a. W momencie, w którym następuje zmiana ciśnienia, wartości rezystancji oporników w mostku zmieniają się – jedne rosną, inne maleją. Rozstrojenie mostka powoduje pojawienie się sygnału wyjściowego [1].



Rys. 5. Czujnik piezorezystancyjny  
Fig. 5. Piezoresistive sensor

## 3. Model obiektu sterowania

Model obiektu sterowania można przedstawić w postaci równań opisujących każdy ze zbiorników oraz zależności między nimi [5]:

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{1}{a_1 w_1} q(t) - \frac{1}{a_1 w_1} C_1 H_1(t)^{\alpha_1} \quad (1)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{1}{c_2 w_2 + \frac{H_2(t)}{H_{2max}} b_2 w_2} [C_1 H_1(t)^{\alpha_1} - C_2 H_2(t)^{\alpha_2}] \quad (2)$$

$$\frac{dH_3(t)}{dt} = \frac{1}{w_3 \sqrt{R^2 - (R - H_3(t))^2}} [C_2 H_2(t)^{\alpha_2} - C_3 H_3(t)^{\alpha_3}] \quad (3)$$

gdzie:  $H$  – wysokość wody w zbiorniku [m],  $q$  – dopływ wody do górnego zbiornika [ $m^3/s$ ],  $C$  – oporność wyjścia zaworu [-],  $\alpha$  – współczynnik pływ do zbiornika [-].

Po określeniu struktury modelu dokonano identyfikacji wartości parametrów zaworów  $C$  i  $\alpha$  (tab. 1). Początkowe wartości  $C$  dobrano na drodze porównania odpowiedzi modelu oraz obiektu sterowania dla każdego zaworu oddzielnie. Następnie, w celu określenia ostatecznych parametrów, porównano charakterystykę napełniania kaskady zbiorników z modelem symulacyjnym.

Tabela 1. Identyfikacja wartości parametrów

Table 1. Identification of parameters values

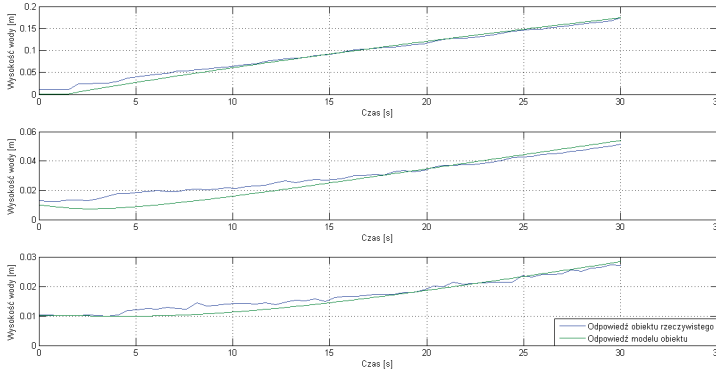
$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
6,8e-5	7,8e-5	7,1e-5	0,5	0,5	0,5

W celu walidacji wartości parametrów przeprowadzono eksperyment, polegający na napełnianiu zbiorników przez 30 s przy otwartych zaworach. Następnie porównano wyniki symulacji z pomiarami z obiektu (rys. 6) i obliczono błędy wyjścia (tab. 2).

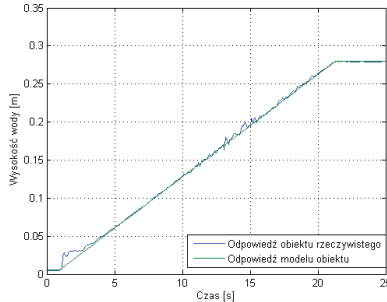
W celu identyfikacji charakterystyki pompy wykonano eksperymentalne porównanie odpowiedzi napełniania górnego zbiornika dla obiektu sterowania oraz jego modelu (rys. 7).

W wyniku porównania określono maksymalny możliwy przepływ pompy równy  $0,000118 m^3/s$ .

Przyjęto, że urządzenia pomiarowe są obiektami proporcjonalnymi o jednostkowym wzmocnieniu. Pomiar wysokości cieczy w zbiornikach odbywa się przez piezorezystancyjne czujniki, które za pomocą przetwornika przekazują sygnał pomiarowy do karty akwizycji danych. Aplikacja firmy INTECO umożliwia przesyłanie wyników pomiaru do środowiska MATLAB/Simulink, gdzie są interpretowane jako wysokość słupa wody w zbiornikach.



Rys. 6. Porównanie odpowiedzi modelu i obiektu sterowania  
Fig. 6. Comparison of model and controlled object



Rys. 7. Identyfikacja pompy  
Fig. 7. Identification of the pump

W celu weryfikacji wartości parametrów przeprowadzono eksperyment, polegający na napełnianiu zbiorników przez 30 s przy zamkniętym zaworze dolnego zbiornika. Błędy wyjścia pokazano w tab. 2.

Po osiągnięciu zadowalających wyników dokonano analizy dokładności modelu za pomocą trzech wskaźników jakości: średniokwadratowego, średniego i odchylenia standardowego:

Tabela 2. Wartości błędów między odpowiedziami obiektu sterowania i jego modelu

Table 2. Error values between controlled object and its model

Rodzaj wskaźnika	Rodzaj błędu	Zbiornik górny	Zbiornik środkowy	Zbiornik dolny
Walidacja wartości parametrów modelu				
Średniokwadratowy	bezwzględny	0,000463	0,0021	0,0024
	względny [%]	0,4505	6,832	13,778
Średni	bezwzględny	0,0023	0,0051	0,0031
	względny [%]	2,511	17,226	18,106
Odchylenie standardowe	bezwzględny	0,0048	0,005	0,0012
	względny [%]	10	43,881	23,338
Weryfikacja wartości parametrów modelu				
Średniokwadratowy	bezwzględny	0,0002	0,0031	0,0021
	względny [%]	0,16	8,14	5,07
Średni	bezwzględny	0,0138	0,0038	0,0014
	względny [%]	12,26	10,93	4,02
Odchylenie standardowe	bezwzględny	0,0021	0,0006	0,0017
	względny [%]	3,64	3,95	8,78

$$a_{SK} = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n}} \quad (4)$$

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Miary te wykorzystano do obliczenia błędów względnych i bezwzględnych między odpowiedziami obiektu sterowania oraz jego modelu dla każdego ze zbiorników (tab. 2).

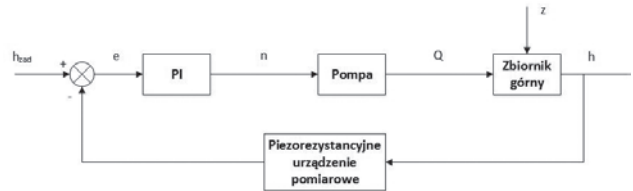
Błędy uzyskane w wyniku weryfikacji okazały się mniejsze niż w procesie walidacji. Analizując uzyskane wyniki, uznano model za wystarczająco dokładny dla celów projektowania układów regulacji.

## 4. Algorytmy regulacji

Do sterowania kaskadowym układem zbiorników wykorzystano trzy algorytmy regulacji, wszystkie oparte na regulatorze PI (proporcjonalno-całkujący). Dla umożliwienia dokładnego sterowania poziomem wody w zbiornikach sterowano pracą pompy oraz zaworu górnego (nazywanego dalej zaworem 1) i środkowego (zawór 2). Najniższy zawór (zawór 3) pozostawiono otwarty, aby zapewnić ciągły przepływ cieczy w zbiornikach.

### 4.1. Regulator PI

Struktura układu regulacji została przedstawiona na rys. 8.



Rys. 8. Struktura układu regulacji z regulatorem PI

Fig. 8. Structure of control system with PI controller

gdzie:  $h_{zad}$  – zadana wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m],  $e$  – uchyb regulacji [ $m^3/s$ ],  $n$  – sygnał sterujący oznaczający przepływ wyliczony przez regulator [ $m^3/s$ ],  $Q$  – zadany przepływ przez pompę [ $m^3/s$ ],  $z$  – zakłócenie (np. otwarcie zaworu ręcznego),  $h$  – zmierzona wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m].

Struktura regulacji z rys. 8 przedstawia ogólny schemat systemu sterowania; jest on analogiczny również w przypadku sterowania zaworami w zbiornikach.

Przyjęto następującą strukturę regulatora PI:

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

gdzie:  $k_p$ ,  $k_I$  – parametry (nastawy) regulatora.

Nastawy regulatorów PI dobrano eksperymentalnie w badaniach symulacyjnych (tab. 3).

Tabela 3. Wartości nastaw regulatorów PI

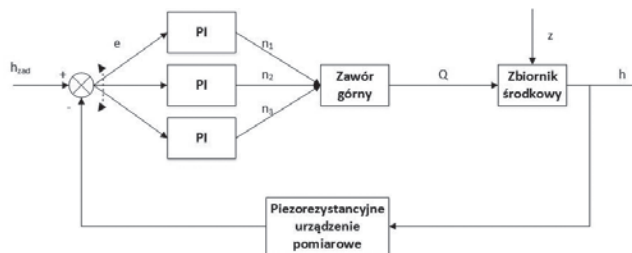
Table 3. Settings of PI controllers

Element sterowany	Wzmocnienie	Wzmocnienie
Pompa	9	0,5
Zawór górny	100	1,5
Zawór środkowy	50	0,8

### 4.2. Regulator wielobszarowy

Efektywne sterowanie nieliniowym obiektem w całym zakresie zmian punktu pracy za pomocą jednego regulatora PID ze stałymi wartościami nastaw nie jest możliwe. W związku z tym zdecydowano się na zaprojektowanie zbioru regulatorów PI o różnych nastawach, przełączających się w zależności od warunków pracy (rys. 9). Liczbę i zakres obszarów można zidentyfikować po analizie charakterystyki statycznej obiektu.

Należy wyróżnić dwa sposoby przełączania: twardy (sygnał sterujący pochodzi z jednego, wybranego lokalnego regulatora) oraz miękki (sygnał sterujący jest generowany na bazie większej liczby lokalnych regulatorów) [7]. W algorytmie sterowania wykorzystano regulację wielobszarową (trzy regulatory) z twardym przełączaniem dla zaworów 1 i 2. Natomiast dla pompy stosowany jest jeden klasyczny regulator PI.



Rys. 9. Struktura wielobszarowego układu regulacji  
Fig. 9. Structure of multiregional control system

gdzie:  $h_{zad}$  – zadana wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m],  $n_i$  – sygnał sterujący oznaczający przepływ wyliczony przez regulator [m<sup>3</sup>/s],  $i = 1, 2, 3$ ,  $Q$  – zadany przepływ przez pompę [m<sup>3</sup>/s],  $e$  – uchyb regulacji [m<sup>3</sup>/s],  $z$  – zakłócenie (np. otwarcie zaworu ręcznego),  $h$  – zmierzona wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m].

Nastawy regulatorów PI dobrano eksperymentalnie w badaniach symulacyjnych (tab. 4, 5).

### 4.3. Regulator odporny z modelem

Istnieje wiele interesujących algorytmów sterowania z wykorzystaniem modelu obiektu, które spełniają wymagania co do jakości sterowania. Jednym z nich jest regulator odporny

Tabela 4. Parametry regulatorów PI w zależności od uchybu dla zaworu sterowanego górnego

Table 4. Parameters of PI controllers according to control error for upper controllable valve

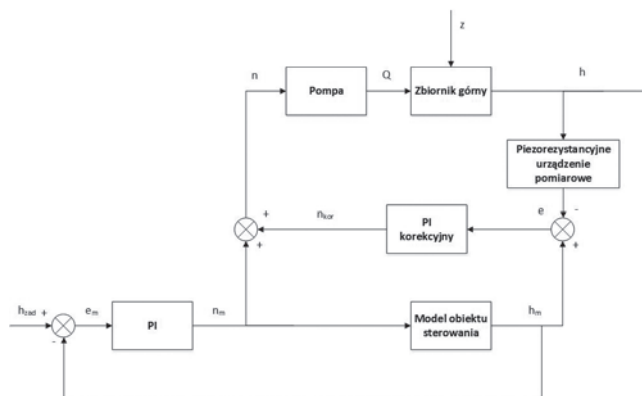
Zakres uchybu	Wzmocnienie	Wzmocnienie
> 0,02	26	0,4
<-0,02; 0,02>	16	0,5
< -0,02	18	0,5

Tab. 5. Parametry regulatorów PI w zależności od uchybu dla zaworu sterowanego środkowego

Tab. 5. Parameters of PI controllers according to control error for middle controllable valve

Zakres uchybu	Wzmocnienie	Wzmocnienie
> 0,02	30	0,8
<-0,02; 0,02>	23	5
< -0,02	18	3

z modelem MFC (ang. *Model Following Controller*) [8, 9]. Bazuje on na wykorzystaniu modelu, dla którego generowane są sygnały sterujące (rys. 10). Te same sygnały wysyłane są do sterowanego obiektu, jednak regulator korzysta z uchybu modelu. Nazywany jest regulatorem modelu. Pomiar z obiektu sterowania porównywany jest z wyjściem z modelu. Jeśli ich różnica niezerowa, regulator korekcyjny generuje kolejny sygnał sterujący, który sumuje się z sygnałem z regulatora modelu, jednocześnie poprawiając jakość sterowania. Zatem do wykorzystania regulacji MFC niezbędne jest opracowanie odpowiednio dokładnego modelu. W przypadku badanej kaskady zbiorników, model w wystarczającym stopniu odwzorowuje obiekt sterowania, co pozwoliło na zaprojektowanie algorytmu sterowania spełniającego wymagania co do jakości regulacji.



Rys. 10. Struktura układu regulacji MFC  
Fig. 10. Structure of control system with MFC controller

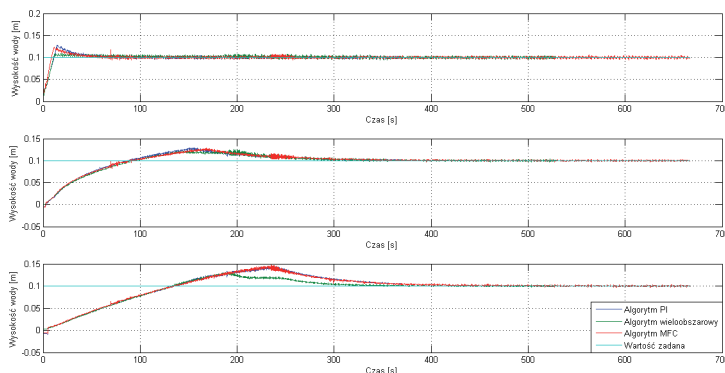
gdzie:  $h_{zad}$  – zadana wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m],  $n$  – sygnał sterujący oznaczający sumę przepływów obliczonych przez regulatory [m<sup>3</sup>/s],  $Q$  – zadany przepływ przez pompę [m<sup>3</sup>/s],  $n_m$  – przepływ obliczony przez regulator modelu [m<sup>3</sup>/s],  $n_{kor}$  – dodatkowy przepływ obliczony przez regulator korekcyjny [m<sup>3</sup>/s],  $e_m$  – uchyb regulacji z modelu [m<sup>3</sup>/s],  $e$  – uchyb regulacji z obiektu [m<sup>3</sup>/s],  $h_m$  – sygnał wyjściowy z modelu [m],  $h$  – zmierzona wysokość słupa cieczy w zbiorniku [m],  $z$  – zakłócenie (np. otwarcie zaworu ręcznego).

Analogiczną strukturę sterowania zastosowano dla niższych zbiorników i zaworów jako urządzeń wykonawczych. Nastawy regulatorów PI dobrano jak w punkcie 4.1 (tab. 3). Ustawienia regulatorów mogą różnić się od siebie, co powinno zapewnić lepszą jakość sterowania przy występujących zakłóceniach lub w początkowej pracy systemu. W przypadku kaskady zbiorników zastosowanie tych samych nastaw okazało się wystarczające dla zapewnienia zadowalającej jakości regulacji.

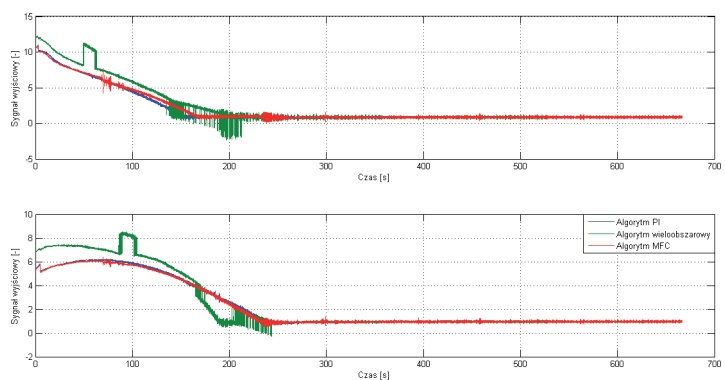
## 5. Testy symulacyjne

Ostatnim i najważniejszym elementem projektowania algorytmu sterowania jest sprawdzenie poprawności działania na obiekcie rzeczywistym. Weryfikację jakości sterowania oceniono dla stałej (rys. 11, 12) i zmiennej (rys. 13, 14) trajektorii zadanej.

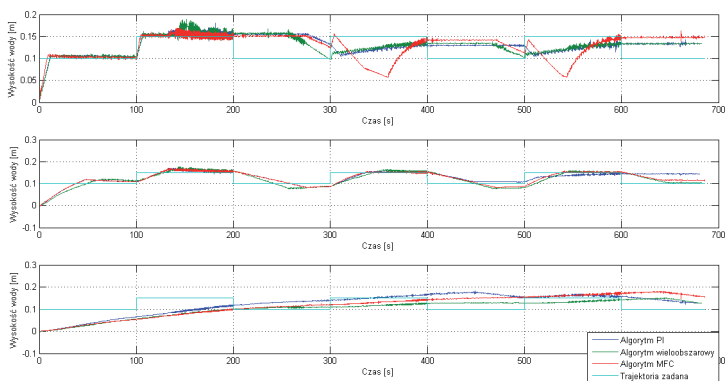
Z rys. 11 wynika, że różnica między wynikami sterowania dla różnych algorytmów jest niewielka. W górnym zbiorniku zadana wysokość słupa wody osiągnana jest szybko i z małym przeregulowaniem. Podobne wyniki zaobserwować można w środkowym rezerwarze. W dolnym zbiorniku algorytm PI i MFC dają podobne odpowiedzi, natomiast regulacja wielobszarowa charakteryzuje się krótszym czasem regulacji i mniejszym przeregulowaniem. Sygnały sterujące dla zaworów (rys. 12) zachowują się podobnie jak w przypadku regulacji poziomu wody w najniższym zbiorniku. Chwilowe skokowe zmiany sygnału sterują-



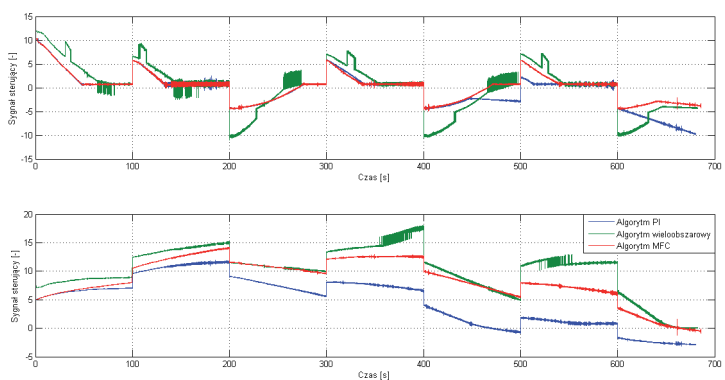
Rys. 11. Odpowiedź układu regulacji – stała trajektoria zadana  
Fig. 11. Response of the control system – constant reference trajectory



Rys. 12. Sygnały sterujące zaworów – stała trajektoria zadana  
Fig. 12. Valve's control values – constant reference trajectory



Rys. 13. Odpowiedź układu regulacji – zmienna trajektoria zadana  
Fig. 13. Response of the control system – variable reference trajectory



Rys. 14. Sygnały sterujące zaworów – zmienna trajektoria zadana  
Fig. 14. Valve's control values – variable reference trajectory

czego dla algorytmu wieloobszarowego wynikają z twardego przełączania między regulatorami zależnego od uchybu regulacji.

Do testów symulacyjnych dla zmiennej trajektorii zadanej zwiększono wzmocnienie  $k_p$  regulatora pompy do 60, co pozwoliło osiągnąć lepsze wyniki. Z rys. 13 wynika, że opisywane algorytmy regulacji w różny sposób nadążają za trajektorią zadaną, zachowując krótkie czasy regulacji. Dzieje się tak, gdyż dynamika obiektu sterowania nie pozwala na kontrolę wysokości słupa wody, przy tak założonych kryteriach. Zatem sterowanie w tej postaci można zastosować tylko przy odpowiednich wymaganiach co do jakości sterowania. Najgorszymi wskaźnikami jakości sterowania (czas regulacji, czas narastania, przeregulowanie) odznacza się algorytm wieloobszarowy, co widać szczególnie w przypadku regulacji poziomu wody w środkowym zbiorniku. Powodem jest twarde przełączanie regulatorów, które wystawiają skokowe zmiany sygnału sterującego. Algorytm PI zachowuje się podobnie do regulacji odpornej z modelem, jednak MFC odznacza się większą dokładnością regulacji.

Dla dokładniejszego porównania wyników regulacji obliczono całkę z kwadratu uchybu regulacji (8) (ang. *Integral Square Error*). Przedstawione wyniki (tab. 6) potwierdzają powyższe wnioski.

$$ISE = \int_{t_0}^{t_f} e^2(t) dt \tag{8}$$

Tab. 6. Wartości kryterium ISE  
Tab. 6. Values of ISE criterion

Rodzaj regulatora	Rodzaj trajektorii	Zbiornik górny	Zbiornik środkowy	Zbiornik dolny
PI	stała	0,39	2,56	5,52
	zmienna	6,73	5,2	15,8
wieloobszarowy	stała	0,35	2,52	4,6
	zmienna	6,18	4,94	14,57
MFC	stała	0,31	2,51	5,37
	zmienna	11,21	4,27	18,43

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę porównawczą trzech algorytmów sterowania poziomem wody w kaskadowo połączonych zbiornikach. Wykorzystując regulatory: PI, wieloobszarowy oraz odporny z modelem, dokonano oceny otrzymanych rezultatów sterowania. Nie można jednoznacznie stwierdzić, który z algorytmów sterowania jest najlepszy. Każdy z nich cechuje się inną jakością regulacji i wybranie odpowiedniego zależy od konkretnych wymagań co do jakości sterowania.

## Bibliografia

- Inteco, *User Manual*, [www.diee.unica.it/~pisano/3Tank-UserManual.pdf], 2013, dostęp z dnia 05.04.2015 r.
- Tomera M., Kasproicz A., *Zastosowanie regulatora neuro-nowego i rozmytego do sterowania poziomem wody w układzie kaskadowym dwóch zbiorników*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok LIII, Nr 3 (190) 2012, 123–138.
- Tomera M., Kaczmarczyk A., *Komputerowy układ sterowania poziomem wody w kaskadzie dwóch zbiorników*.

- Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, Nr 28/2010, 135–138.
4. ASCO, Proportional solenoid valve posiflow. [www.ascomatics.eu/images/site/upload/\_en/pdf1/00021gb.PDF], dostęp z dnia 05.04.2015 r.
  5. Gutenbaum J., *Modelowanie matematyczne systemów*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987.
  6. Åström K.J., Hägglund T., *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. 2<sup>nd</sup> Edition, Instrument Society of America, North Carolina 1995.
  7. Strojny R., Piotrowski R., *Wieloobszarowy układ regulacji PI do sterowania prędkością obrotową samochodu z silnikiem spalinowym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 6/2013, 90–95.
  8. Brzózka J., *Regulatory i układy automatyki*, Wydawnictwo Mikom, Warszawa 2004.
  9. Skoczkowski S., Osypiuk R., Pietruszewicz K., *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.

## Advanced Control Systems of Cascade Tanks

**Abstract:** This paper considers cascade tanks with actuators and measuring elements. The control task is to regulate the pump flow and valve's degree of opening for reach the desired height of the water in each tank as accurately and as quickly as possible. Three control systems of water level in each tank had been projected using: classic PI controller, multiregional controller and robust controller with model of the object. The comparative analysis of developed control system had been performed for constant and variant reference trajectory. Simulation tests were performed in MATLAB/Simulink environment, which communicates with the object using a data acquisition card installed in PC.

**Keywords:** cascade tanks, PI control system, multiregional control system, robust control system

### inż. Piotr Bakun

piotr.bakun@gmail.com

Absolwent studiów inżynierskich na kierunku Automatyka i Robotyka, spec. Automatyka i Systemy Sterowania na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Zainteresowania: technologie informacyjne, systemy sterowania.



### inż. Oskar Długoński

oskar.dlugonski@gmail.com

Absolwent studiów inżynierskich na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka, specjalność Automatyka i Systemy Sterowania). Zainteresowania: zaawansowane algorytmy sterowania, motoryzacja.



### dr inż. Robert Piotrowski

robert.piotrowski@pg.gda.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2001 r.) (kierunek: Automatyka i Robotyka). W 2005 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych (Automatyka i Robotyka). Obecnie adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów Sterowania. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi.

