

STEROWANIE KASKADOWE POZIOMEM WODY W UKŁADZIE DWÓCH ZBIORNIKÓW

Mirosław TOMERA¹, Krzysztof KULA²

1. Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
tel: +48 58 690 1471 fax: +48 58 690 1445 e-mail: tomera@am.gdynia.pl
2. Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
tel: +48 58 690 1471 fax: +48 58 690 1445 e-mail: kskula@am.gdynia.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono układ sterowania poziomem wody w układzie dwóch zbiorników o swobodnym wypływie. Do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku, zastosowany został kaskadowy układ regulacji. Dla porównania uzyskanej jakości sterowania, dodatkowo przeprowadzone zostały badania w układzie z jedną pętlą sprzężenia zwrotnego z zastosowaniem regulatora PID oraz nieliniowego regulatora z modelem wewnętrznym (NIMC). W celu przetestowania opracowanego oprogramowania w środowisku MATLAB/Simulink przeprowadzone zostały wstępne badania układów sterowania a następnie wykonano próby w układzie rzeczywistym, gdzie przygotowywane algorytmy zostały zaimplementowane w mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28335.

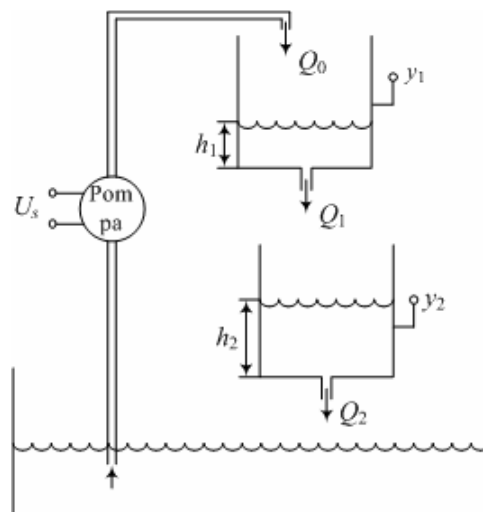
Słowa kluczowe: układ regulacji kaskadowej, regulator PID, regulator IMC, mikrokontroler sygnałowy.

1. WPROWADZENIE

Przedstawiony, schematycznie na rysunku 1, układ kaskadowy dwóch zbiorników stanowi obiekt wykorzystywany w dydaktyce, pozwalający na nauczanie metod projektowania różnych rodzajów algorytmów sterowania stosowanych w praktyce. Dwa zbiorniki zawieszono kaskadowo pozwalają na użycie dowolnych algorytmów sterowania do regulacji poziomem wody w zbiornikach: dolnym lub górnym. Zaprojektowane algorytmy sterowania implementowane są w systemie mikroprocesorowym zbudowanym w oparciu o mikrokontroler sygnałowy TMS320F28335 [1].

Przedstawione w pracy algorytmy zastosowane zostały do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku. Do zaimplementowania algorytmów sterowania w urządzeniu cyfrowym, wykorzystana została metoda emulacji, która polega na tym, że najpierw sterowanie opracowywane jest w dziedzinie czasu ciągłego, a następnie wyznaczony algorytm sterowania poddawany jest dyskretyzacji.

Badania obejmowały zastosowanie do sterowania poziomem wody, układu sterowania kaskadowego składającego się z dwóch pętli sprzężenia zwrotnego oraz dwóch regulatorów PI i P. Kolejne metody obejmowały zastosowanie regulatora PID z pojedynczą pętlą sprzężenia zwrotnego oraz regulatora z nieliniowym modelem wewnętrznym NIMC [3].

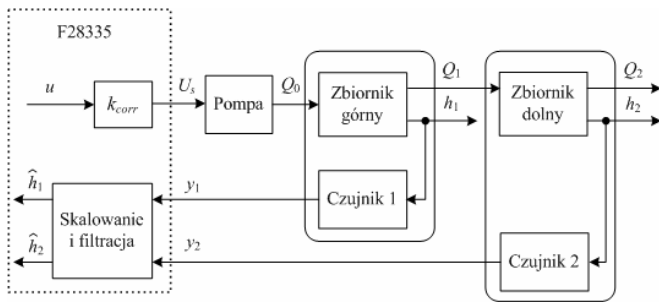


Rys. 1. Schemat układu kaskadowego dwóch zbiorników

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU

Szczegóły związane z dokładnym, nieliniowym modelem matematycznym, odwzorowującym układ kaskadowy dwóch zbiorników wraz z pompą i czujnikami poziomu (rys. 1), przedstawione zostały w pracy [1]. Na rysunku 2 znajduje się model matematyczny układu kaskadowego dwóch zbiorników, przedstawiony w postaci schematu blokowego, zawierający dodatkowo blok filtracji i obliczania pomierzonych poziomów wody i wzmocnienie korygujące charakterystykę pompy k_{corr} .

Projektowane układy regulacji opierają się na liniowych modelach matematycznych obiektu. Modele te wyznaczone zostały eksperymentalnie, na podstawie pojedynczej odpowiedzi skokowej zarejestrowanej na obiekcie rzeczywistym i zapisane w postaci transmitancji. W tym celu na wejście pompy, poprzedzonej wzmocnieniem korygującym charakterystykę pompy, podane zostało stałe napięcie o wartości 3 V i zarejestrowane zostały przebiegi poziomu wody w zbiorniku górnym $h_1(t)$ i dolnym $h_2(t)$. Pozwoliło to na wyznaczenie dwóch transmitancji: pierwszej opisującej dynamikę zmian pomiędzy transformacjami: sygnału sterującego $U(s)$ i poziomu wody $H_1(s)$ w górnym zbiorniku



Rys. 2. Schemat blokowy obiektu sterowania, gdzie y_1, y_2 oznaczają napięciowe sygnały pomierzonych poziomów wody, odpowiednio w górnym i w dolnym zbiorniku, zaś \hat{h}_1, \hat{h}_2 są pomierzonymi poziomami wody w obydwu zbiornikach

$$\frac{H_1(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{sT_1 + 1} \quad (1)$$

oraz drugiej opisującej dynamikę zmian pomiędzy sygnałem sterującym $U(s)$, a poziomem wody $H_2(s)$ w dolnym zbiorniku

$$G(s) = \frac{H_2(s)}{U(s)} = \frac{k}{(sT_1 + 1)(sT_2 + 1)} \quad (2)$$

Na potrzeby syntezy układu sterowania kaskadowego, z transmitancji (2) wyodrębniono transmitancję opisującą dynamikę zmian pomiędzy poziomami wody w dolnym i górnym zbiorniku

$$\frac{H_2(s)}{H_1(s)} = \frac{k_2}{sT_2 + 1} \quad (3)$$

3. METODY STEROWANIA

Przedstawione w pracy regulatory projektowane były metodą emulacji W rozdziale tym przedstawione zostały wybrane metody sterowania, których zadaniem było spełnienie następujących wymagań projektowych:

- 1) Maksymalne przeregulowanie, mniejsze od 5%;
- 2) Czas narastania, mniejszy niż 100 s;
- 3) Czas regulacji, mniejszy niż 160 s;
- 4) Uchyb w stanie ustalonym < 2%.

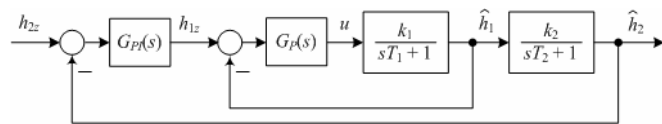
Do syntezy parametrów regulatorów klasycznych zastosowana została metoda lokowania biegunów. Transmitancja wzorcowa III rzędu, której odpowiedź skokowa spełnia powyższe wymagania projektowe opisana jest wzorem (4)

$$T(s) = \frac{\alpha\omega_n^3}{(s + \alpha\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (4)$$

$$= \frac{\alpha\omega_n^3}{s^3 + \omega_n(\alpha + 2\zeta)s^2 + \omega_n^2(1 + 2\alpha\zeta)s + \alpha\omega_n^3}$$

3.1. Synteza układu sterowania kaskadowego

W układzie sterowania kaskadowego wykorzystane zostały pomiary poziomu wody zarówno w górnym jak i w dolnym zbiorniku. Synteza sterowania kaskadowego odbywała się w oparciu o schemat pokazany na rysunku 3. W pętli wewnętrznej, zajmującej się stabilizacją poziomu wody w górnym zbiorniku zastosowany został regulator P



Rys. 3. Model matematyczny układu sterowania kaskadowego o transmitancji

$$G_P(s) = K_{PI} \quad (5)$$

natomiast w pętli zewnętrznej użyty został regulator PI o transmitancji

$$G_{PI}(s) = K_{Pe} \left(1 + \frac{1}{sT_{Ie}}\right) = K_{Pe} + \frac{K_{Ie}}{s} \quad (6)$$

W pętli wewnętrznej możliwe było zastosowanie regulatora proporcjonalnego, gdyż w tym fragmencie układu ważniejsza jest szybkość sterowania niż nieduży uchyb statyczny.

Transmitancja wypadkowa $T(s)$ modelu układu sterowania kaskadowego przedstawionego na rysunku 3 opisana jest wzorem (7).

$$T(s) = \frac{(K_{Pe}s + K_{Ie})k_1k_2K_{PI}}{s^3 + \frac{T_1 + T_2 + K_{PI}k_1T_2}{T_1T_2}s^2 + \frac{K_{PI}k_1 + 1 + K_{Pe}K_{PI}k_1k_2}{T_1T_2}s + \frac{K_{Ie}K_{PI}k_1k_2}{T_1T_2}} \quad (7)$$

Metoda lokowania biegunów polega na tym, że bieguny projektowanego układu (7) powinny się znajdować dokładnie w tych samych położeniach co bieguny układu wzorcowego (4). Warunek ten zostanie spełniony wówczas, gdy identyczne będą współczynniki wielomianów mianownika równań (4) i (7), przy odpowiednich potęgach. Pozwala to na zapisanie kolejnych zależności (8)-(10)

$$s^2 : \frac{T_1 + T_2 + K_{PI}k_1T_2}{T_1T_2} = (2\zeta + \alpha)\omega_n \quad (8)$$

$$s^1 : \frac{K_{PI}k_1 + 1 + K_{Pe}K_{PI}k_1k_2}{T_1T_2} = (1 + 2\zeta\alpha)\omega_n^2 \quad (9)$$

$$s^0 : \frac{K_{Ie}K_{PI}k_1k_2}{T_1T_2} = \alpha\omega_n^3 \quad (10)$$

Uzyskany układ trzech równań (8)-(10), pozwala na wyznaczenie poszukiwanych wartości parametrów regulatorów wykorzystywanych w układzie sterowania kaskadowego

$$K_{PI} = \frac{T_1T_2(2\zeta + \alpha)\omega_n - T_1 - T_2}{k_1T_2} = 1.54 \quad (11)$$

$$K_{Pe} = \frac{T_1T_2(1 + 2\zeta\alpha)\omega_n^2 - K_{PI}k_1 - 1}{K_{PI}k_1k_2} = 3.29 \quad (12)$$

$$K_{Ie} = \frac{T_1T_2\alpha\omega_n^3}{K_{PI}k_1k_2} = 0.041 \quad (13)$$

W celu zaimplementowania regulatora PI (6) w systemie mikroprocesorowym, został on przekonwertowany do postaci dyskretnej i zapisany

w postaci następującego równania różnicowego rekurencyjnego

$$u(k) = u(k-1) + q_{01}e(k) + q_{11}e(k-1) \quad (14)$$

$$q_{01} = K_{Pe} \left(1 + \frac{T_p}{2T_{le}}\right) \quad (15)$$

$$q_{11} = -K_{Pe} \left(1 - \frac{T_p}{2T_{le}}\right) \quad (16)$$

gdzie: $u(k)$ sygnał sterujący w k -tej próbkce,
 T_p okres próbkowania.

3.2. Synteza regulatora PID

Na rysunku 4 przedstawiony został uproszczony schemat blokowy modelu układu regulacji, zastosowany do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku z użyciem regulatora PID. Transmittancja wypadkowa obiektu opisana jest wzorem (2). Do sterowania poziomem w dolnym zbiorniku zastosowany został regulator PID o transmittancji

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D\right) \quad (17)$$

Transmittancja wypadkowa układu pokazanego na rysunku 4 opisana jest wzorem (18)

$$T(s) = \frac{\frac{kK_p}{T_1T_2} \left(s^2T_D + s + \frac{1}{T_I}\right)}{s^3 + \frac{T_1+T_2+kK_pT_D}{T_1T_2}s^2 + \frac{1+kK_p}{T_1T_2}s + \frac{kK_p}{T_1T_2T_I}} \quad (18)$$

gdzie: $k = k_1k_2$.

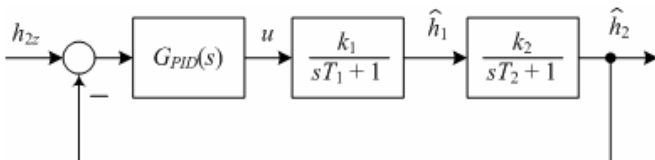
Z porównania współczynników mianowników transmittancji opisanej wzorem (4) i transmittancji wypadkowej projektowanego układu (18), uzyskuje się następujące zależności, pozwalające na wyznaczenie wartości parametrów regulatora PID (17)

$$s^2 : \frac{T_1+T_2+kK_pT_D}{T_1T_2} = (2\zeta + \alpha)\omega_n \quad (19)$$

$$s^1 : \frac{1+kK_p}{T_1T_2} = (1+2\zeta\alpha)\omega_n^2 \quad (20)$$

$$s^0 : \frac{kK_p}{T_1T_2T_I} = \alpha\omega_n^3 \quad (21)$$

Uzyskany układ trzech równań (19)-(21), pozwala na wyznaczenie poszukiwanych wartości parametrów regulatora PID, wykorzystanego w układzie sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku.



Rys. 4. Model matematyczny układu sterowania z regulatorem PID

$$K_p = \frac{T_1T_2(1+2\zeta\alpha)\omega_n^2 - 1}{k} = 9.14 \quad (22)$$

$$T_I = \frac{kK_p}{\alpha\omega_n^3T_1T_2} = 66.1 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_D = \frac{T_1T_2(2\zeta + \alpha)\omega_n - T_1 - T_2}{kK_p} = 18.6 \text{ s} \quad (24)$$

W celu zaimplementowania regulatora PID (17) w systemie mikroprocesorowym, został on przekonwertowany do postaci dyskretnej i zapisany w postaci następującego równania różnicowego rekurencyjnego [2]

$$u(k) = u(k-1) + q_{02}e(k) + q_{12}e(k-1) + q_{22}e(k-2) \quad (25)$$

$$q_{02} = K_p \left(1 + \frac{T_p}{2T_I} + \frac{T_D}{T_p}\right) \quad (26)$$

$$q_{12} = -K_p \left(1 - \frac{T_p}{2T_I} + 2\frac{T_D}{T_p}\right) \quad (27)$$

$$q_{22} = K_p \frac{T_D}{T_p} \quad (28)$$

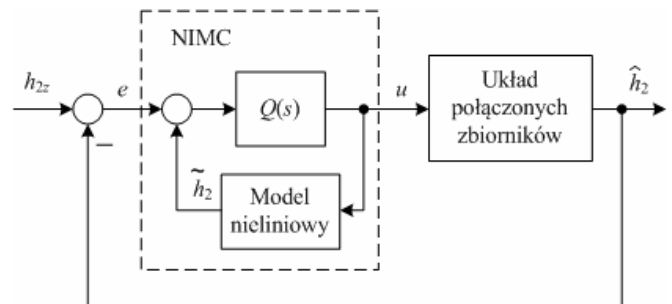
gdzie: $u(k)$ jest sygnałem sterującym,
 T_p jest okresem próbkowania.

3.3. Synteza regulatora NIMC

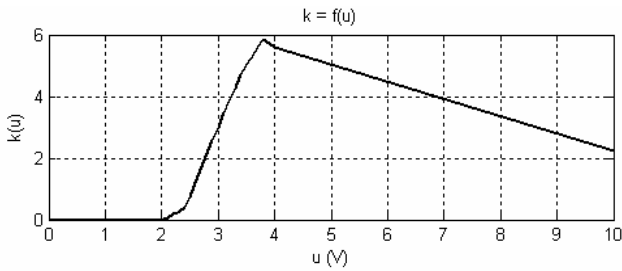
Jeżeli w układzie regulacji z obiektem nieliniowym zmienia się punkt pracy, możliwe jest zastosowanie regulatora z modelem wewnętrznym pod warunkiem, że zostanie on zaadaptowany do tego typu warunków. Jednym ze sposobów rozszerzenia stosowalności układu IMC (rys. 5) do obiektów nieliniowych jest utworzenie modelu nieliniowego M oraz jego inwersja przy wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego [3]. Synteza regulatora NIMC obejmuje następujące kroki:

- identyfikacja modelu nieliniowego obiektu,
- inwersja modelu nieliniowego,
- dobór stałej czasowej filtru.

Model nieliniowy obiektu M przedstawiony został jako szeregowe połączenie części nieliniowej, którą stanowi zależność wzmocnienia statycznego w funkcji sygnału sterującego $k=f(u)$ oraz części liniowej opisanej przy pomocy transmittancji operatorowej Laplace'a dla wybranego punktu pracy. Parametry modelu obiektu, przy sygnale wejściowym równym 3.12 V, opisanego



Rys. 5. Schemat blokowy układu regulacji z nieliniowym modelem wewnętrznym



Rys. 6. Wzmocnienie statyczne układu dwóch zbiorników połączonych kaskadowo

transmitancją (2), określono metodą graficzną opracowaną do wyznaczania modelu Kupfmüllera, uzyskując następujące wartości: $k = 3.53$, $T_1 = 14$ s, $T_2 = 102$ s. Zależność wzmocnienia statycznego obiektu od poziomu sygnału sterującego przedstawiona została na rysunku 6.

W układach liniowych tzw. transmitancję projektową, w skład której wchodzi model odwrotny, wyznaczyć można z zależności

$$Q(s) = F(s) \cdot M_{odw}(s) \quad (29)$$

gdzie: $M_{odw}(s)$ jest transmitancją modelu odwrotnego obiektu $F(s)$ jest transmitancją filtra pozwalająca spełnić warunek aby $Q(s)$ była transmitancją właściwą

Przy tworzeniu modelu odwrotnego zastosowano układ ze sprzężeniem zwrotnym [3], którego strukturę przedstawiono na rysunku 7. Współczynnik p_0 jest stałą wyznaczaną z zależności

$$p_0 = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow \infty} Q(s)} \quad (30)$$

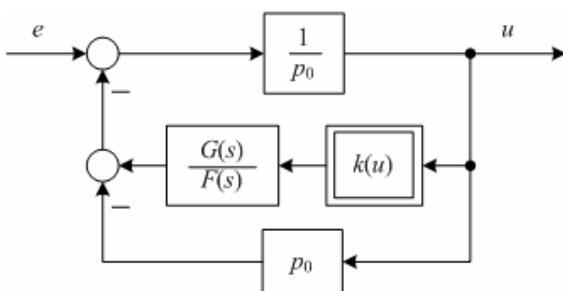
natomiast $F(s)$ jest transmitancją filtra

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \beta s)^n} \quad (31)$$

gdzie: n – rząd filtra,

β – dobieralny parametr (stała czasowa).

Wraz ze zmianą punktu pracy zmienia się nie tylko wzmocnienie statyczne k lecz również stałe czasowe T_1 i T_2 . Nie jest konieczne uwzględnianie tych zmian w modelu, jednak stanowią one pewne utrudnienie w procesie projektowania regulatora NIMC śledzącego zmiany wartości zadanej, gdyż dobór tego parametru filtra (31) dokonywany jest w pewnej relacji do wypadkowej stałej czasowej obiektu T . Wskazane jest aby $\beta > 0.2T$. Jeżeli jednak parametrowi β nadamy zbyt dużą wartość, to układ regulacji



Rys. 7. Schemat blokowy regulatora NIMC

będzie wprawdzie bardziej odporny, ale osiągnięty czas regulacji t_R ulegnie wydłużeniu.

4. WYNIKI BADAŃ ZAPROJEKTOWANYCH UKŁADÓW STEROWANIA

W celu dokonania porównania jakości pracy zaprojektowanych regulatorów, przeprowadzone zostały badania symulacyjne w środowisku obliczeniowym MATLAB/Simulink, które następnie zostały zweryfikowane na obiekcie rzeczywistym w układzie kaskadowym dwóch zbiorników. Badania symulacyjne miały przede wszystkim za zadanie przygotowanie kodów źródłowych programów zapisanych w języku programowania C, opisujących zaprojektowane algorytmy sterowania, które następnie były implementowane w procesorze sygnałowym.

Dyskretyzacja zaprojektowanych algorytmów ciągłych na postać dyskretną przeprowadzona została z okresem próbkowania wynoszącym $T_p = 5$ s.

Sygnaly pomierzone przez czujniki poziomu wymagały filtracji w celu wyeliminowania z nich szumów pomiarowych. W każdym torze pomiarowym zastosowany został filtr dolnoprzepustowy opisany transmitancją

$$G_f(s) = \frac{Y_f(s)}{U_f(s)} = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (32)$$

który został zapisany w postaci następującego zestawu równań dynamicznych

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1f}(t) \\ \dot{x}_{2f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1f}(t) \\ x_{2f}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u_f(t) \quad (33)$$

$$y_f(t) = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_{1f}(t) \\ x_{2f}(t) \end{bmatrix} \quad (34)$$

Powyższy filtr całkowany był w procesorze sygnałowym metodą Rungego-Kutty IV rzędu z krokiem całkowania $T = 0.01$ [s].

Aby uzyskać czas regulacji t_R krótszy niż 160 s, stała czasowa filtra β w regulatorze IMC, szacowana na podstawie zależności $\beta < t_R/5.83$ powinna być mniejsza niż 27.5 s. Jednak, aby zapewnić układowi sterowania większą odporność przyjęto wartość $\beta = 30$ s. Współczynnik p_0 wyznaczony ze wzoru (30) jest równy 1.587.

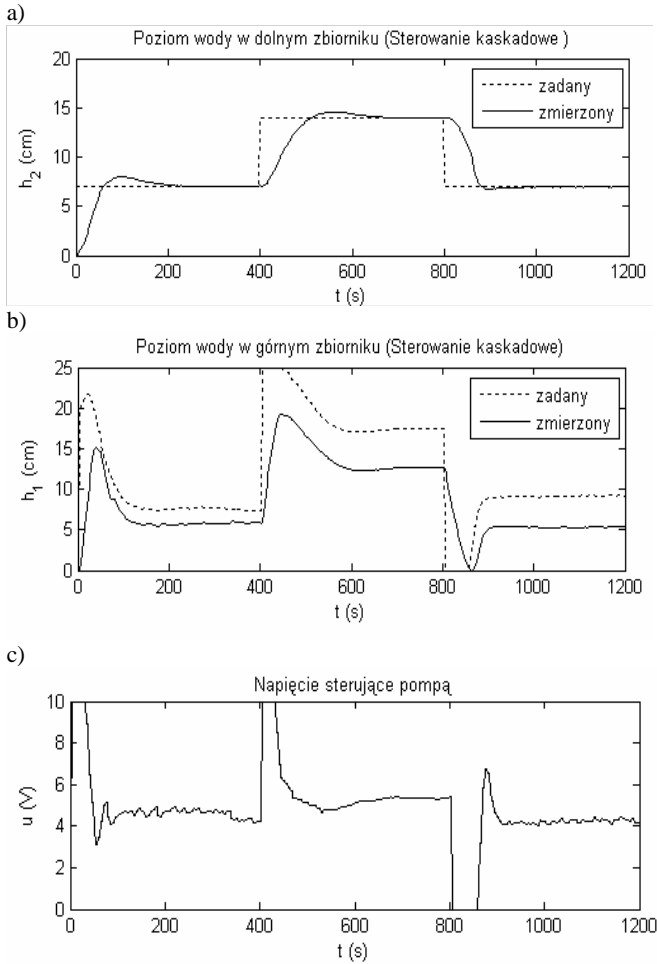
Na rysunkach 8 i 9 przedstawione zostały próby testowe zarejestrowane w układzie rzeczywistym dla układów sterowania wykorzystujących: regulator kaskadowy (rys. 8) i regulator cyfrowy PID (rys. 9). Na rysunku 10 przedstawiono badania symulacyjne układu z regulatorem IMC, niestety dla tego regulatora nie powiodła się implementacja algorytmu w procesorze sygnałowym.

Ocena jakości pracy rozważanych układów regulacji polegała na ocenie wskaźników jakości definiowanych na podstawie odpowiedzi skokowej i były to: maksymalne przeregulowanie M_p , czas regulacji t_R mierzony przy strefie dokładności $\Delta = 2\%$. Dodatkowo na każdym odcinku stabilizacji poziomu, na podstawie pomierzonych wartości poziomu i sygnału sterującego wyznaczane były następujące funkcjonalny (35)

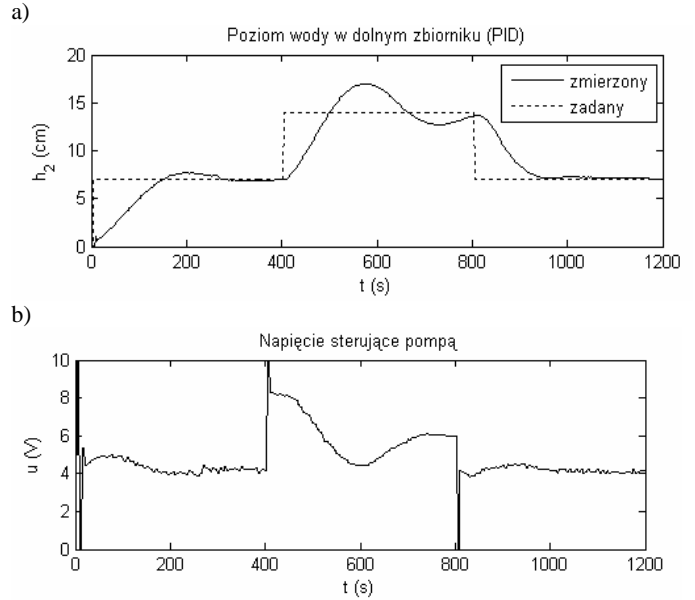
$$J_E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e(k)| \quad \text{oraz} \quad J_u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |u(k)|, \quad (35)$$

gdzie: $e(k)=h_{zad}(k)-h_2(k)$ – uchyb regulacji, $u(k)$ – sygnał sterujący pompą a zarazem wyjście z regulatora.

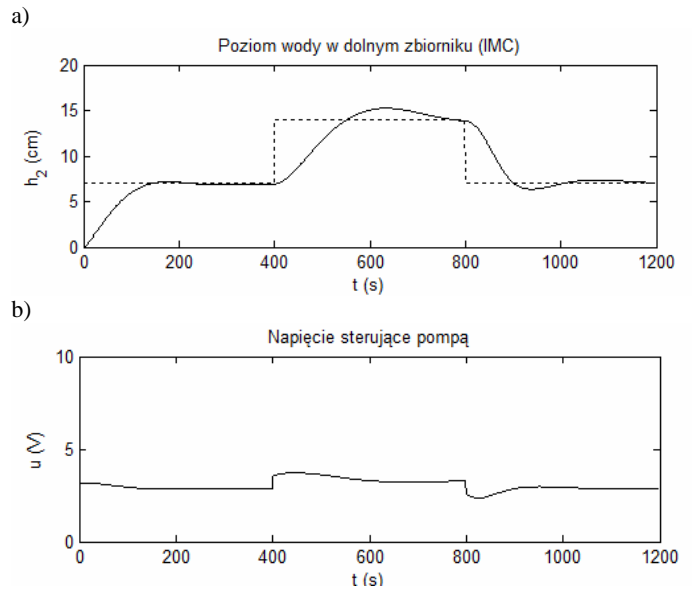
Zmienne wykreślone na rysunkach 8 i 9, zmierzone zostały co 2,5 sekundy, uzyskując w ten sposób $N = 160$ pomierzonych próbek w każdym odcinku stabilizacji.



Rys. 8. Wyniki sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku z użyciem układu sterowania kaskadowego, zarejestrowane w układzie rzeczywistym



Rys. 9. Wyniki sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku z użyciem regulatora cyfrowego PID, zarejestrowane w układzie rzeczywistym



Rys. 10. Wyniki badań symulacyjnych sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku uzyskane z użyciem nieliniowego regulatora NIMC

Tabela 1. Wskaźniki oceny jakości sterowania uzyskane z wykresów czasowych pokazanych na rysunkach 8 i 9

Typ układu regulacji	Przedział 1 (0 s – 400 s)				Przedział 2 (400 s – 800 s)				Przedział 3 (800 s – 1200 s)			
	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]
z kaskadowym układem sterowania	14,9	212,5	0,826	5,028	8,2	245,0	1,083	5,647	3,8	135,0	0,987	3,723
z regulatorem cyfrowym PID	10,1	360,0	1,559	4,320	42,6	–	2,027	6,022	0,6	372,5	1,277	4,160

Tabela 2. Wskaźniki oceny jakości sterowania uzyskane z wykresów czasowych pokazanych na rysunku 10

Typ układu regulacji	Przedział 1 (0 s – 400 s)				Przedział 2 (400 s – 800 s)				Przedział 3 (800 s – 1200 s)			
	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]	M_p [%]	t_R [s]	J_E [cm]	J_u [V]
z regulatorem IMC	2,3	346,0	1,092	2,919	18,8	357,0	1,835	3,404	10,7	371,0	1,188	2,812

Uzyskane wyniki parametrów oceny jakości sterowania w poszczególnych przedziałach stabilizacji poziomu wody w dolnym zbiorniku, zawarte zostały w tabeli 1. Zmienne wykreślone na rysunku 10 zarejestrowane zostały co sekundę i wyniki parametrów oceny jakości sterowania w poszczególnych przedziałach stabilizacji poziomu wody w dolnym zbiorniku, zawarte zostały w tabeli 2.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej pracy zaprojektowane i przebadane zostały trzy układy regulacji, wykorzystane do sterowania poziomem wody w dolnym zbiorniku przy wykorzystaniu mini kontrolera sygnałowego. Układ regulacji kaskadowej wymagał pomiaru poziomu wody w obydwu zbiornikach, natomiast w układach z regulatorami PID i IMC pomiar poziomu wody przeprowadzony został tylko w dolnym zbiorniku. Dokonana ocena jakości pozwala stwierdzić, że w regulacji kaskadowej, mimo iż dynamika obu pętli jest do siebie zbliżona, udało się uzyskać poprawę jakości sterowania względem układów PID oraz IMC, gdzie występują większe przeregulowania i dłuższe czasy regulacji na każdym rozważanym odcinku stabilizacji poziomu danego.

Podsumowując, w układzie kaskadowym dwóch zbiorników lepszą jakość sterowania uzyskuje się wykorzystując, regulator posiadający informacje o poziomach wody w obydwu zbiornikach.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Tomera M., Kęska J., Kasprowicz A.: Sterowanie poziomem wody w kaskadzie dwóch zbiorników przy użyciu mikrokontrolera TMS320F28335, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 30/2011, s. 123-132, ISSN 1425-5766.
2. Tomera M., Talaśka M.: Porównanie jakości pracy regulatorów stanu i PID w układzie kaskadowym dwóch zbiorników, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 31/2012, s. 139-146, ISSN 1425-5766.
3. Ching Y. T., An Internal Model Control Approach to the Design of Yaw-Rate-Control Ship-Steering Autopilot, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.24, No 4, October 1999.

CASCADE CONTROL OF WATER LEVEL IN TWO TANKS SYSTEM

Key-words: cascade control system, PID controller, internal model controller (IMC), digital signal processor

The paper presents a control system of the water level in the system of two tanks with free flow. In order to solve the problem of accurate control of the water level in the lower tank cascade control system was used. In order to evaluate the results of the cascade control, additional tests were carried out in internal model and one loop PID control system. Setting of controllers were determined using the direct synthesis method. Preliminary studies of control systems were conducted in MATLAB/Simulink environment to test prepared software. Final tests were performed in a real time system, where the designed control algorithms were programmed in the digital signal processor TMS320F28335. To compare the control performance of used cascade control system.