

STEROWANIE POZIOMEM CIECZY PRZY POMOCY REGULATORA WYKORZYSTUJĄCEGO MODEL NEURONOWY OBIEKTU NIELINIOWEGO

Krzysztof KULA

Akademia Morska w Gdyni

tel: 58 5586 494 e-mail: k.kula@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono projekt układu regulacji poziomu wody w zespole zbiorników o swobodnym wypływie, który w swej strukturze wykorzystuje nieliniowe modele obiektu: neuronowy i model niskiego rzędu uwzględniający zależność stałych czasowych od wartości wielkości regulowanej. Tak przyjęta struktura pozwala realizować sterowanie w układzie otwartym z możliwością korekty wartości zadanej przy wystąpieniu zakłóceń na wejściu lub wyjściu obiektu.

Słowa kluczowe: Sterowanie bazujące na modelu, sterowanie nieliniowe.

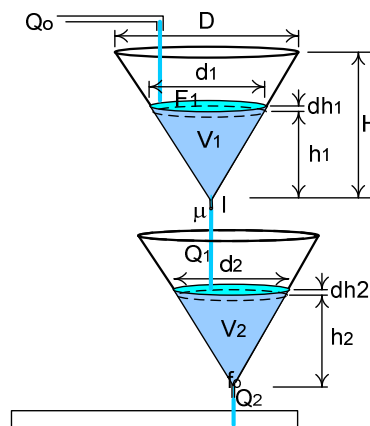
1. WPROWADZENIE

Wiele układów sterowania wykorzystuje w swej strukturze modele obiektów regulacji. Jeżeli obiekt jest niestacjonarny, model może być modyfikowany w trakcie pracy układu regulacji, co pozwala na wprowadzanie korekty w algorytmie sterowania, stosownie do bieżących zmian w dynamice procesu. Wówczas dla potrzeb syntezy adaptacyjnego układu regulacji wymagana jest procedura identyfikacji modelu obiektu. Szczególne trudności przysparza sterowanie obiektami silnie nieliniowymi. Do takich zaliczyć można rozpatrywany w tym artykule układ zbiorników swobodno-wypływowych. W ostatnich kilku dekadach opracowanych zostało wiele technik, które z powodzeniem stosowane są w nieliniowych układach regulacji np. sterowanie predykcyjne, ślizgowe etc. Zdolności takie posiada również regulator z modelem wewnętrznym. Jego skuteczność zależy jednak od dokładności wykorzystywanego modelu. Może to być zarówno model analogowy jak i dyskretny. Zagadnieniom wykorzystania sieci neuronowych w regulacji z modelem wewnętrznym poświęcona była praca Diasa, Antunesa oraz Moty [3]. Dotyczyła one jednak sterowania obiektami liniowymi.

2. OPIS MATEMATYCZNY OBIEKTU

Rozważmy obiekt będący kaskadą dwóch zbiorników o kształcie stożka odwróconego wierzchołkiem w dół ze sterowanym dopływem $Q_0(t)$ do zbiornika górnego i swobodnym odpływem do zbiornika dolnego a następnie do pewnego zbiornika zewnętrznego. W obiekcie tym regulowany ma być poziom cieczy w zbiorniku dolnym $h_2(t)$. Wpływ na tę wielkość zapewnić może sterowanie dopływem cieczy zasilającej zbiornik

górną a właściwie napięcie zasilania pompy $u(t)$, która tłoczy wymaganą objętość cieczy w czasie.



Rys. 1. Schemat kaskady zbiorników swobodno-wypływowych

Założmy, że w chwili początkowej objętość cieczy w zbiorniku górnym wynosi $V_1(0)=V_{10}$. Przepływ cieczy między zbiornikami poprzez zwężkę przy założeniu braku tarcia i że dopływ cieczy z pompy zasilającej równy jest zero $Q_0=0$, wyznaczyć można odwołując się do bilansu energii. Ubytek energii potencjalnej spowodowany spadkiem poziomu wody w zbiorniku zmienia się w przyrost energii kinetycznej cząsteczek wody będących w ruchu przy wypływie przez krótką rurkę stanowiącą ujście zbiornika. Ich prędkość $v=\Delta l/\Delta t$ po przyrównaniu zmian energii potencjalnej i kinetycznej określić można jako

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

h_1 – wysokość cieczy w górnym zbiorniku

Szybkość zmian objętości cieczy w zbiorniku będzie wówczas równa swobodnemu wypływowi cieczy Q_1

$$\frac{dV_1}{dt} = -Q_1(t) \quad (2)$$

Po uwzględnieniu oporów rurki o powierzchni przekroju f_0 wypływ ten będzie równy

$$Q_1(t) = \mu_0 f_0 \sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

gdzie μ_0 współczynnik przepływu,
 g - przyspieszenie ziemskie.

Szybkość zmian objętości cieczy w zbiorniku zależy od poziomu cieczy h_1 i zmian wysokości słupa cieczy dh_1 w czasie dt

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_1}{dh_1} \cdot \frac{dh_1}{dt} = F_1 \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (4)$$

W zbiorniku o kształcie stożka, po uwzględnieniu wzoru na powierzchnię lustra wody F_1 wyrazić ją można przy pomocy zależności

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (5)$$

Jeżeli znane są wymiary zbiornika, to zależność pomiędzy elementarną zmianą objętości cieczy a elementarną zmianą jej wysokości po przekształceniu (5) wyrazić można następująco

$$dV_1 = \frac{\pi D_1^2}{4 H_1^2} h_1^2 dh_1 \quad (6)$$

Bilans mas przy założeniu nieściśliwości przepływającej cieczy zastąpić można bilansem objętości. Dla zbiornika górnego przybierze on postać

$$dV_1 = [Q_0(t) - Q_1(t)]dt \quad (7)$$

Po podstawieniu do tej zależności (6) oraz (3) otrzymamy

$$\frac{\pi D_1^2}{4 H_1^2} h_1^2 dh_1 = (Q_0 - \mu_0 f_0 \sqrt{2gh_1}) dt \quad (8)$$

gdzie Q_0 – dopływ cieczy do zbiornika górnego

Postępując podobnie uzyskamy równanie opisujące dynamikę dolnego zbiornika,

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_1(t) - Q_2(t) \quad (9)$$

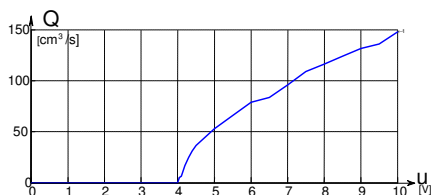
gdzie Q_2 - wypływ z dolnego zbiornika

które po uwzględnieniu zależności na wypływy przybierze postać

$$(\mu_0 f_0 \sqrt{2gh_1} - \mu_0 f_0 \sqrt{2gh_2}) dt = \frac{\pi D_2^2}{4 H_2^2} h_2^2 dh_2 \quad (10)$$

3.1. Pompa

Sterowanie obiektem realizowane jest przy pomocy niewielkiej pompy VIP (Voltage Immersion Pump) używanej do wyposażenia przyczep kempingowych o mocy 20 W, zasilanej napięciem 0-12 V. Zasysa ona wodę ze zbiornika wyrównawczego i transportuje do zbiornika górnego z wydajnością do 16 l/min. Maksymalna wysokość podnoszenia wody wynosi 6 m. Sterowanie wydatkiem pompy odbywa się poprzez człon korekcyjny ze wzmacniaczem i moduł PWM (ang. *Pulse Widht Modulation*) generujący drgania prostokątne o zmiennym współczynniku wypełnienia i napięciu 12 V. Umożliwia on płynną zmianę napięcia skutecznego podawanego na zaciski silnika napędzającego pompę.



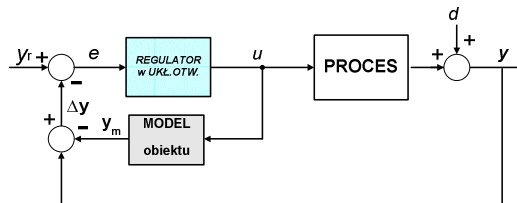
Rys. 3. Charakterystyka pompy $Q_0 = f(u)$

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Zadaniem układu regulacji w rozpatrywanym obiekcie jest utrzymywanie wysokości wody w dolnym zbiorniku na zadanym poziomie. Wartość zadana może zmieniać się w czasie. Rozpatrywany obiekt regulacji jest nieliniowy. W zależności od poziomu cieczy w zbiornikach zmieniają się jego własności statyczne jak i dynamiczne dlatego też spełnienie warunku uniknięcia przeregulowania przy minimum czasu regulacji wymaga adaptacji układu regulacji do zmieniających się warunków pracy. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości regulacji poziomu wody w szerokim zakresie zmian wartości zadanej sięgnięto po układ regulacji wykorzystujący model obiektu. Gdy model obiektu utworzony jest przy zastosowaniu linearyzacji lokalnej wokół wybranego punktu pracy, to może on być dokładny tylko w bliskim otoczeniu tego punktu. Gdy punkt pracy ulegnie zmianie, to efekt nieliniowości nie może być odtworzony przy użyciu takiego modelu, co pogarsza jakość regulacji a także w skrajnych przypadkach prowadzić może do utraty stabilności układu. Model taki powinien być uaktualniony i dostosowany do zmiany punktu pracy albo być na tyle elastyczny, że będzie w stanie z wystarczającą dokładnością odtwarzać własności obiektu w szerokim zakresie pracy układu. Przy opracowaniu proponowanego układu regulacji sięgnięto po drugie rozwiązanie: skonstruowany został nieliniowy odwrotny model obiektu, który może być wykorzystany jako integralna część regulatora, a tym samym umożliwić śledzenie zmian wartości zadanej przy zachowaniu wysokiej jakości sterowania.

4. SYNTEZA REGULATORA

W literaturze naukowej znaleźć można inne prace poświęcone zagadnieniu regulacji poziomu wody w układzie 2-3 zbiorników prostopadłościennych ułożonych w kaskadę. Na tego typu obiekcie testowane były różne metody sterowania. W pracach poświęconych temu problemowi znaleźć można wyniki badań nad wykorzystaniem do regulacji poziomu wody sterowania rozmytego PID [6], regulatora stanu [5], wieloobszarowego układu regulacji PI a także regulatora neuronowego [6], który skonstruowany został jako równoważnik regulatora rozmytego PID na bazie radialnych funkcji bazowych RBF. W tej pracy na potrzeby sterowania opisanym procesem zaprojektowany został regulator, który w swej strukturze wykorzystuje model obiektu. Poglądowy schemat tego układu przedstawiony jest na rysunku 6.



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji

Koncepcja układu regulacji z modelem będącym częścią regulatora (ang. IMC) przedstawiona została przez Morarię i Zafiriou [1]. Regulator z modelem wewnętrznym skonstruowany został na potrzeby sterowania stabilnymi obiektami liniowymi. Składa się on z dwóch części: regulatora projektowanego do sterowania w układzie otwartym oraz korektora uchybu, jaki powstaje między efektem sterowania obiektem i modelem. Taka struktura regulacji pozwala łączyć zalety sterowania w układzie otwartym przy jednoczesnym

kompensowaniu niedogodności tego sterowania, jakimi są wpływ zakłóceń oraz niedokładność modelowa. Transmittancja projektowa regulatora układu otwartego powinna spełniać warunek

$$G_{ro}(s) = F(s)M_{odw}(s) \quad (11)$$

gdzie $M_{odw}(s)$ – model odwrotny obiektu
 $F(s)$ transmittancją filtra, który sprawi, że $G_{ro}(s)$ będzie właściwą

Jeżeli wymagane jest, aby proces sterowania w układzie otwartym był aperiodyczny, to powinna mieć ona następującą postać:

$$F(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^n} \quad (12)$$

gdzie T_f - stała czasowa filtra
 n - liczba całkowita, będąca różnicą między rzędem mianownika i licznika modelu

Jak widać z zależności (9) transmittancja układu otwartego w przypadku idealnego modelu odwrotnego pokrywać się będzie z przyjętą transmittancją filtra.

Gdyby obiekt był liniowy, minimalnofazowy to wyznaczenie transmittancji regulatora metodą syntezy bezpośredniej na podstawie zależności (9) nie byłoby trudne. Jednak dla obiektu nieliniowego dla potrzeb uzyskania właściwego algorytmu sterowania wymagana jest inna struktura włączenia modelu obiektu jako integralnej części regulatora. Opisana została ona przez Changa [2].

Odwrotność transmittancji regulatora jest równa

$$G_{ro}^{-1}(s) = \frac{e(s)}{u_r(s)} = \frac{M(s)}{F(s)} \quad (13)$$

Jeżeli transmittancja $G_{ro}(s)$ jest właściwa, to jej odwrotność jest również właściwa i może być rozłożona na dwie składowe: stałą q_0 oraz transmittancję ściśle właściwą

$$G_{ro}^{-1}(s) = q_0 + \bar{G}_{ro}^{-1}(s) \quad (14)$$

Zależność na transmittancję regulatora projektowanego jako regulator w układzie otwartym (9) po odwróceniu lewej i prawej strony równania (12) można teraz przedstawić jako

$$G_{ro}(s) = \frac{1/q_0}{1 + \frac{1}{q_0} \bar{G}_{ro}^{-1}(s)} \quad (15)$$

Odpowiada ona transmittancji zastępczej układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

$$\text{Wyrażenie} \quad q_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} G_{ro}^{-1}(s) \quad (16)$$

reprezentuje wzmocnienie przy wysokich częstotliwościach sygnału, natomiast z przekształcenia (12) po uwzględnieniu (11) otrzymamy, że

$$\bar{G}_{ro}^{-1}(s) = \frac{M(s)}{F(s)} - q_0 \quad (17)$$

Po podstawieniu tej zależności do (8) otrzymujemy wymaganą transmittancję regulatora, która zależy od modelu obiektu. Zatem regulator może osiągnąć transmittancję (9) dzięki zastosowaniu struktury sprzężenia zwrotnego, co pozwala uniknąć konieczności

tworzenia modelu odwrotnego obiektu, co w przypadkach obiektów zawierających nieliniowości stanowić może duże uproszczenie.

4.1. Zlinearyzowany model obiektu

Równania opisujące rozpatrywany proces są nieliniowe. Jedną z cech regulatora IMC jest jego odporność na niewielkie nieliniowości obiektu. Jeżeli znany jest punkt pracy układu, można sporządzić dla tego punktu zlinearyzowany model procesu. Oznaczając małe różnice poziomu cieczy wokół danego punktu pracy odpowiednio w zbiorniku górnym i dolnym jako

$$\Delta h_1 = h_1 - h_{10} \quad \Delta h_2 = h_2 - h_{20} \quad (18)$$

otrzymamy

$$f_d(h_1, h_2, \dot{h}_2) = \mu_0 f_{01} \sqrt{2g\Delta h_1} - \mu_0 f_{02} \sqrt{2g\Delta h_2} + \frac{\pi D_2^2}{4H_2^2} h_2^2 \Delta \dot{h}_2 = 0 \quad (19)$$

$$f_d(h_1, h_2, \dot{h}_2) = \frac{4H_2^2 \mu_0 f_{01} \sqrt{2g\Delta h_1}}{\pi D_2^2 \Delta h_2^2} - \frac{4H_2^2 \mu_0 f_{02} \sqrt{2g}}{\pi D_2^2 \Delta h^{3/2}} + \Delta \dot{h}_2 = 0 \quad (20)$$

Po rozwinięciu ich w szereg Taylora i odrzuceniu wszystkich składników nieliniowych oraz pochodnych wyższego rzędu otrzymamy dla rozpatrywanego punktu pracy następujące zlinearyzowane zależności

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{1}{T_1} \Delta h_1(t) + k_1 \Delta u(t) \quad (21)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{T_1} \Delta h_1(t) - \frac{1}{T_2} \Delta h_2(t) \quad (22)$$

Stałe czasowe T_1, T_2 zależą od kształtu i wymiarów zbiorników. Po dokonaniu przekształcenia Laplace'a równań (21,22) otrzymamy transmittancje operatorowe przedstawiające dynamikę zbiornika górnego $G_{zg}(s)$ oraz dolnego $G_{zd}(s)$ wokół wybranego punktu pracy

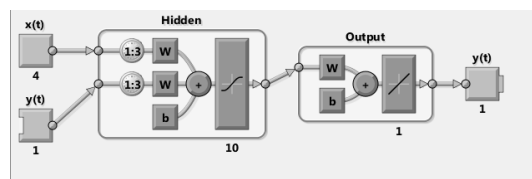
$$G_{zg}(s) = \frac{h_1(s)}{u(s)} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \quad (23)$$

$$G_{zd}(s) = \frac{h_2(s)}{h_1(s)} = \frac{k_2}{T_2 s + 1} \quad (24)$$

gdzie k_1 współczynnik wzmocnienia uwzględniający również charakterystykę pompy, $k_2 = T_2/T_1$.

4.2. Model neuronowy

Aby uzyskać lepsze odwzorowanie zachowania obiektu w szerokim zakresie zmian warunków pracy do utworzenia modelu wykorzystano sztuczną sieć neuronową. Sieć użyta w tej pracy składa się z trzech warstw: warstwy wejściowej, ukrytej oraz wyjściowej. Utworzony w ten sposób model neuronowy nie jest modyfikowany w trakcie pracy układu regulacji.



Rys. 4. Struktura sieci neuronowej z propagacją wsteczną błędów

W modelu tym przetwarzany jest sygnał wejściowy, będący sygnałem sterującym regulatora, stosownie do istniejących połączeń skrótnych między węzłami oraz ustalonych współczynników wag. Współczynniki te dostrajane

są w trakcie procesu uczenia przy pomocy metody wykorzystującej wsteczną propagację błędu tak, aby zminimalizować sumę kwadratów błędu pomiędzy sygnałem wyjściowym sieci a sygnałem odniesienia, którym jest poziom cieczy w dolnym zbiorniku. Wyjście warstwy końcowej wyznaczane jest na podstawie poniższej zależności:

$$net_j = \sum_j^i w_{ji} o_i + \theta_j \quad (24)$$

gdzie: w_{ji} wagi między warstwą ukrytą j a warstwą wejść i .
 θ_j, o_i - wyjścia warstwy wejściowej oraz ukrytej.

Dzięki zastosowaniu algorytmu propagacji wstecznej współczynniki wagowe dostrajane są tak, aby zminimalizować wartość błędu średniokwadratowego

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{j-output} (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (25)$$

gdzie t_{pj} jest żądanym wyjściem a o_{pj} aktualną wartością sygnału wyjściowego.

$$o_{pj} = 1 / \sum_j (1 + e^{-w_{pj} o_{pj} + \theta_j}) \quad (26)$$

Uchyb każdego węzła określa się z zależności

$$\delta_{pj} = o_{pj} (t_{pj} - o_{pj}) (1 - o_{pj}) \quad (27)$$

Uchyb warstwy ukrytej przekazywany jest wstecz

$$\delta_{pj} = o_{pj} (1 - o_{pj}) \sum_k \delta_{pk} W_{kj} \quad (28)$$

Przyrosty każdego ze współczynników wag są wyznaczone w oparciu o tzw. metodę delta przy zastosowaniu następującego algorytmu

$$\Delta_p w_{ji}(t+1) = \alpha o_{pi} \delta_{pj} + \beta \Delta_p w_{ji}(t) \quad (29)$$

gdzie α współczynnikiem szybkości uczenia (większy od 0.01)
 β - oznacza efekt poprzedniej zmiany wagi w bieżącym kierunku

Model neuronowy obiektu wraz z urządzeniem wykonawczym i korektorem strefy nieczułości pompy utworzony został przy wykorzystaniu *Neural Network Toolbox* w oparciu o zestaw danych pomiarowych sygnału sterującego i wielkości regulowanej. Jest to tzw. model predykcyjny służący do prognozowania wartości następných próbek sygnału wyjściowego modelowanego obiektu. W warstwie wejściowej wykorzystano 2 neurony a w warstwie pośredniej 10. Do obliczania wartości współczynników wag warstwy pośredniej zastosowana została sigmoidalna funkcja aktywacji. Z uwagi na to iż punkt odniesienia modelu NARX jest uaktualniany na bieżąco na podstawie kolejnych próbek pomiarowych wyjścia umożliwia on dość dokładne odtwarzanie zachowania obiektu a tym samym na wprowadzanie do wartości zadanej odpowiedniej korekty, uwzględniającej wpływ zakłóceń.

4.3. Model odwrotny

Przy projektowaniu proponowanego regulatora nie sięgnięto po odwrotny model neuronowy, gdyż struktura neuronowego sterowania bezpośredniego nie jest wystarczająco odporna. Do syntezy regulatora układu otwartego wykorzystany został model o parametrach zależnych od bieżącej wartości wielkości wyjściowej, którego odwrotność uzyskano przy zastosowaniu struktury z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Metoda ta

opisana została na początku rozdziału 4. Pozwala ona na łatwiejsze modelowanie nieliniowości modelu odwrotnego w tym uwzględnienie charakterystyk nasycenia.

Model liniowy rozpatrywanego układu dwóch zbiorników w wybranym punkcie pracy wyrazić można przy pomocy następującej transmitancji Laplace'a

$$M(s) = \frac{h_2(s)}{u(s)} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (30)$$

gdzie wzmacnienie wypadkowe $k = k_1 \cdot k_2$.

Odwrotność transmitancji regulatora układu otwartego będzie wówczas równa

$$G_{ro}^{-1}(s) = \frac{M(s)}{F(s)} = \frac{k(T_{f1}s + 1)(T_{f2}s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (31)$$

Stosownie do (14) przedstawić ją można w postaci wartości stałej oraz transmitancji ściśle właściwej

$$G_{ro}^{-1}(s) = \frac{k T_{f1} T_{f2}}{T_1 T_2} + \frac{k(as + b)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (32)$$

gdzie:

$$a = \frac{(T_{f1} + T_{f2})T_1 T_2 - T_{f1} T_{f2} (T_1 + T_2)}{T_1 T_2} \quad b = \frac{T_1 T_2 - T_{f1} T_{f2}}{T_1 T_2}$$

Czynnik stały transmitancji G_{ro}^{-1} jest zatem równy

$$q_o = \frac{k T_{f1} T_{f2}}{T_1 T_2} \quad (33)$$

4.4. Identyfikacja modelu o zmiennych parametrach

Można wykazać [3], że dla struktury IMC prawidłowe dopasowanie modelu i modelu odwrotnego jest wystarczające, aby w tym układzie zapewnić dobre sterowanie oraz zredukować wpływ zakłóceń.

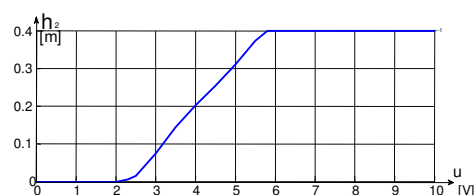
Nie zawsze model matematyczny obiektu może zostać sporządzony z odpowiednio dużą dokładnością. Wynikać to może nie tylko z niedoskonałości opisu matematycznego ale również odstępstw od założonych kształtów i błędów pomiarowych. Alternatywą dla niego może być model sporządzony na podstawie eksperymentów identyfikacyjnych polegających na pomiarze w wybranych punktach pracy charakterystyki statycznej $h_2=f(u)$ oraz zależności odzwierciedlających zmiany stałych czasowych inercji modelu w funkcji poziomu cieczy w danym zbiorniku $T_1=f_1(h_1)$ $T_2=f_2(h_2)$. Ogólnie przedstawić je można w postaci wielomianu potęgowego

$$T_j(h_j) = \sum_{i=0}^n a_{ji} h_j^i \quad j=1,2 \quad (34)$$

którego współczynniki wyznaczone są przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów. W przypadku rozpatrywanego obiektu przyjęto zależność wynikającą z opisu matematycznego, że

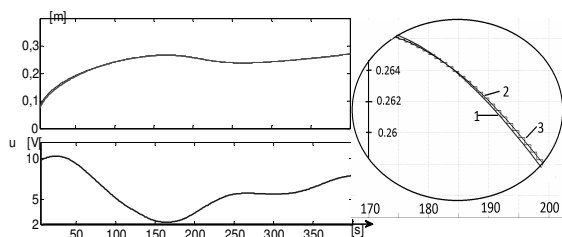
$$T_j(h_j) = 0.00064 \cdot h_j^{5/2} \quad j=1,2 \quad (35)$$

Zależność pomiędzy napięciem sterującym a wielkością regulowaną w stanie ustalonym przedstawiona została na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyka statyczna układu zbiorników $h_2=f(u)$

Model obiektu wraz z odwrotnością transmitancji filtra, który jest niezbędny przy konstrukcji regulatora, utworzony został w oparciu o zależność (31), przy czym występujące w niej parametry T_1, T_2, T_{f1}, T_{f2} oraz k są zmienne i zależą od poziomu cieczy w danym zbiorniku. Istotne znaczenie dla zdolności układu do kompensacji uchybu ustalonego do zera ma zgodność charakterystyk statycznych modelu włączanego równoległe do obiektu oraz modelu ze sprzężenia zwrotnego regulatora. Porównanie odpowiedzi modelu i obiektu na sygnał wejściowy zmienny w czasie $u(t)$ zawiera rysunek 6.

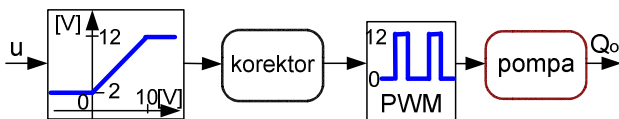


Rys. 6. Przebiegi wielkości wyjściowej $h_2=f(u)$.
W powiększeniu: 1-obiekt, 2-model, 3-model z ekstrapolatorem zerowego rzędu

5. WYNIKI SYMULACJI

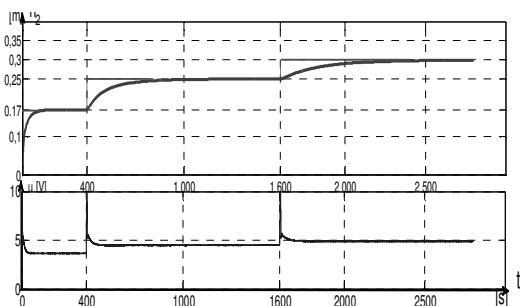
5.1. Parametry obiektu

Układ składa się z dwóch jednakowych zbiorników w kształcie stożka odwróconego wierzchołkiem do dołu o wysokości $H = 0,4$ m i maksymalnej średnicy $D = 0,2$ m każdy. Otwory wylotowe mają po 5 mm średnicy. Na potrzeby modelowania obiektu przyjęto dla nich współczynnik μ_0 równy 0,99. Schemat blokowy urządzenia wykonawczego przedstawiono na rysunku 7. Pompa została zamodelowana jako człon bezinercyjny (rys. 3).



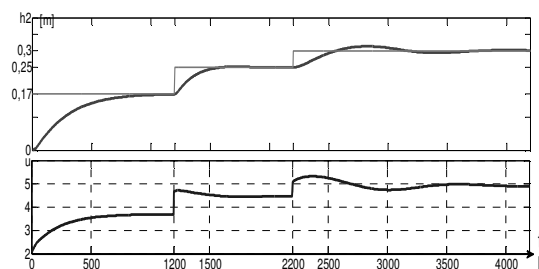
Rys. 7. Schemat blokowy urządzenia wykonawczego

Symulacje komputerowe pracy proponowanego układu regulacji oraz układu wykorzystującego do sterowania regulator PID przeprowadzone zostały z wykorzystaniem pakietu oprogramowania Matlab/Simulink. Otrzymane wyniki symulacji zamieszczone zostały na rysunkach 8-11. Na rysunku 8 przedstawiony został przebieg zmian wysokości cieczy w dolnym zbiorniku wywołany zmianami wartości zadanej oraz przebieg wielkości sterującej.



Rys. 8. Przebiegi wielkości regulowanej $h_2=f(t)$ oraz sygnału sterującego $u(t)$ proponowanym układzie regulacji

Dla porównania na rysunku 9 pokazano przebieg wielkości wyjściowej osiągnięty przy wykorzystaniu w układzie regulatora PI, którego nastawy dla modelu liniowego w punkcie pracy odpowiadającym wartości zadanej $h_2 = 0,2$ m, dobrane zostały pod kątem uzyskania przebiegu aperiodycznego przy minimum czasu regulacji przy 2% przedziale tolerancji.

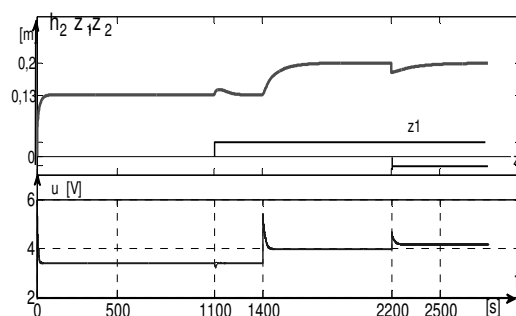


Rys. 9. Przebieg wielkości regulowanej $h_2=f(t)$ oraz sygnału sterującego $u(t)$ w układzie z regulatorem PI

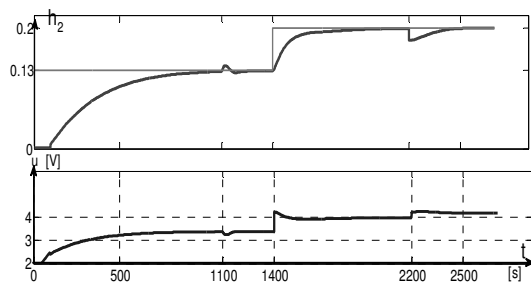
W punkcie pracy, dla którego nastawy zostały dobrane, oba przebiegi jak i uzyskany czas regulacji są do siebie zbliżone. Jednak dla innych punktów pracy układ jest niedotłumiony lub przetłumiony. Wynika to z przyjętych nastaw regulatora PI o strukturze szeregowo-równoległej $K_p=12$, $T_i=160$. Zbyt mały sygnał sterujący w pierwszej fazie sterowania spowodowany jest małym wzmocnieniem proporcjonalnym, co przy dopiero rosnącym od zera sygnałem z członu całkującego skutkuje niskim wydatkiem pompy. Jednakże zmiana tych relacji w nastawach doprowadziłaby do niestabilności przy wyższych wartościach zadanych.

Zdolność układu do kompensacji wpływu zakłóceń obu układów przedstawia rysunek 10 i 11, na których ukazany jest przebieg zmian wysokości cieczy w dolnym zbiorniku przy oddziaływaniu zakłóceń takich jak $z_1(t)$ przedstawiających dodatkowy dopływ cieczy w zbiorniku górnym oraz $z_2(t)$ obrazujący nieszczelność zbiornika dolnego, przy czym $z_1(t)=0.03 \cdot I(t-1100)$ m a $z_2(t)=-0.02 \cdot I(t-2200)$ m.

Reakcja układu regulacji na wzrost objętości cieczy w zbiorniku górnym (z_1) jest niewielka. Wartość zadana zostaje nieznacznie skorygowana do poziomu 12,6 cm a wartość skuteczna napięcia podawanego na pompę z 3,4 do 3,34 V ale wskutek przyspieszonego wypływu wody z górnego jak i z dolnego zbiornika rozstrojenie między obiektem a modelem szybko maleje. Reakcja układu z klasycznym regulatorem PI jest wprawdzie wolniejsza ale i większa. Napięcie spada do 3,25 V, wydatek pompy zmniejsza się do 28,4 cm³/s, co powoduje szybszy ubytek wody ze zbiornika i chociaż z pewnym przeregulowaniem równie szybko kompensuje oddziaływanie tego zakłócenia. Natomiast reakcja układu na zwiększony wypływ wody jest podobna jak na wzrost wartości zadanej i szybkość jego skompensowania zależy przede wszystkim od ustalonej stałej czasowej filtra



Rys. 10. Sterowanie układu IMC podczas oddziaływania zakłóceń.



Rys. 11. Sterowanie układu PI podczas oddziaływania zakłóceń

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy koncepcja układu regulacji do sterowania obiektem nieliniowym bazuje na wykorzystaniu regulatora IMC, składającego się z tzw. regulatora układu otwartego wraz z członem korygującym wartość zadaną poprzez sprzężenie zwrotne od różnicy wyjścia obiektu i modelu. Do syntezy regulatora wykorzystano nieliniowy model obiektu wraz z odwrotną transmitancją filtra, który zrealizowany został przy wykorzystaniu ujemnego sprzężenia zwrotnego. Rozstrojenie modelu i obiektu, którego miarą jest różnica tych sygnałów, wynikające z niedokładności i nieokreśloności modelowej lub oddziaływania zakłóceń prowadzi do skorygowania wielkości zadanej a w konsekwencji również i sygnału sterującego. Natomiast sam uchyb regulacji, rozumiany jako różnica między wartością zadaną a wielkością regulowaną, nie wpływa na przebieg sterowania. Zaprojektowany układ umożliwia zapewnienie odpowiedniej jakości regulacji pod warunkiem, że oba modele będą miały jednakową charakterystykę statyczną oraz z wystarczającą dokładnością oddawać będą zachowanie obiektu. Jeżeli zmienna jest inercja układu, to stała czasowa filtra T_f musi również podążać za tymi zmianami. Jej wartość bowiem istotnie wpływa na przebieg wielkości regulowanej. Przedstawiony w artykule układ regulacji

śledzi ze stałą wydajnością zmiany wartości zadanej w szerokim zakresie zmian wielkości sterującej a także efektywnie kompensuje wpływ zakłóceń.

Zaprezentowana powyżej modyfikacja układu regulacji z modelem wewnętrznym rozszerzająca jego zastosowanie do układów nieliniowych, która przetestowana została w układzie regulacji poziomu cieczy w zespole dwóch zbiorników swobodno-wypływowych może być także stosowana w innych w układach nieliniowych o zmiennym punkcie pracy, o ile spełnione zostaną wyżej wymienione warunki. Aby skrócić czas regulacji, w miejsce (12) można zastosować filtry forsujące szybszą odpowiedź układu.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Morari M., Zafiriou E., Robust process control, Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall, 1989 ISBN-13: 978-0137821532
2. Chang-Y. T., An Internal Model Control Approach to the Design of Yaw-Rate-Control Ship-Steering Autopilot, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.24, No4, October 1999 s.507-513
3. Dias F.M., Mota A.M., Comparison between different Control Strategies using Neural Networks, 9th Mediterranean Conference on Control And Automation, Dubrovnik, 2001
4. Bakun P., Długoński O., Piotrowski R., Zaawansowane metody sterowania kaskadowym układem zbiorników, Pomiary Automatyka Robotyka, R. 19, Nr 3/2015, 25–30
5. Tomera M., Talaśka M., Porównanie jakości pracy regulatorów stanu i PID w układzie kaskadowym dwóch zbiorników. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 31, 2012, s. 139-146
6. Tomera M., Kasproicz A., Zastosowanie regulatora neuronowego i rozmytego do sterowania poziomem wody w układzie kaskadowym dwóch zbiorników, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Rok LIII, Nr 3 (190) 2012, 123–138

CONTROL SYSTEM OF LIQUID LEVEL USING NEURAL MODEL OF NONLINEAR PLANT

The paper presents the concept of a nonlinear control system, which is the liquid level control system of two tanks. It is based on the use in controller structure a non-linear models of the plant: neural and low-order model takes into account the dependence of the time constants and steady state gain of the controlled variable. So adopted structure allows to perform the control in an open-loop system with the possibility of setpoint correction under the influence of disturbances on the input or output of the plant.

Keywords: Model-based control, nonlinear control systems.