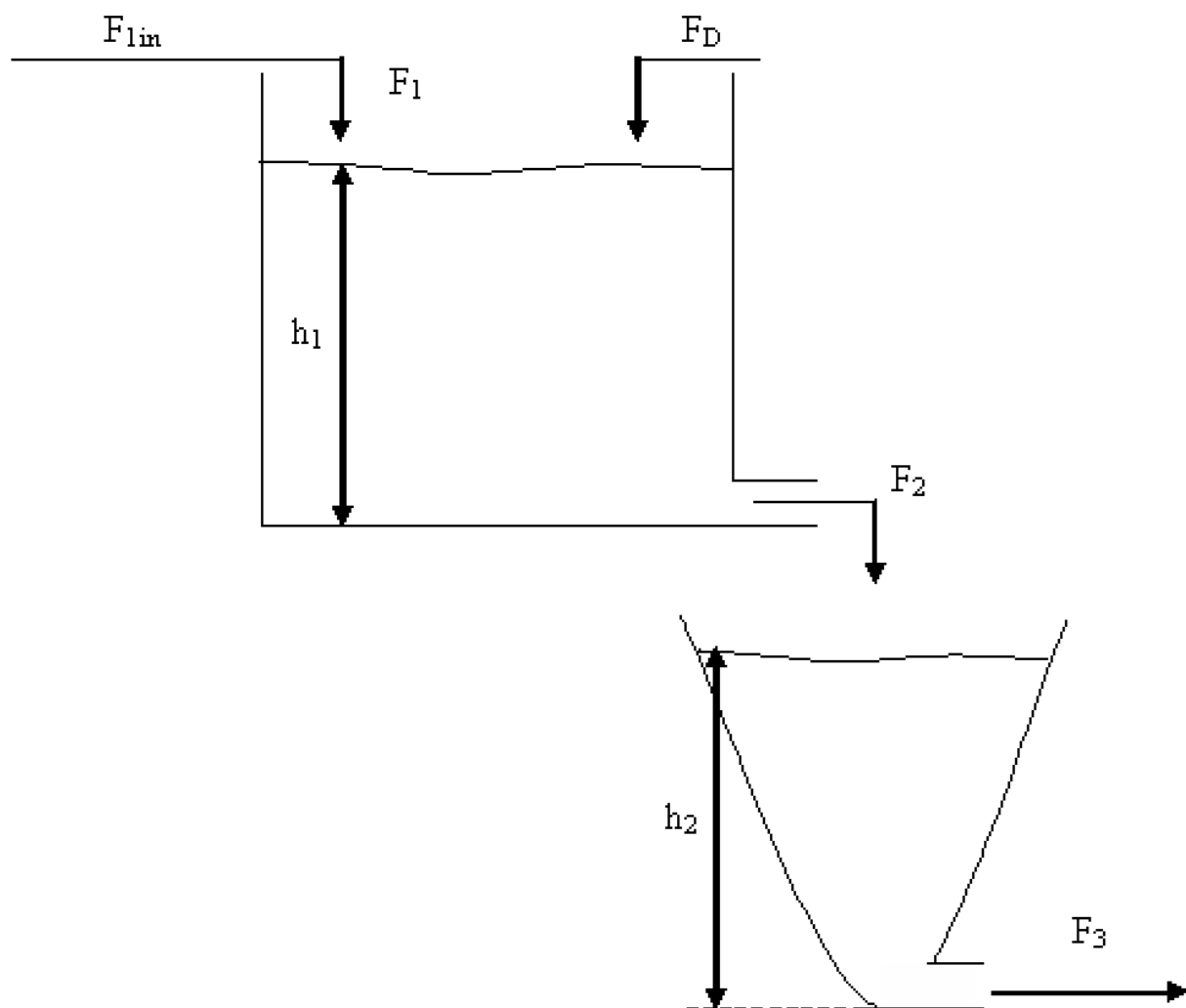


SZAU – projekt nr 1

1. Założenia projektu

W przedstawionym w projekcie rozpatrzono problem sterowania kaskadowego poziomem cieczy w dwóch zbiornikach, zaprezentowanych na rysunku numer 1.



Rysunek 1. Model obiektu.

Pierwszym, a zarazem najważniejszym elementem układu z punktu widzenia jego działania jest dopływ płynu do zbiornika pierwszego – ozn. F_1 . W modelu występuje również niekorzystne zjawisko, w postaci zakłóceń, przedstawione na rysunku jako F_D . Obie wcześniej opisane zmienne wpływają bezpośrednio na wysokość cieczy w zbiorniku pierwszym i wartość ta jest oznaczona jako h_1 . Następnie poprzez odpływ F_2 płyn przedostaje się do

zbiornika drugiego. Jego poziom opisano jest jako h_2 . Zmienna ta jest najważniejszym parametrem pod względem regulacji. Układ będzie dążył do jak najszybszego osiągnięcia tej wartości, a kolejnym jego zadaniem będzie utrzymanie jej stałej wartości. Ostatnim elementem całego modelu jest odpływ F_3 , którego stopień otwarcia jest parametrem sterowalnym i w sposób ścisły wpływa na poziom w zbiorniku drugim.

Obiekt jest opisany następującymi równaniami:

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = F_1 + F_D - F_2(h_1) \\ \frac{dV_2}{dt} = F_2(h_1) + F_3(h_2) \\ F_2(h_1) = \alpha_1 \sqrt{h_1}, F_3(h_2) = \alpha_2 \sqrt{h_2}, V_1(h_1) = A_1 \cdot h_1, V_2(h_2) = C_2 \cdot h_2^2, F_1(t) = F_1(t - \tau) \end{cases}$$

gdzie:

V_1 – objętość cieczy w 1. zbiorniku

V_2 – objętość cieczy w 2. zbiorniku

h_1 – wysokość cieczy w 1. zbiorniku

h_2 – wysokość cieczy w 2. zbiorniku

F_1 – dopływ (wielkość sterowana)

F_D – dopływ zakłócający

A_1 – pole podstawy 1. zbiornika

α_1, α_2, C_2 – stałe

τ – opóźnienie (bezwładność układu)

Dla powyższych równań obowiązują następujące stałe:

$$A_1 = 540 \text{ cm}^2, C_2 = 0,85, \alpha_1 = 26, \alpha_2 = 20$$

Punkt pracy dobrano z charakterystyki statycznej, którą otrzymano w następujący sposób:

$$0 = F_1 + F_D - F_2(h_1)$$

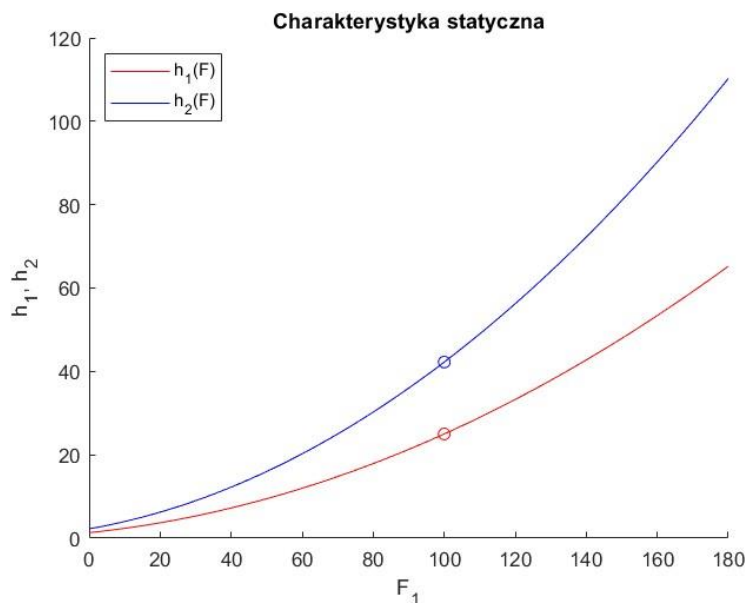
$$0 = F_2(h_1) + F_3(h_2)$$

Skąd po podstawieniu zależności $F_2(h_1) = \alpha_1 \sqrt{h_1}$ oraz $F_3(h_2) = \alpha_2 \sqrt{h_2}$ otrzymano:

$$h_1 = \left(\frac{F_1 + F_D}{\alpha_1} \right)^2$$

$$h_2 = \left(\frac{F_1 + F_D}{\alpha_2} \right)^2$$

Jest to więc zależność kwadratowa, co zilustrowano na rysunku X:



Rysunek 2. Charakterystyka statyczna $h_2(F)$, gdzie $F = F_1 + F_D$.

Punkt pracy dobrano tak, aby zostawić sobie duży zapas regulacji zarówno przy zwiększaniu poziomu cieczy, jak i obniżaniu. Dlatego zdecydowano się na punkt leżący w środkowej części rozpatrywanego zakresu danych, tj.:

$$F_1 = 100 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}, F_D = 30 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$\tau = 100 \text{ s}$$

$$h_2 = 42.25 \text{ cm}$$

2. Cel projektu

Podstawowym założeniem projektu było zbudowanie modelu, który symuluje poziom płynu w dwóch zbiornikach cieczy. Należało przeprowadzić linearyzację modelu względem wskazanego punktu w celu uproszczenia modelu układu. Działanie tak uzyskanego modelu porównano z modelem nieliniowym, a następnie zaprojektowano konwencjonalny algorytm regulacji predykcyjnej w wersji analitycznej.

Drugą część projektu polegała na opracowaniu modelu rozmytego Takagi–Sugeno obiektu z dwoma, trzema, czterema i pięcioma modelami lokalnymi. Dla którego kształt funkcji przynależności miał być oparty na równomiernym podziale wybranej zmiennej na zbiory rozmyte. Na podstawie tego modelu oraz wcześniej przygotowanego modelu liniowego i nieliniowego, dokonano porównania jakości regulacji. Ostatecznie poprawiono jakości sterowania modelu rozmytego.

Trzecim zadaniem w projekcie było zaprojektowanie numerycznego, rozmytego algorytmu regulacji predykcyjnej typu SL. Następnie należało porównać jego działanie z wcześniej przygotowanymi regulatorami w sposób analogiczny do poprzednich.

Czwartym, a zarazem ostatnim elementem projektu było uzupełnienie algorytmu regulacji predykcyjnej o mechanizm uwzględniający pomiar zakłóceń, a następnie porównanie działania przygotowanego układu, z wcześniej wykonanymi modelami.

3. Przebieg projektu

Projekt został w całości zrealizowany w środowisku MATLAB, które służy między innymi do wykonywania obliczeń naukowych i inżynierskich oraz tworzenia symulacji.

4. Model nieliniowy

Pierwszym krokiem było zbudowanie modelu nieliniowego układu, który stanowi odwzorowanie rzeczywistego modelu. Do tego celu wykorzystano wyżej wymienione parametry oraz równania opisujące działanie obiektu. Zbudowany model był podstawowym fundamentem do dalszych symulacji. Algorytmem numerycznym, który zastosowano do wyznaczenia wysokości cieczy w zbiornikach była zmodyfikowana metoda Eulera, której fragment zamieszczono poniżej:

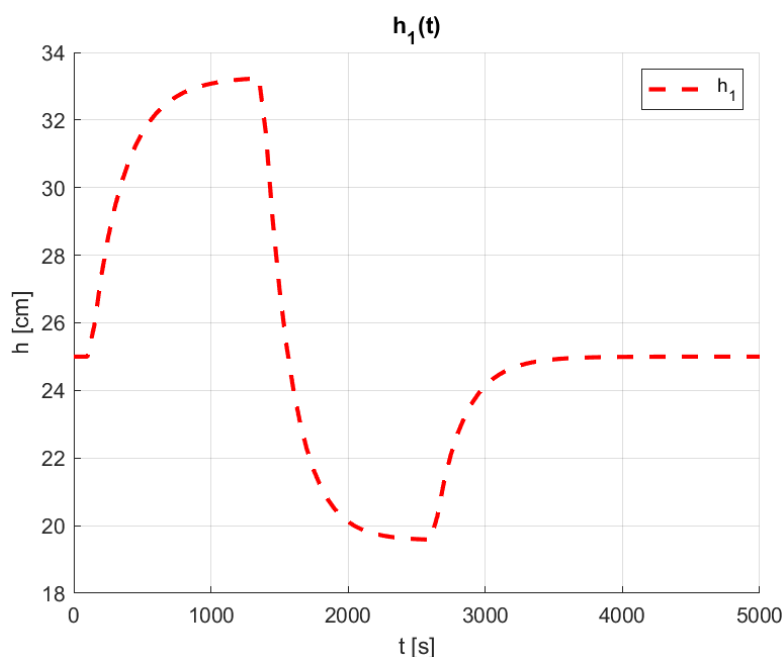
%% Część nieliniowa

```
V_1 = V_1e + Tp * fun_1(h_1e, F_1(i-1), F_D(i-1));  
V_2 = V_2e + Tp * fun_2(h_1e, h_2e);  
h_1 = V_1 / P;  
h_2 = sqrt(V_2 / C);  
V_1e = V_1e + 1/2 * Tp * (fun_1(h_1e, F_1(i-1), F_D(i-1)) + fun_1(h_1, F_1(i), F_D(i)));  
V_2e = V_2e + 1/2 * Tp * (fun_2(h_1e, h_2e) + fun_2(h_1, h_2));  
h_1e = V_1e / P;  
h_2e = sqrt(V_2e / C);
```

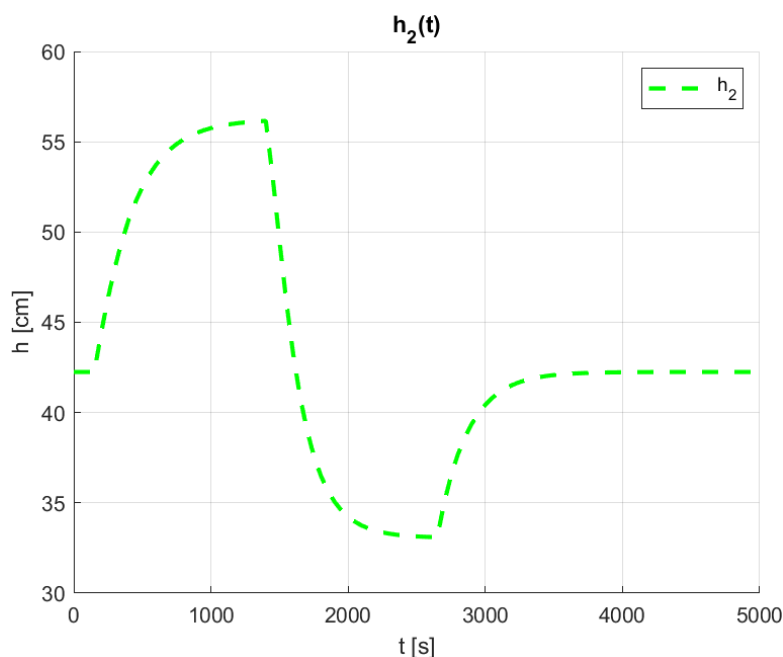
*Fragment kodu pochodzi ze skryptu: **zbiorniki_lin_fuzzy.m***

Obiekt nieliniowy poddano szeregom testów, co pozwoliło dobrać odpowiedni okres próbkowania T_p , który dla układu złożonego z dwóch zbiorników, przy tak dużej bezwładności sterowania – 100 sekund – wynosi aż 50 sekund.

Korzystając ze zbudowanego modelu nieliniowego, otrzymano następujące rezultaty:



Rysunek 3. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym.



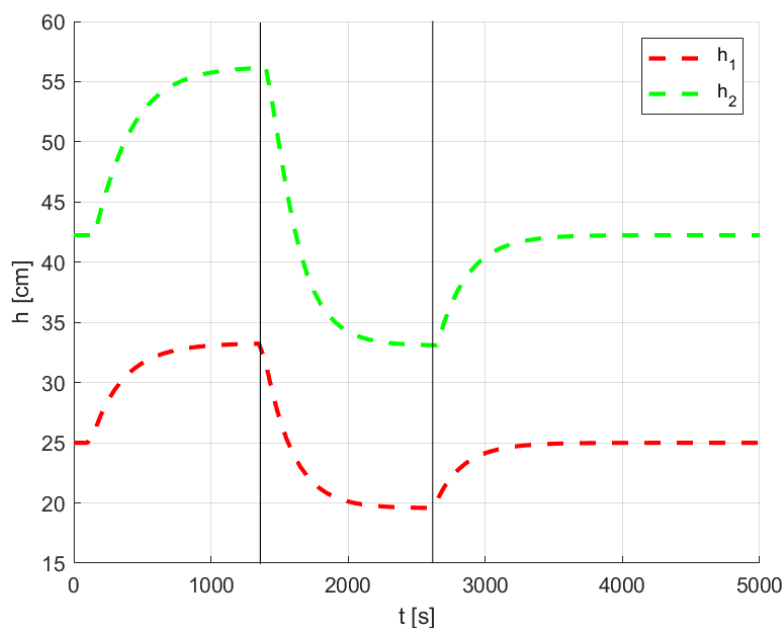
Rysunek 4. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku drugim.

Na podstawie powyższych wykresów można wywnioskować, że układ zachowuje się zgodnie z przewidywaniami i zgodnie z obowiązującymi prawami fizyki.

Podczas całej symulacji na układ działa stałe zakłócenie reprezentowane przez $F_D = 30$. Sterowanie rozpoczyna się od wartości $F_1 = 100$, następnie po 100 sekundach zostaje zmienione na wartość $F_1 = 120$, co skutkuje zwiększeniem się poziomu płynu w obu zbiornikach. Poziom cieczy stabilizuje się po ok. 1200 sekundach na następujących wysokościach: około 56 cm dla zbiornika drugiego oraz 33 cm dla zbiornika pierwszego.

Kolejno, gdy dopływ jest zmniejszany w 1400 sekundzie ($F_1 = 85$), to poziom w zbiornikach spada i ponownie się stabilizuje. Tym razem dla wartości około 32 cm w zbiorniku drugim i 19cm w zbiorniku pierwszym.

Ostatnim etapem przebiegu symulacji jest stabilizacja układu w 2600 sekundzie dla sterowania równego $F_1 = 100$. Pozwala to osiągnąć wartość 42 cm w zbiorniku drugim oraz 25 cm w zbiorniku pierwszym.



Rysunek 5. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym i drugim.

Warto także zauważyć, że zgodnie z rzeczywistością w układzie występuje opóźnienie. Oznacza to, że w momencie, w którym zostanie zwiększony dopływ do układu, to najpierw poziom płynu wzrasta w zbiorniku pierwszym, a dopiero po upływie jednego okresu próbkowania ($T_p = 50$) – rozpoczyna wzrastać w drugim.

5. Model liniowy

Kolejnym etapem było zbudowanie modelu liniowego obiektu. Celem tego procesu było uproszczenie modelu układu, co pozwala na łatwiejsze jego modelowanie. Jednak metoda ta ma też swoje wady. Układ liniowy działa dobrze tylko w okolicach punktu względem, którego został zlinearyzowany.

Równania liniowe obiektu:

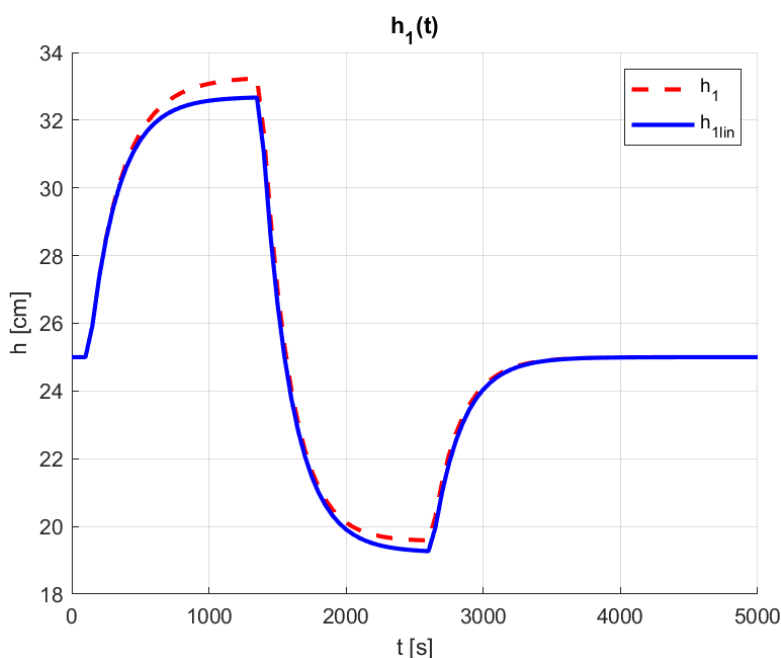
$$\frac{d(V_1 - V_{10})}{dt} = (F_1 - F_{10}) + (F_D - F_{D0}) - \left(\frac{\alpha_1}{2 \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot (h_1 - h_{10}) \right)$$

$$\frac{d(V_2 - V_{20})}{dt} = \left(\frac{\alpha_1}{2 \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot (h_1 - h_{10}) \right) - \left(\frac{\alpha_2}{2 \cdot \sqrt{h_{20}}} \cdot (h_2 - h_{20}) \right)$$

gdzie:

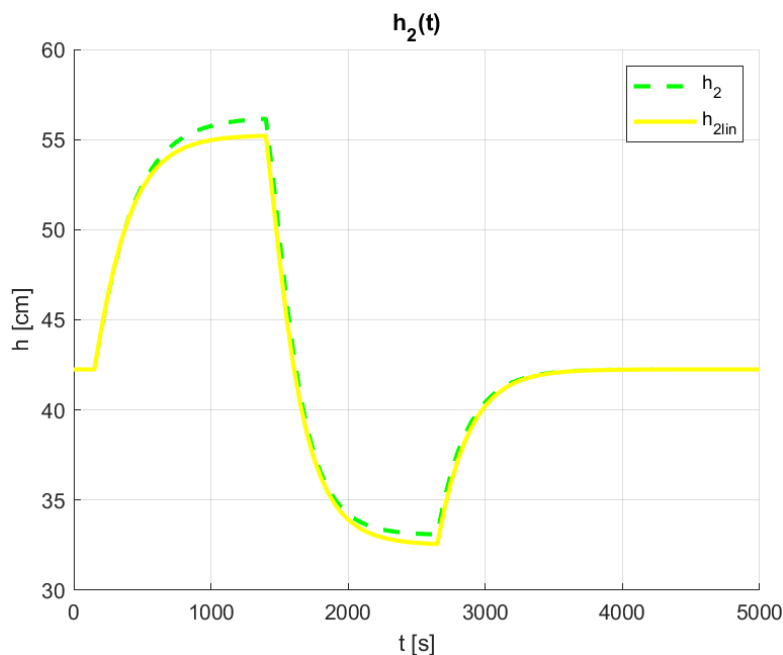
$h_{10}, h_{20}, F_{10}, F_{D0}, V_{10}, V_{20}$ – wartości z punktu pracy, wokół których dokonano linearyzacji.

Na obu poniższych wykresach (Rys.5 i Rys.6) linią ciągłą zaznaczony jest przebieg układu liniowego, natomiast linią przerywaną układu nieliniowego.



Rysunek 6. Model liniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym.

Wartości maksymalne uzyskane dla zbiornika pierwszego wynoszą 32,6 cm dla modelu liniowego oraz 33,2 cm dla modelu nieliniowego. Dla wartości minimalnej 19,2 cm dla modelu liniowego oraz 19,6 cm dla modelu nieliniowego. Natomiast od około 3400 sekund oba modele pokrywają się i stabilizują dla wartości 25 cm.



Rysunek 7. Model liniowy – poziom cieczy w zbiorniku drugim.

Wartości maksymalne uzyskane dla zbiornika drugiego wynoszą 55,2 cm dla modelu liniowego oraz 56,1 cm dla modelu nieliniowego. Dla wartości minimalnej 32,5 cm dla modelu liniowego oraz 33,1 cm dla modelu nieliniowego. Natomiast od około 3500 sekund oba modele pokrywają się i stabilizują dla wartości 42,2 cm.

W związku z podaną wcześniej wadą modeli liniowych, występuje rozbieżność między modelami liniowym oraz nieliniowym. Im bardziej oddalano się od punktu pracy można było zauważyć narastający błąd podejścia liniowego, natomiast odpowiednio blisko tego punktu, model liniowy bardzo dobrze odwzorowywał zachowanie obiektu.

Model taki bez większych problemów znajdzie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Wyjątkami mogą być na przykład: przemysł medyczny, chemiczny, kosmiczny, zbrojeniowy tudzież energetyka jądrowa, gdzie dokładność układu może mieć znaczenie bezkompromisowe.

6. Regulator DMC

Ostatnim etapem pierwszej części projektu była implementacja konwencjonalnego algorytmu regulacji predykcyjnej w wersji analitycznej, czyli regulatora DMC (Dynamic Matrix Control). Aby tego dokonać wykorzystano model liniowy, aby wyznaczyć transmitancję. W tym celu równanie zlinearyzowany zapisano w postaci:

$$\frac{d(\Delta V_1)}{dt} = \Delta F_1 + \Delta F_D - \left(\frac{\alpha_1}{2 \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot \Delta h_1 \right)$$

$$\frac{d(\Delta V_2)}{dt} = \left(\frac{\alpha_1}{2 \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot \Delta h_1 \right) - \left(\frac{\alpha_2}{2 \cdot \sqrt{h_{20}}} \cdot \Delta h_2 \right)$$

Zapisując dodatkowo $V_1 = A \cdot h_1$, $V_2 = C_2 \cdot h_2^2$ oraz pomijając symbol delty, otrzymano równania stanu w postaci:

$$\dot{x}_1 = \frac{F_1}{A} + \frac{F_D}{A} - \left(\frac{\alpha_1}{2 \cdot A \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot x_1 \right)$$

$$\dot{x}_2 = \left(\frac{\alpha_1}{4 \cdot C_2 \cdot h_{20} \cdot \sqrt{h_{10}}} \cdot x_1 \right) - \left(\frac{\alpha_2}{4 \cdot C_2 \cdot h_{20} \cdot \sqrt{h_{20}}} \cdot x_2 \right)$$

$$y = x_2$$

Wobec tego macierze stanu przyjmują postać:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{2 \cdot A \cdot \sqrt{h_{10}}} & 0 \\ \frac{\alpha_1}{4 \cdot C_2 \cdot h_{20} \cdot \sqrt{h_{10}}} & \frac{\alpha_2}{4 \cdot C_2 \cdot h_{20} \cdot \sqrt{h_{20}}} \end{bmatrix}$$

$$B = [1 \quad 0]$$

$$C = [0 \quad 1]$$

Transmitancja obiektu:

$$G(s) = C \cdot (sI - A)^{(-1)} \cdot B$$

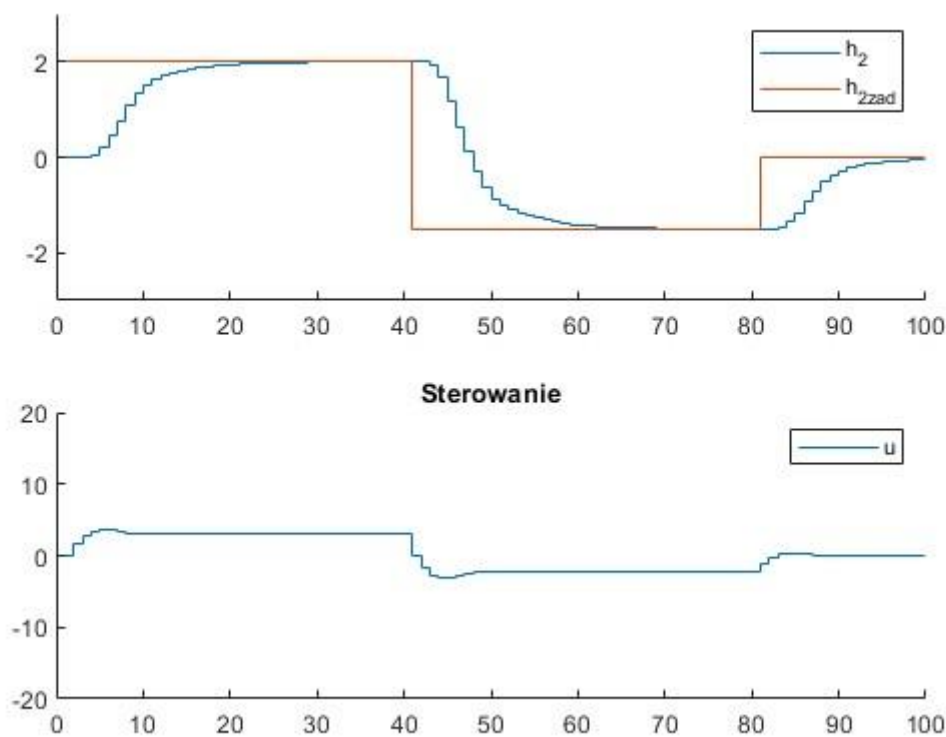
Korzystając z metody Tustina otrzymano transmitancję dyskretną oraz równanie wyjścia obiektu z uwzględnieniem opóźnienia $\tau = 100s$:

$$y(i) = 1.088 \cdot y(i-1) - 0.2375 \cdot y(i-2) + 0.02435 \cdot u(i - \tau/Tp) + 0.04871 \cdot u(i-1 - \tau/Tp) + 0.02435 \cdot u(i-2 - \tau/Tp)$$

Wykorzystując rzędne odpowiedzi skokowej na wymuszenie jednostkowe skonstruowano macierze M , M_p oraz K niezbędne w algorytmie DMC.

Opisane wyżej działania zostały zaimplementowane w skryptach : **DMC.m** i **step_response.m**

Celem tego zabiegu była poprawa działania układu pod względem szybkości, ale także i samej jakości regulacji. Przebieg zmienności wysokości cieczy w drugim zbiorniku zaprezentowano na rys. 8.



Rysunek 8. Regulacja modelu regulatorem DMC.

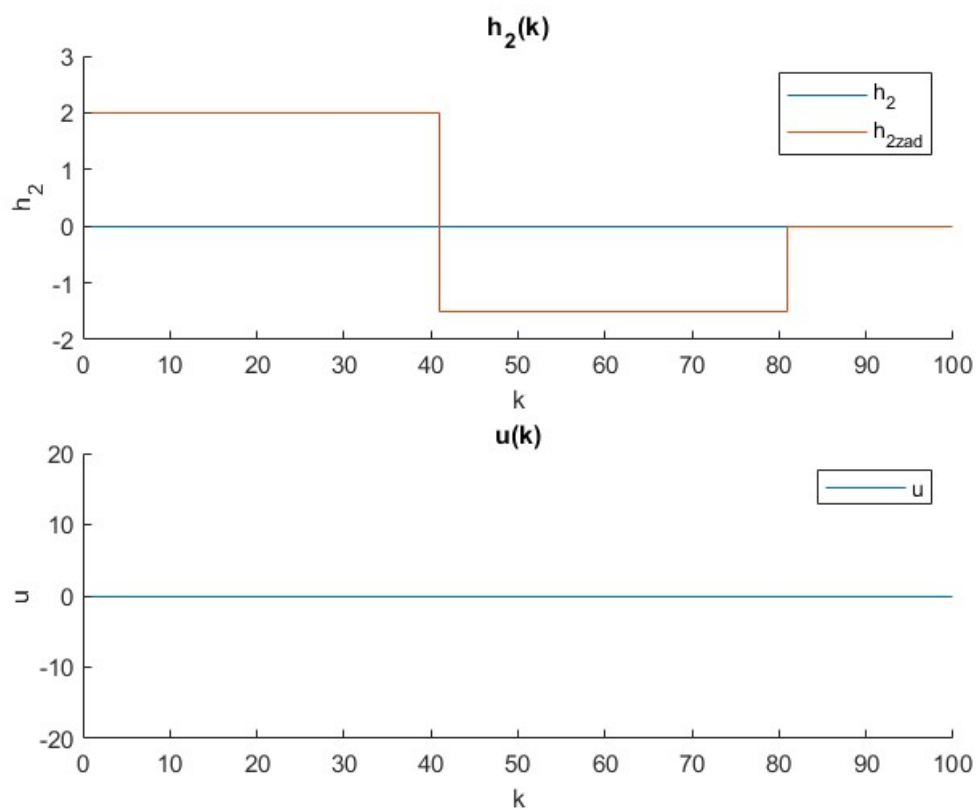
Na podstawie powyższych wykresów można wywnioskować, że regulator działa w sposób prawidłowy. System w sposób łagodny reaguje na zmiany wartości zadanej h_2 . Nie występują przeregulowania ani żadne oscylacje w układzie. Jednocześnie sygnał sterowania nie przyjmuje bardzo dużych wartości. Wadą tego rozwiązania jest natomiast stosunkowo wolne osiągnięcie wartości zadanej.

Dokonano symulacji obiektu wykorzystując inne parametry algorytmu DMC, tj.:

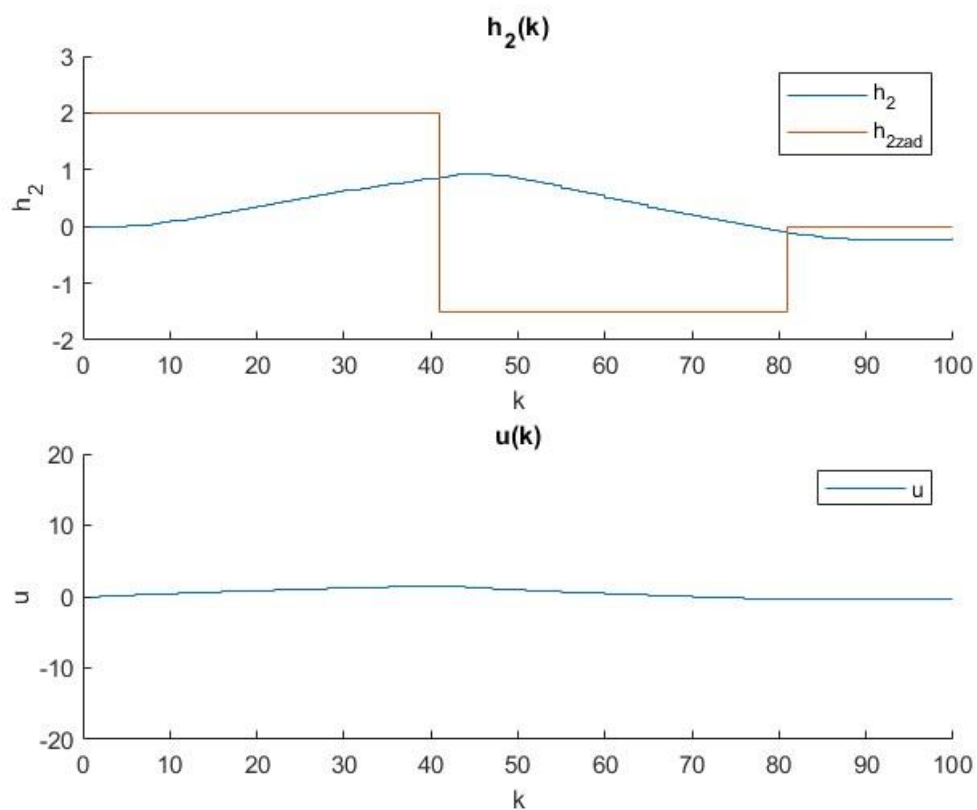
- horyzont predykcji N
- horyzont dynamiki D
- horyzont sterowania N_u
- parametr „kary” za zmienność sterowania λ

Symulacje przeprowadzano w następujący sposób – na raz był zmieniany jeden parametr. Jakość regulacji była oceniana na podstawie błędu średniego kwadratowego:

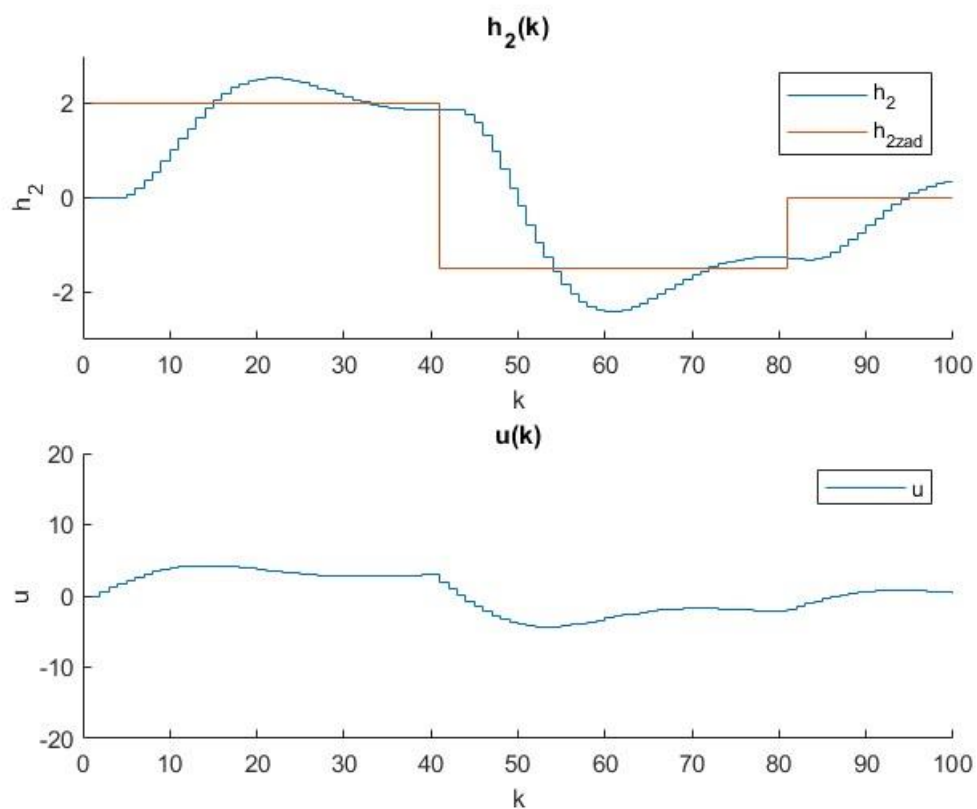
$$E = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (y_{zad} - y(i))^2$$



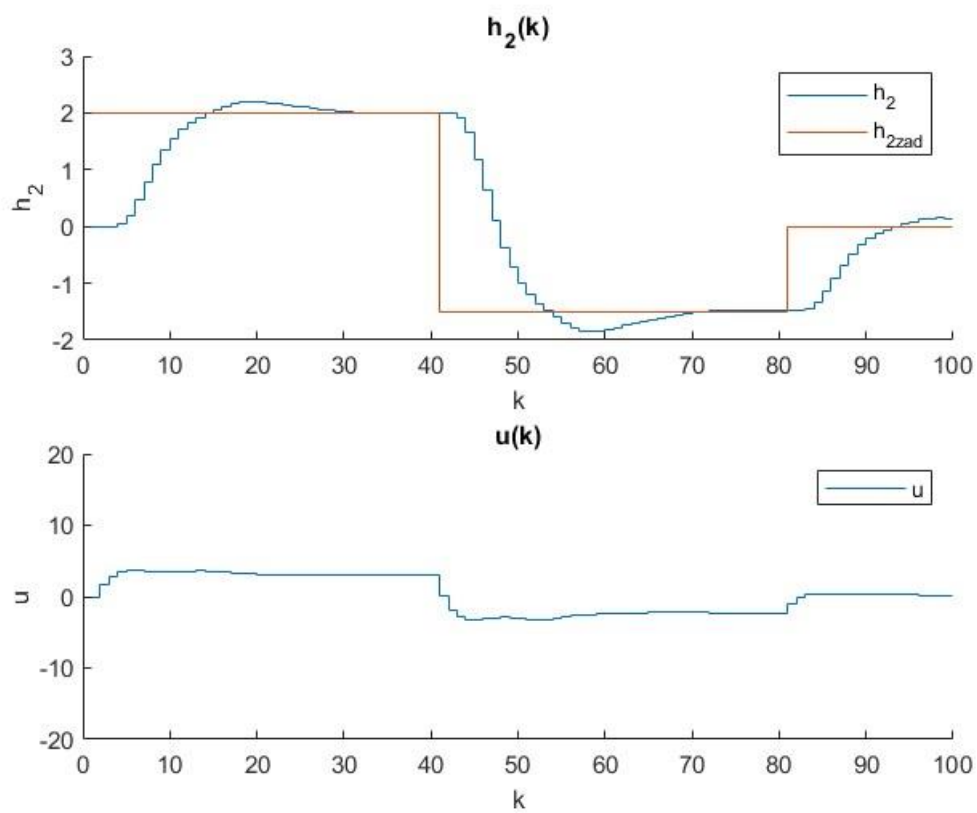
Rysunek 9. Regulator DMC, $N = 2$.



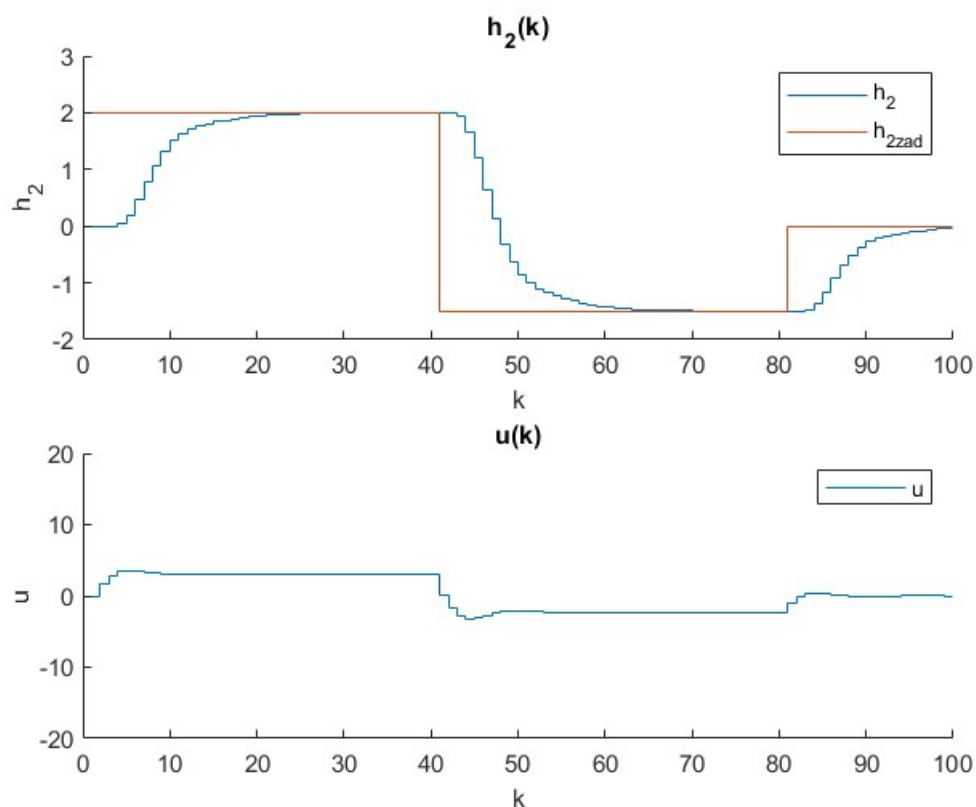
Rysunek 10. Regulator DMC, $N = 3$.



Rysunek 11. Regulator DMC, $N = 5$.

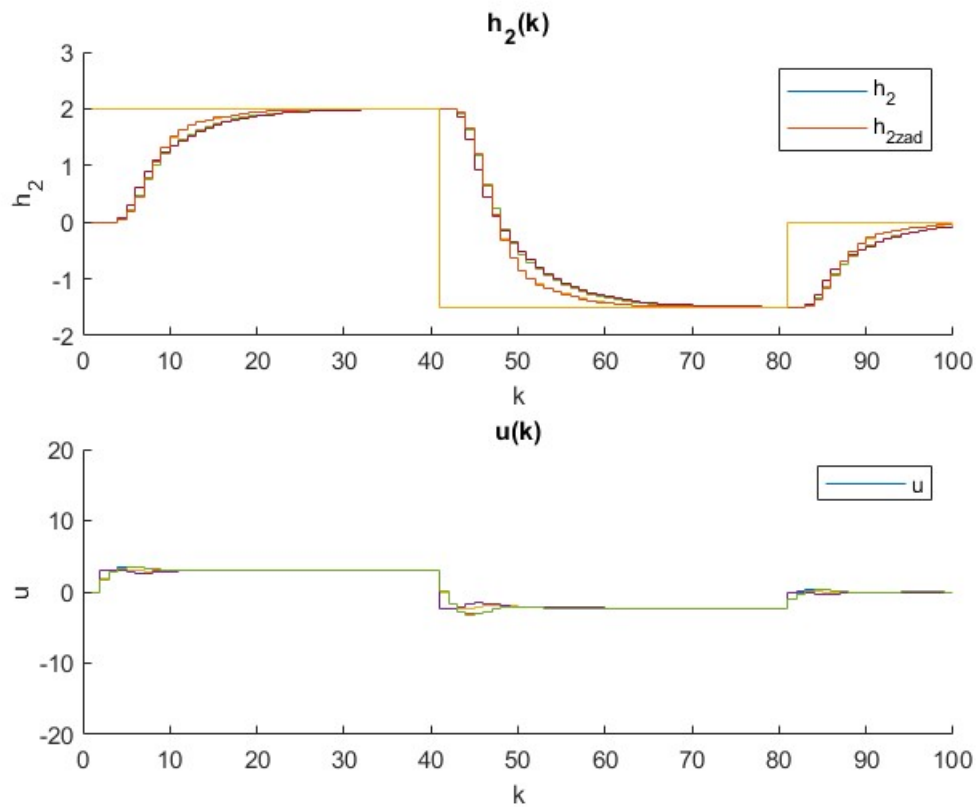


Rysunek 12. Regulator DMC, $N = 10$.

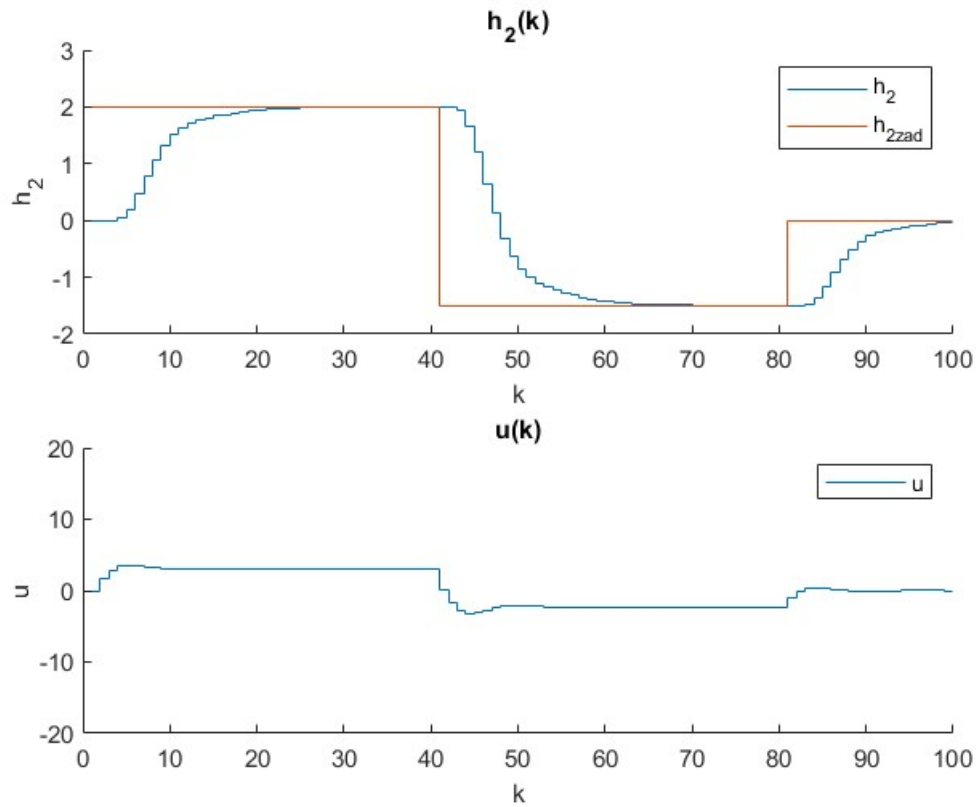


Rysunek 13. Regulator DMC, $N = 100$.

Ustawienie horyzontu predykcji na wartość zbyt mała powoduje, że regulacja jest mało jakościowa – występują przeregulowania, a dążenie do wartości zadanej jest bardzo długie. Stopniowe zwiększani parametru N powoduje poprawę regulacji, aż osiągnie się wartość optymalną, dla której zwiększanie horyzontu predykcji nie przynosi większych korzyści.

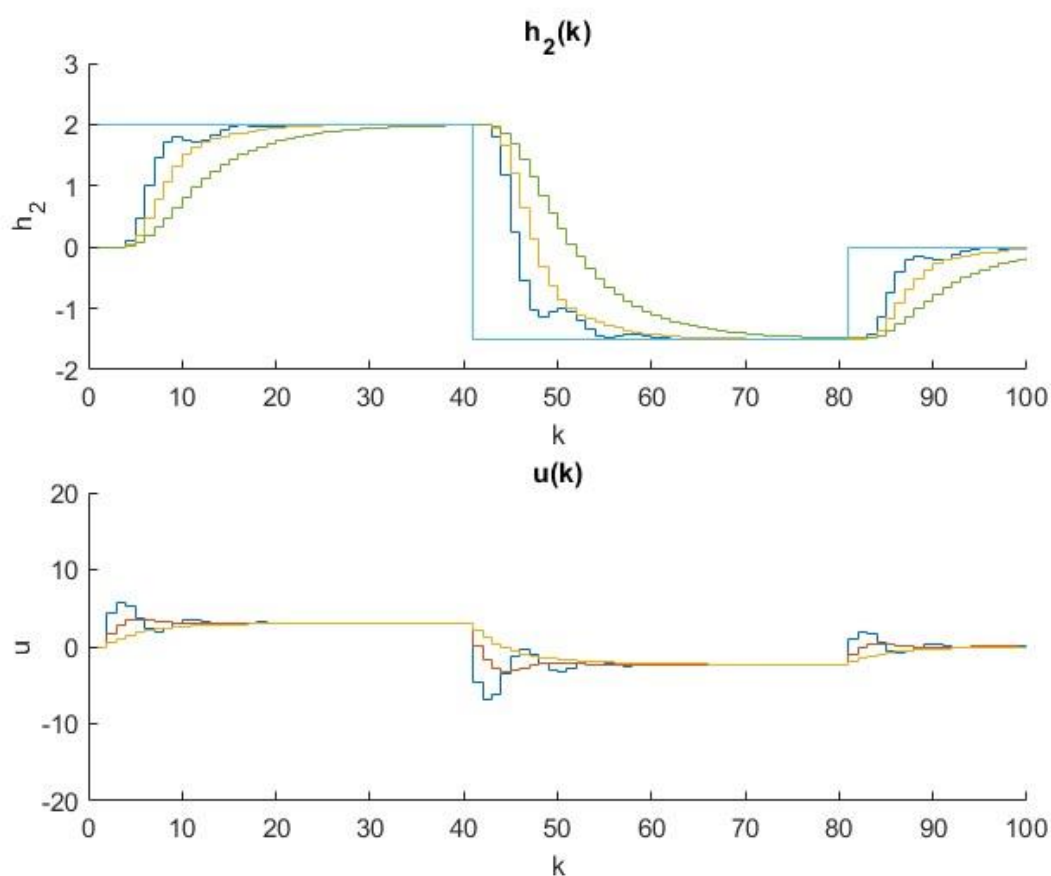


Rysunek 14. Regulator DMC, $N = 100$, $Nu = \{1, 2, 5, 10, N/2\}$.



Rysunek 15. Regulator DMC, $N = 100$, $Nu = 5$.

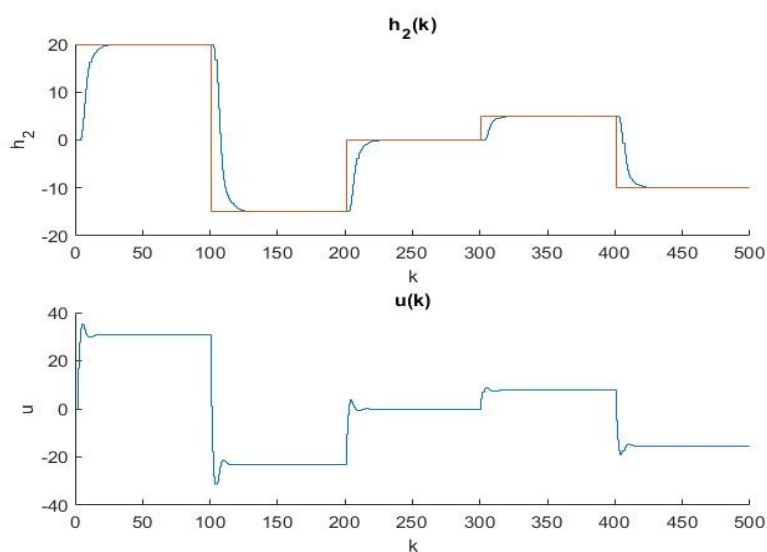
Jak widać na zaprezentowanych wykresach horyzont sterowania nie ma aż tak istotnego wpływu na jakość regulacji, natomiast wpływa na liczbę niewiadomych, dlatego dobrano wartość najmniejszą, dla której wskaźnik jakości był najmniejszy, tj. $N_u = 5$.



16. Regulator DMC, $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda_1 = 0.1$, $\lambda_2 = 1$, $\lambda_3 = 10$.

Zauważono, że im wartość parametru λ jest większa, tym wolniejsze są otrzymane przebiegi. Z drugiej strony, im mniejsza jest wartość parametru „kary”, tym gwałtowniejsze są zmiany sygnału sterującego oraz tym większe wartości osiąga sygnał sterujący. Spośród zaprezentowanych wartości parametru λ wybrano $\lambda_2 = 1$, dla którego regulator jest dość szybki, a zmiany sterowania nie są względnie duże.

Dla tak dobranych parametrów sprawdzono, jak zachowuje się układ na zmiany sterowania w szerokim zakresie. Poniżej zobrazowano rezultaty:

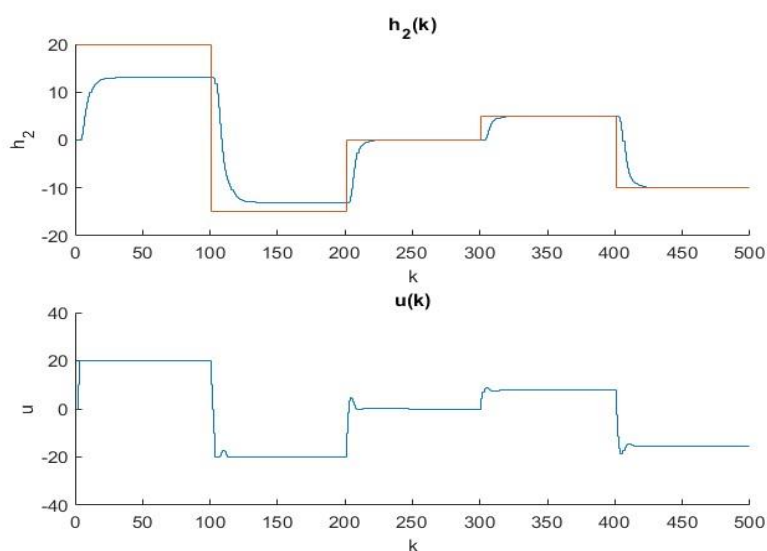


Rysunek 17. Testowanie zachowania obiektu w szerokim zakresie zmienności sterowania.

Ponadto postanowiono nałożyć pewne ograniczenia na układ. Ograniczenia te mają postać:

$$\begin{aligned} -u_{max} &\leq u \leq u_{max} \\ -\Delta u_{max} &\leq \Delta u \leq \Delta u_{max} \\ -y_{max} &\leq y \leq y_{max} \end{aligned}$$

Tak zdefiniowane ograniczenia spowodowały następujące zachowanie obiektu:

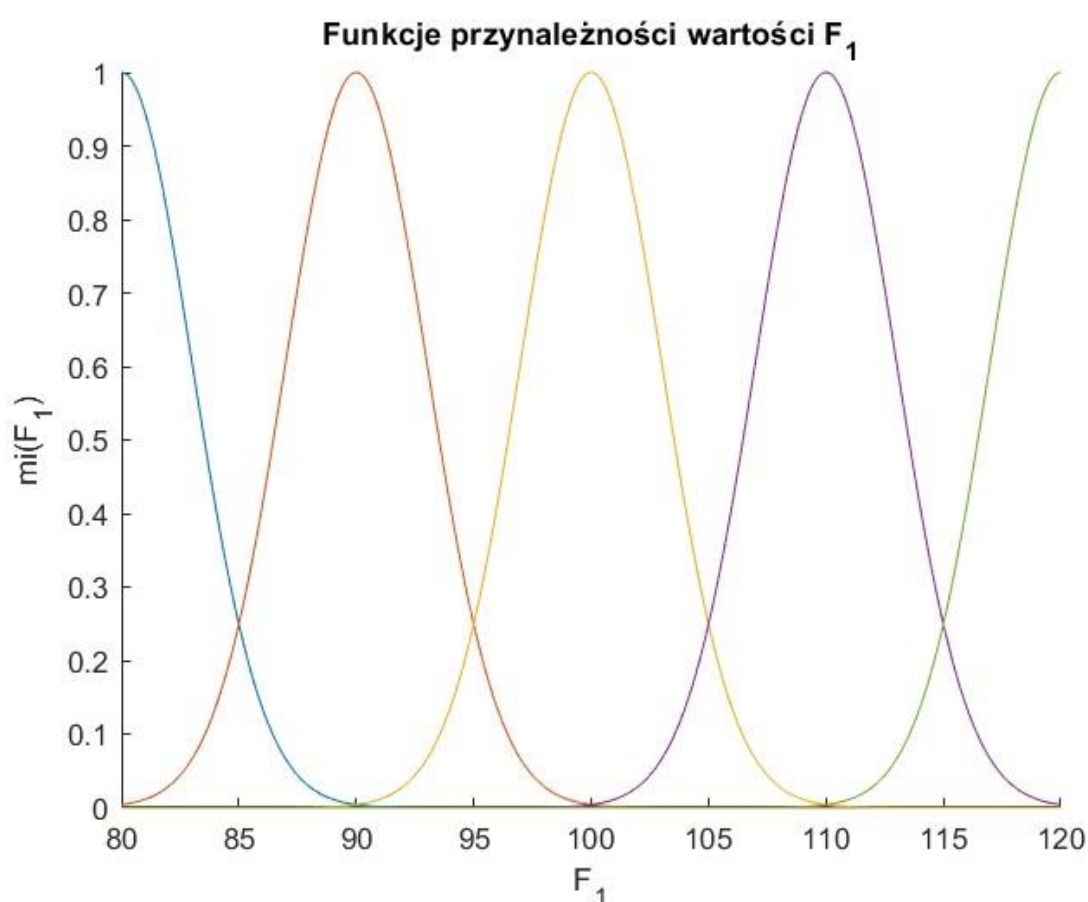


Rysunek 18. Testowanie zachowania obiektu w szerokim zakresie zmienności sterowania z nałożonymi ograniczeniami.

Rys. 18 przedstawia nałożone ograniczenia na układ nie pozwalają osiągnąć największych wartości zadanych. Takim ograniczeniem w rzeczywistym obiekcie mogłaby być wysokość zbiornika lub wydajność pompy.

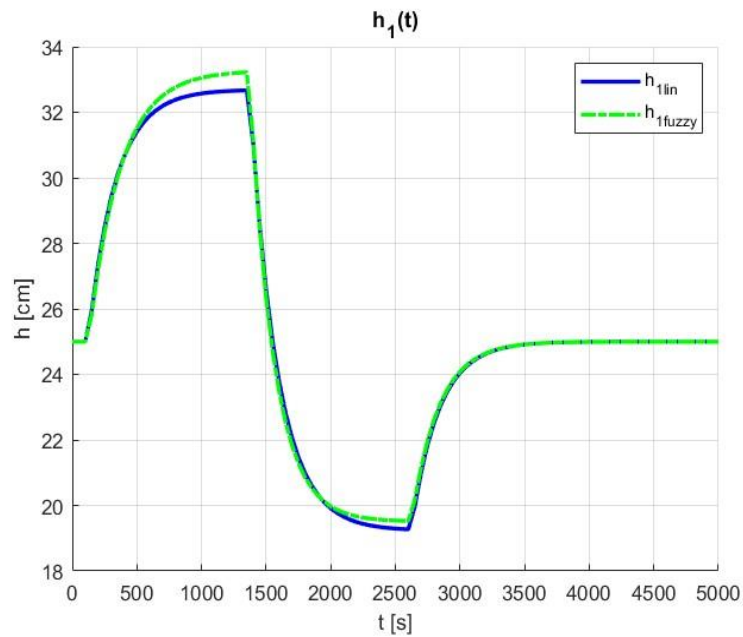
7. Modele rozmyte Takagi – Sugeno

Celem drugiego zadania było stworzenie regulatora rozmytego Takagi–Sugeno obiektu. Układ taki swoje działanie bazuje na modelu liniowym, którego realizację można było zaobserwować we wcześniejszych badaniach. Trudno było także nie zauważyć jego istotnej wady – model liniowy działa dobrze w okolicy punktu pracy. Problem ten w dużym stopniu rozwiązuje regulator bazujący na modelach Takagi – Sugeno. Składa się on z wielu regulatorów opartych na modelach liniowych zdefiniowanych dla zadanych, różnych punktów pracy. Następnie, zależnie od stanu układu następuje przełączanie między odpowiednimi regulatorami zgodnie z obliczonym poziomami aktywacji reguł. Poniżej przedstawiono zestawienie modelu liniowego z liniowym modelem rozmytym obiektu. Prezentowane rezultaty uzyskano stosując funkcje przynależności dopływu sterującego F_1 zilustrowane na rys.17.

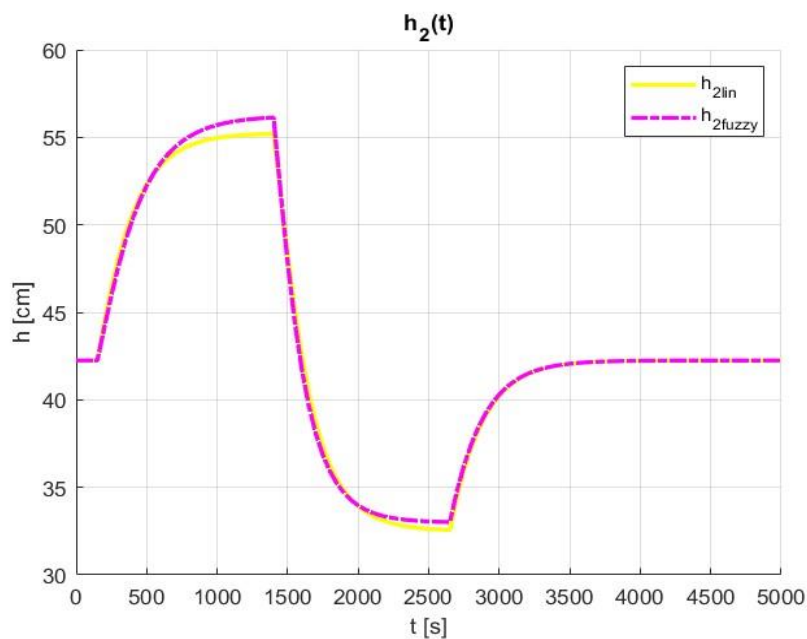


Rysunek 19. Funkcje przynależności dopływu sterującego F_1 .

Dokonano rozmywania zmiennej F_1 , ponieważ wybór ten skutkował łatwiejszą implementacją algorytmu DMC. Taka decyzja została podyktowana praktycznym podejściem inżynierskim. Trudniejszy i bardziej skomplikowany model może być dokładniejszy w działaniu, jednak potencjalnie będzie zawierać więcej, bardziej skomplikowanych błędów, które mogą być trudne do zdiagnozowania oraz naprawy. Jednocześnie wzięty pod uwagę został kolejny aspekt praktyczny, uniwersalność. Jeżeli program można przy niewielkich zmianach dopasować do dwóch modeli, to zawsze będzie to rozsądniejsza decyzja aniżeli budowanie dwóch oddzielnych programów.

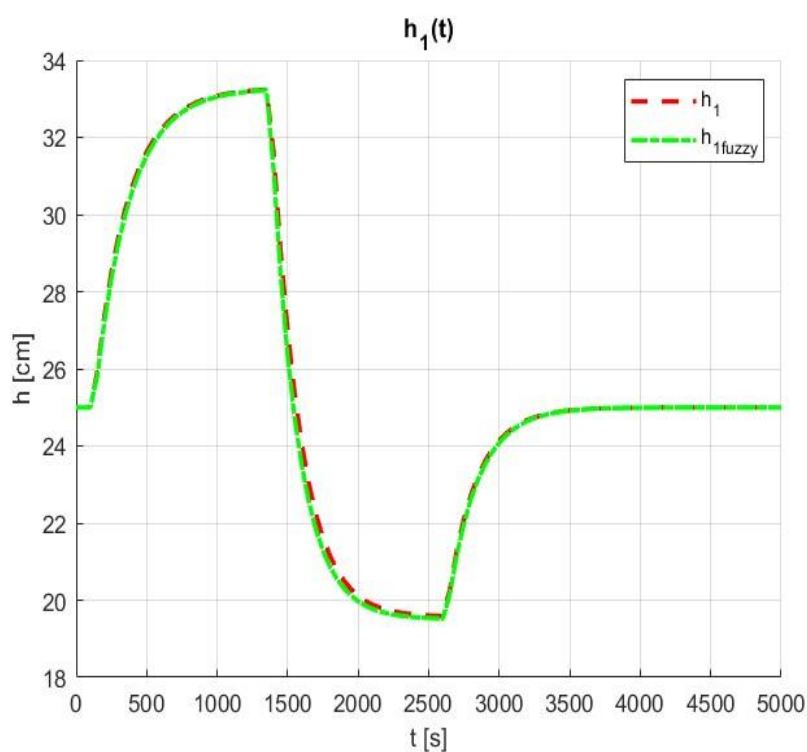


Rysunek 20. Model rozmyty - poziom cieczy w pierwszym zbiorniku.

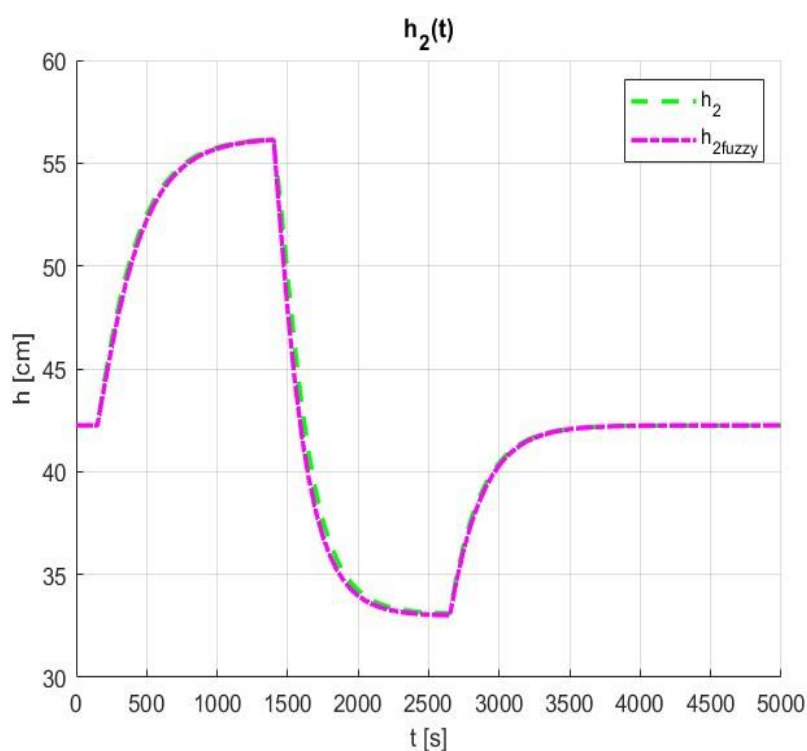


Rysunek 21. Model rozmyty - poziom cieczy w drugim zbiorniku.

Jak można zauważyć liniowy model rozmyty – złożony z pięciu modeli lokalnych – bardzo dobrze symuluje zachowanie obiektu nawet daleko od punktu pracy. Dokonano porównania modelu rozmytego z modelem nieliniowym. Rezultaty porównania można zaobserwować na rys. 19 oraz rys. 20.



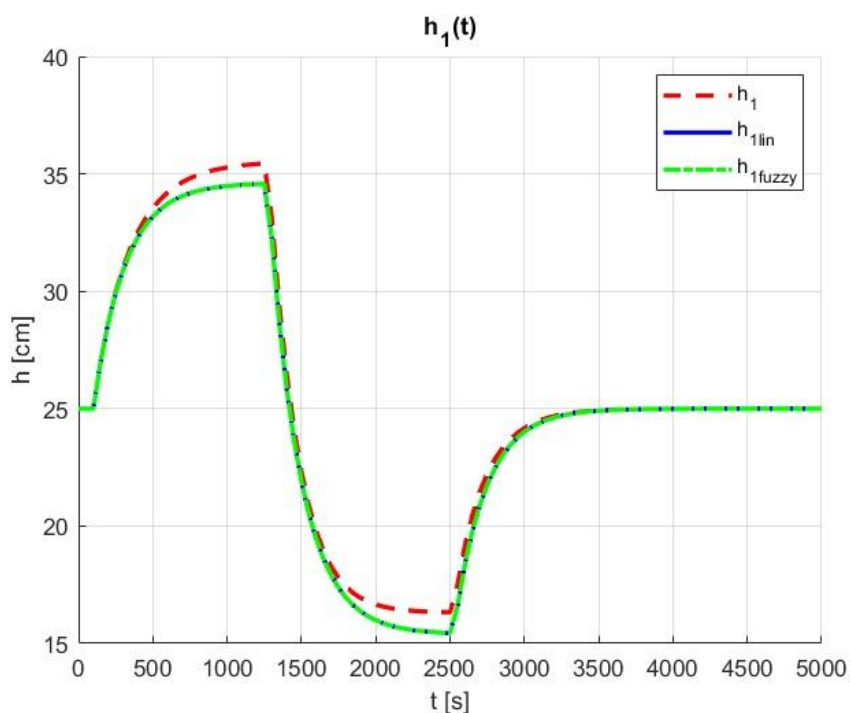
Rysunek 22. Model rozmyty - poziom cieczy w pierwszym zbiorniku.



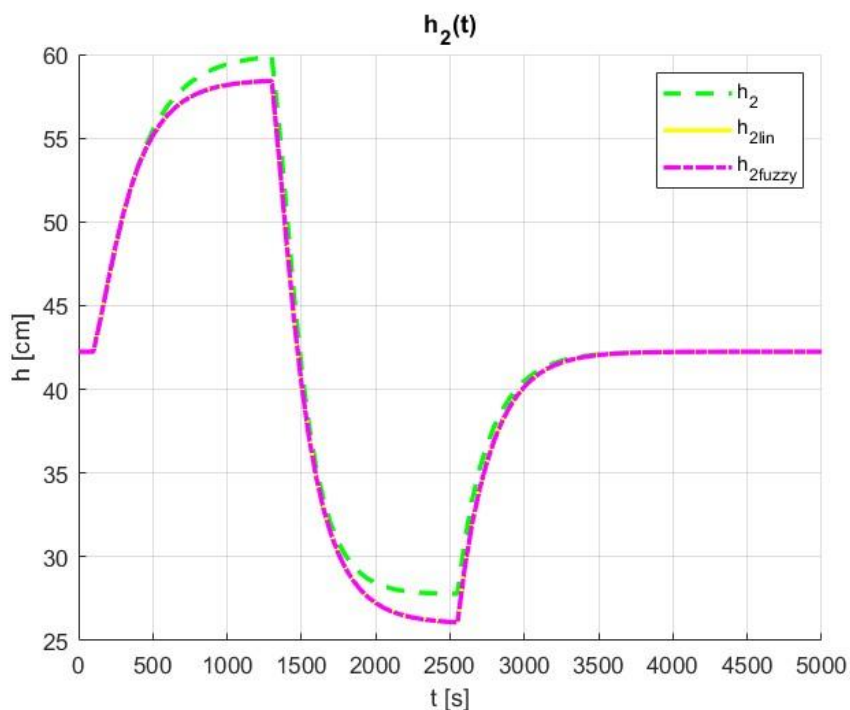
Rysunek 23. Model rozmyty - poziom cieczy w drugim zbiorniku.

Przedstawione wykresy bardzo dobrze ilustrują dokładność rozmytych modeli Takagi – Sugeno. Krzywe przedstawiające wysokość cieczy w zbiornikach dla modelu nieliniowego i rozmytego praktycznie się pokrywają, co wskazuje na dużą dokładność takiego podejścia.

Powyższe wykresy przedstawiały przebiegi wysokości słupów cieczy w zbiornikach jako odpowiedź na zmianę dopływu sterującego F_1 . Przetestowano zachowanie układu na zmiany wartości dopływu zakłócającego F_D .



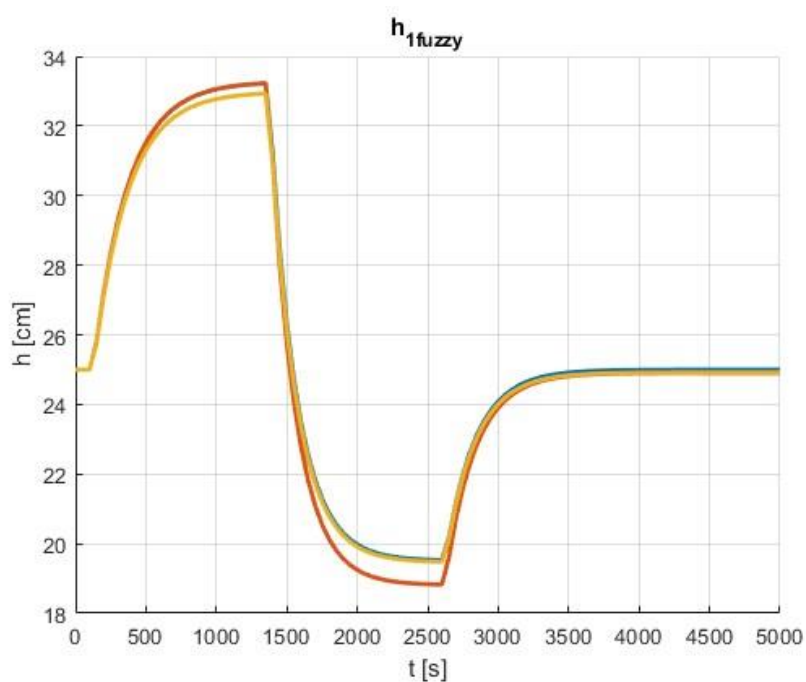
Rysunek 24. Odpowiedzi układu na zmiany wartości zakłócenia – zbiornik pierwszy.



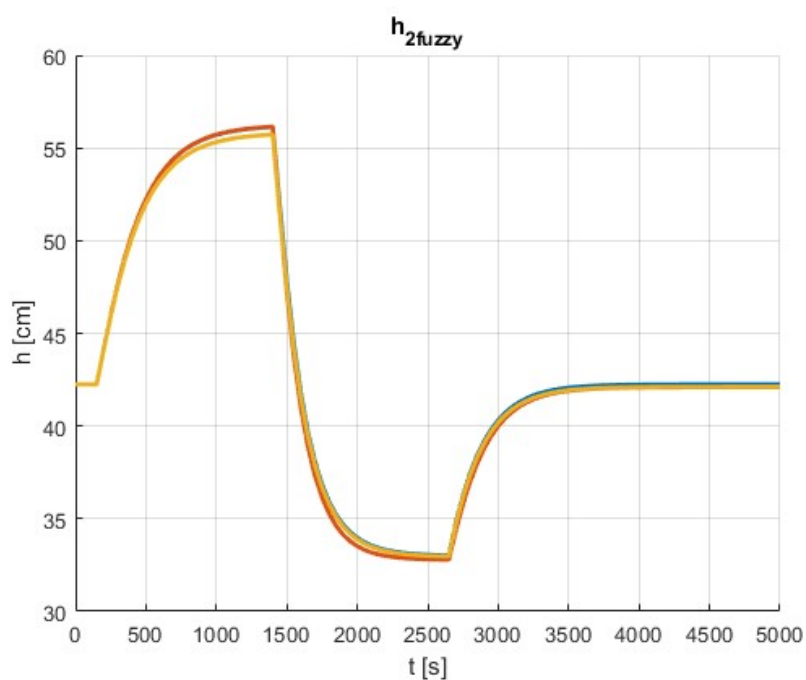
Rysunek 25. Odpowiedzi układu na zmiany wartości zakłócenia – zbiornik drugi.

Obserwacje – odpowiedzi nieliniowego i rozmytego układu liniowego nakładają się na siebie w przypadku zmian dopływu zakłócającego, bez ingerencji w wartość sygnału sterującego.

Dokonano porównania różnych modeli rozmytych złożony z 2, 3, 4 i 5 modeli lokalnych.



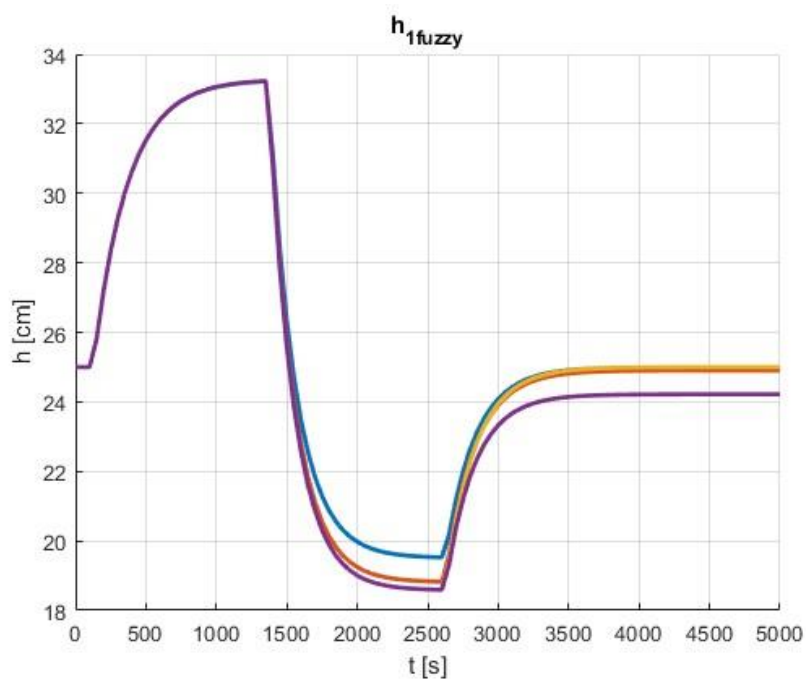
Rysunek 21. Porównanie modeli rozmytych – zbiornik pierwszy.



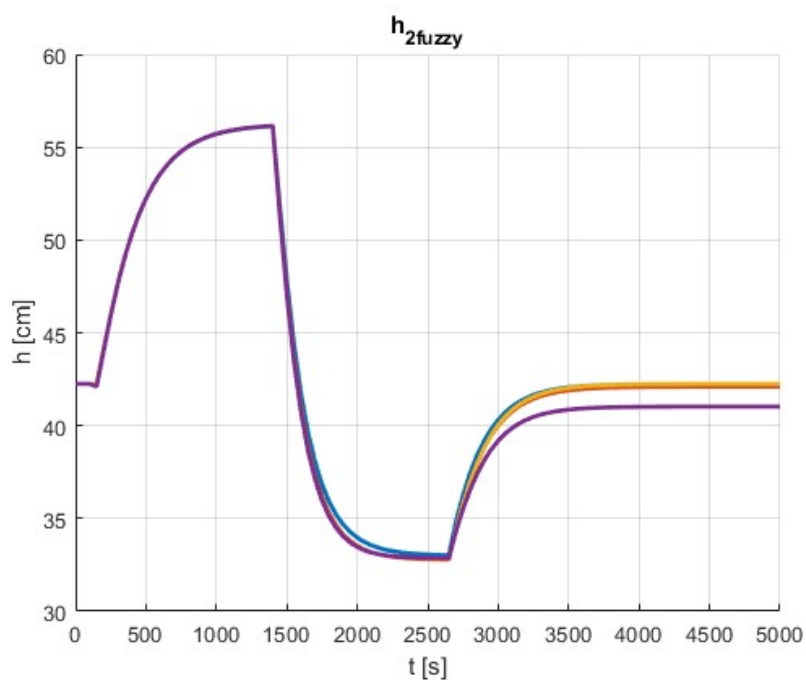
Rysunek 22. Porównanie modeli rozmytych – zbiornik drugi.

Niebieski – 5 zbiory rozmyte
Pomarańczowy – 4 zbiory rozmyte
Żółty – 3 zbiory rozmyte

Zwiększając szerokość funkcji przynależności można zmienić zachowanie wysokości słupa cieczy w zbiorniku pierwszy, jednak ze względu na to, że zbiornik ten nie jest docelowym obiektem regulacji to poprawy tego aspektu działania układu są bezcelowe.



Rysunek 23. Porównanie modeli rozmytych – zbiornik pierwszy.



Rysunek 24. Porównanie modeli rozmytych – zbiornik drugi.

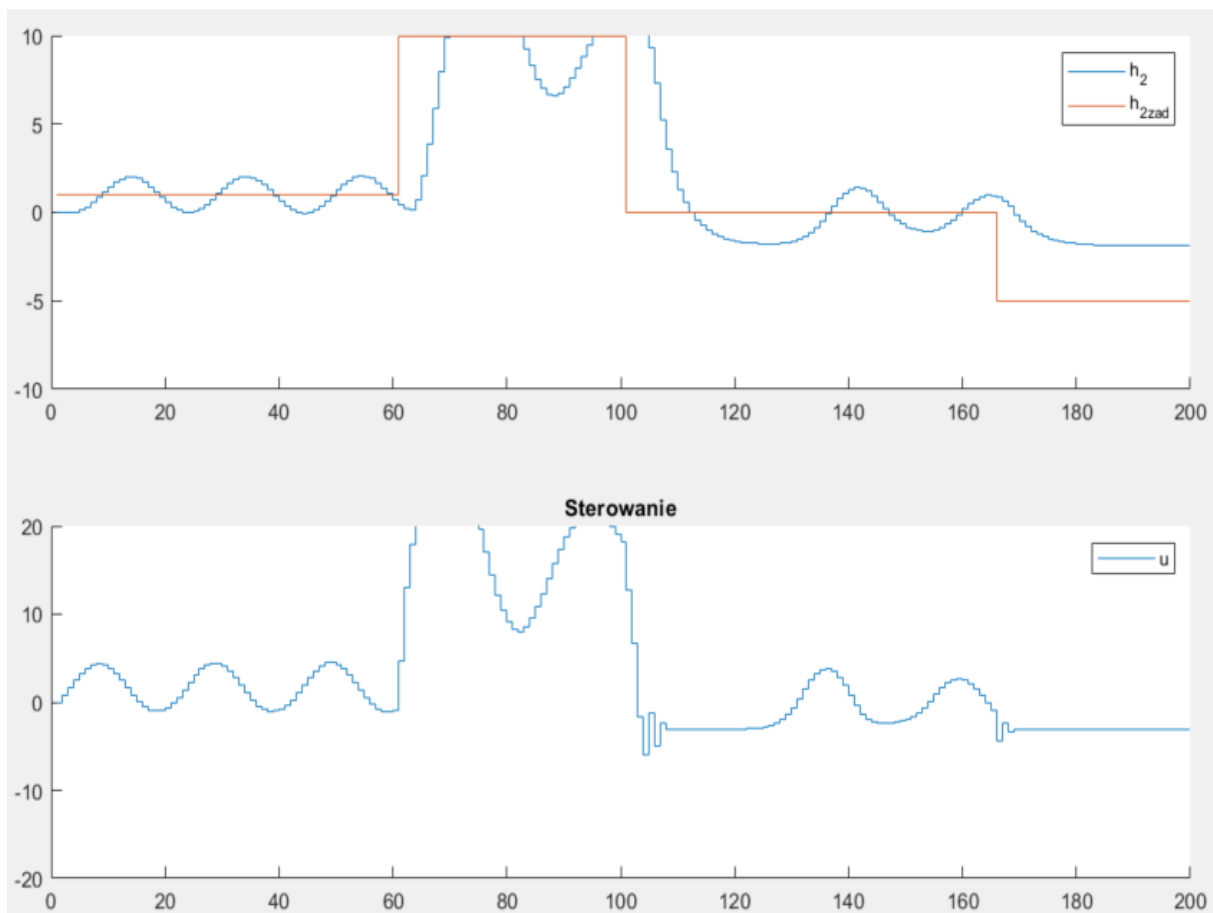
Niebieski – 5 zbiorów rozmytych
 Pomarańczowy – 4 zbiory rozmyte
 Żółty – 3 zbiory rozmyte
 Fioletowy – 2 zbiory rozmyte

Zmniejszając liczbę zbiorów rozmytych można dostrzec, że regulator coraz gorzej radzi sobie z osiągnięciem wartości pośredniej tj. słupa cieczy o wysokości 42 cm. Spowodowane jest to tym, że zakres działania poszczególnego zbioru rozmytego zwiększa się, a co za tym idzie

zwiększa się też zakres działania modelu rozmytego, który gorzej aproksymuje przebieg zmian wysokości słupa cieczy w zbiorniku.

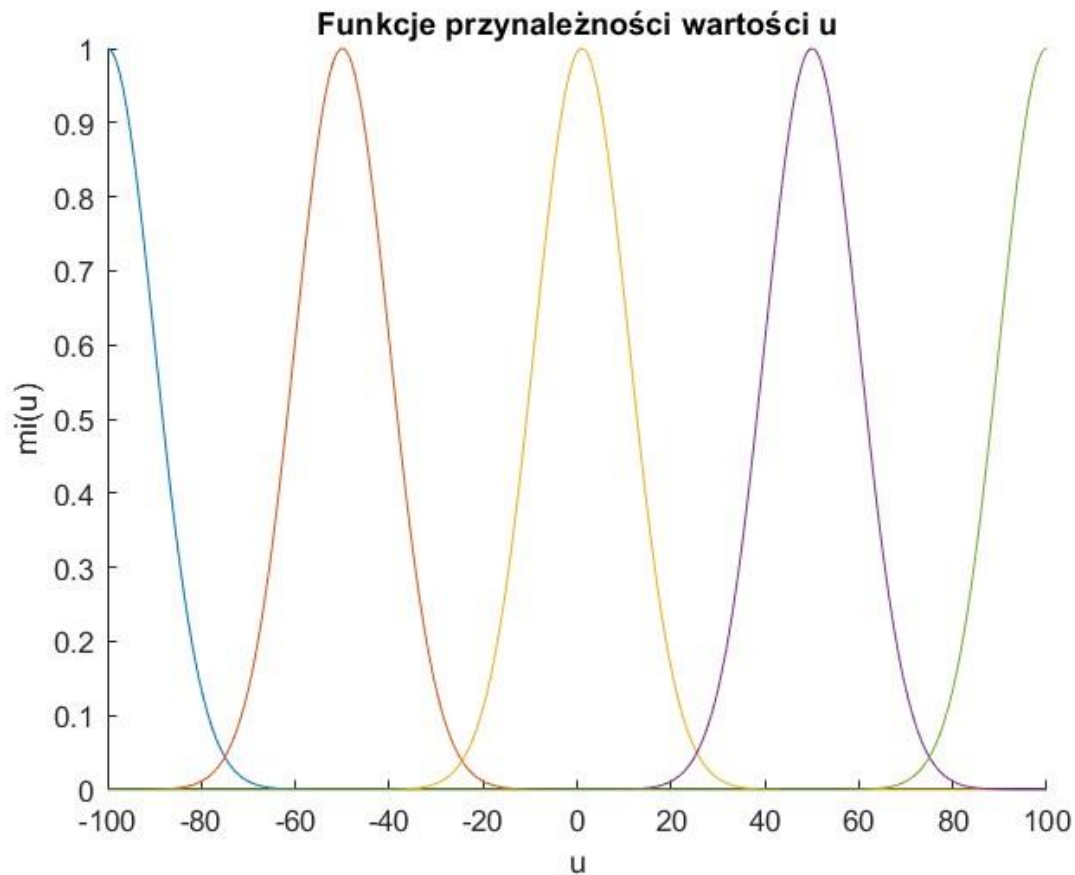
8. Rozmyty regulator DMC

Podczas dobierania parametrów regulatora zdecydowano się na wybór funkcji przynależności w kształcie funkcji Gaussa. Pierwsze próby z układem były przeprowadzane dla funkcji trapezowej, natomiast wyniki otrzymanego sterowania były niezadowalające (rys. 16). Układ działał zdecydowanie szybciej niż dla tradycyjnego regulatora DMC, ale wpadał w słabe, jednak niegasnące oscylacje, a dla wybranych wartości zadanych parametru h_2 nie osiągał on wartości zadanej. Przyczyną tego mogą być źle dobrane nastawy, ale także to, że funkcja przynależności w postaci trapezu nie jest przystosowana do współpracy z modelem budowanym w projekcie.



Rysunek 26. Działanie układu dla trapezowej funkcji przynależności.

Wykres przedstawiający zbiory rozmyte – w postaci funkcji Gaussa – sterowania u , zaprezentowano na rys. 25.

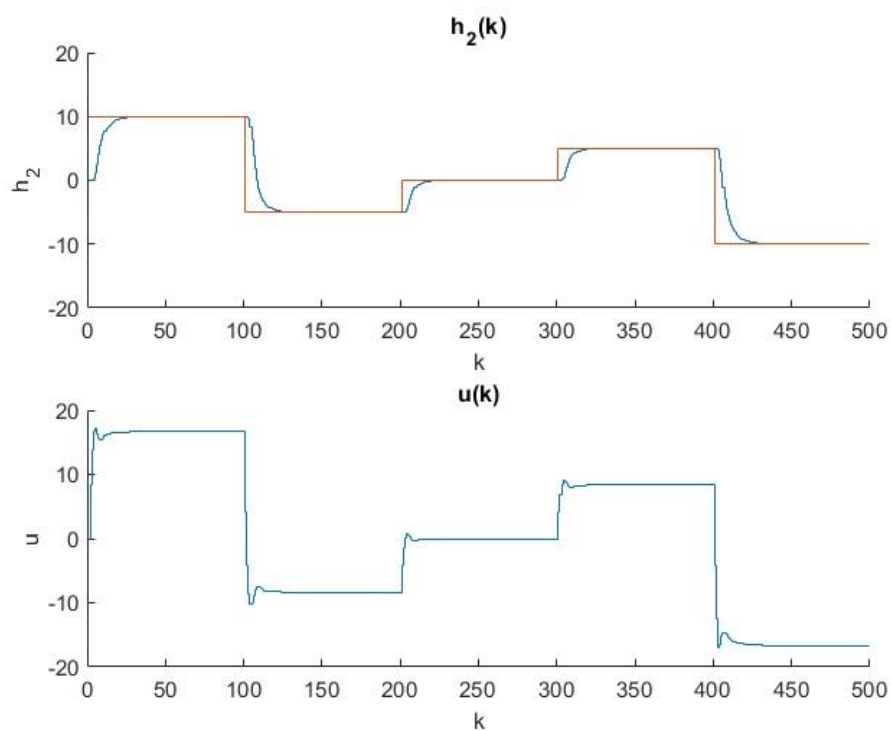


Rysunek 27. Funkcje przynależności sterowania u .

Dla zaprezentowanych funkcji przynależności przeprowadzono szereg testów. Parametry regulatora DMC zostały na tym samym poziomie. tj.:

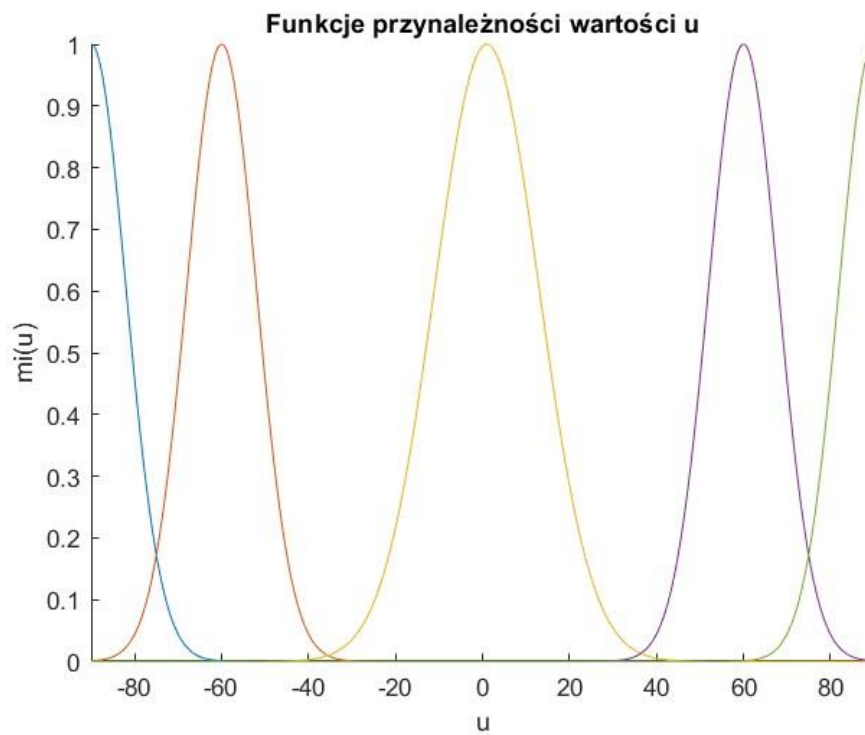
- $N = 100$
- $N_u = 5$
- $\lambda = 1$

Rezultaty zilustrowano na rys. 26. Z poniższych wykresów można wysnuć wniosek, że regulator działa w sposób prawidłowy. System łagodnie reaguje na zmiany wartości zadanej h_2 . Nie występują przeregulowania ani oscylacje. Ponadto sygnał sterowania nie przyjmuje bardzo dużych wartości. Wadą tego rozwiązania jest natomiast stosunkowo wolne osiągnięcie wartości zadanej.

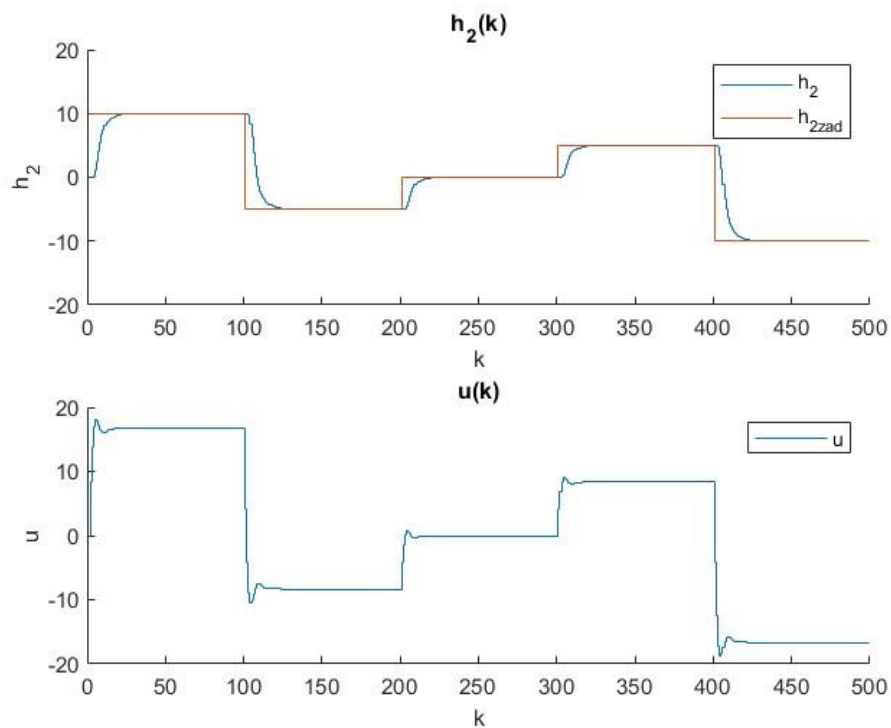


Rysunek 28. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC bez ograniczeń.

Tak rozmyty model poddano testom, aby dostroić funkcje przynależności. Poniżej zamieszczono efekty testów.

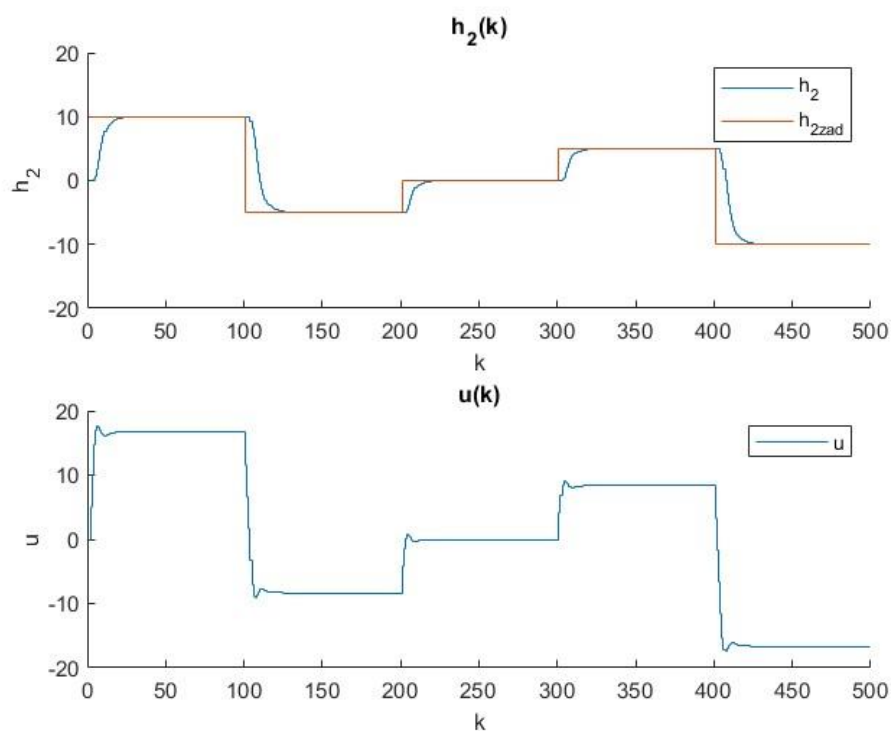


Rysunek 29. Dostrojone funkcje przynależności.



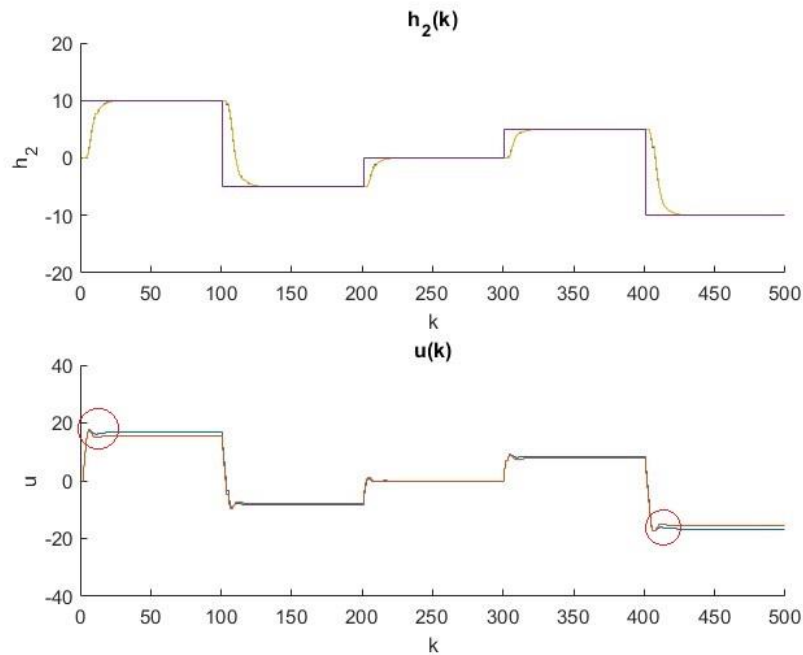
Rysunek 30. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC po dostrojeniu, bez ograniczeń .

Na model nałożono odpowiednie ograniczenia. Na rys. 29 zilustrowano rezultaty.



Rysunek 31. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC po dostrojeniu, z ograniczeniami .

Obiekt zachowuje się zgodnie z przewidywaniami. Wartość poziomu cieczy w drugim zbiorniku wiernie dąży do wartości zadanej. Sygnał sterujący szybko reaguje na zmiany. Niemniej jednak, pomimo tego, że przebieg wartości h_2 jest względnie dobry, to nie jest to wynik zadowalający. Biorąc pod uwagę fakt, że zastosowano inny, bardziej zaawansowany regulator, należałoby się spodziewać lepszych wyników. W tym wypadku, ze względu na to, że przeregulowanie nie występuje, to poprawa opierałaby się na szybszym osiągnięciu wartości docelowej niż kiedy użyto klasycznego regulatora DMC. Na rys. 30 porównano przebiegi wielkości regulowanej dla obu regulatorów.



Rysunek 32. Zestawienie regulatora DMC oraz rozmytego DMC.

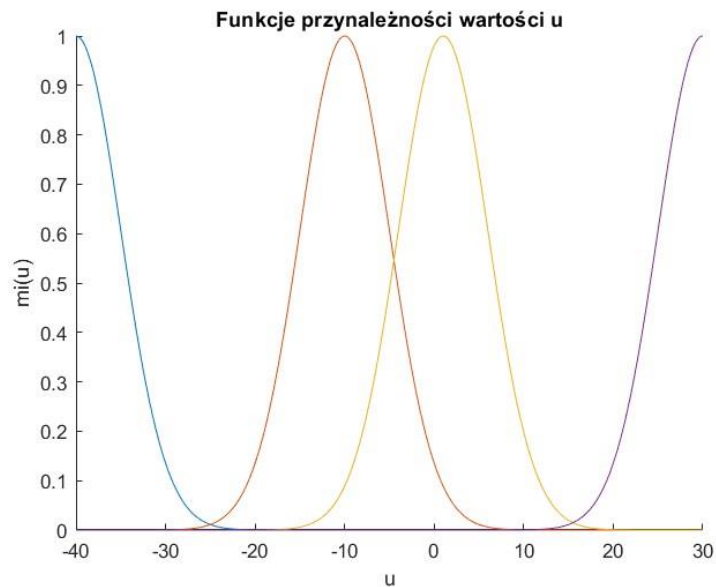
Jak widać, przebiegi wartości regulowanej niemal się na siebie nakładają. Wartość wskaźnika jakości regulacji dla konwencjonalnego regulatora DMC i rozmytego regulatora DMC, wynoszą odpowiednio:

$$J_{DMC} = 5.3742e + 05$$

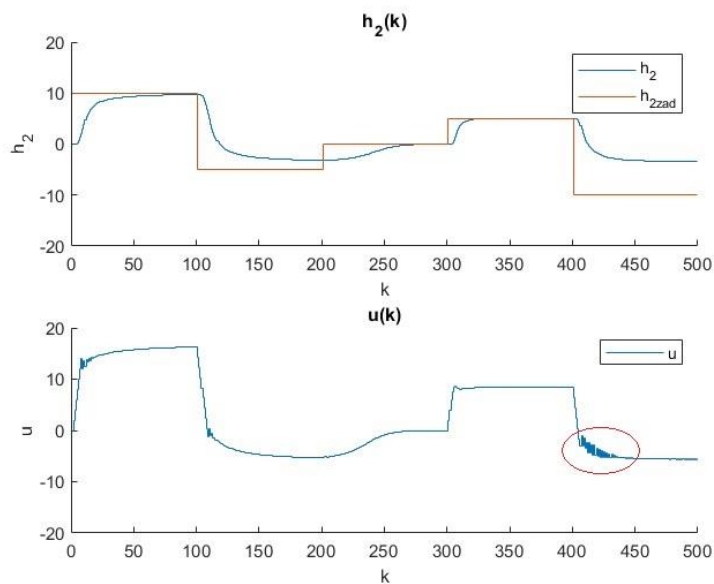
$$J_{DMCfuzzy} = 5.2886e + 05$$

Jednak jak zostało zaznaczone na wykresie, większe różnice można dostrzec dla sygnału sterującego. W podejściu rozmytym zauważalne są mniejsze przeregulowania oraz krótszy czas ustalania. W tym kontekście regulację nazwać można bardziej jakościową niż w klasycznym podejściu.

Podobnie jak poprzednio model poddano kilku testom, tym razem polegających na zmiennej liczbie zbiorów rozmytych. Na rysunkach 27, 28, 29 przedstawiono regulację w obiekcie dla odpowiednio 4, 3, 2 modeli lokalnych.

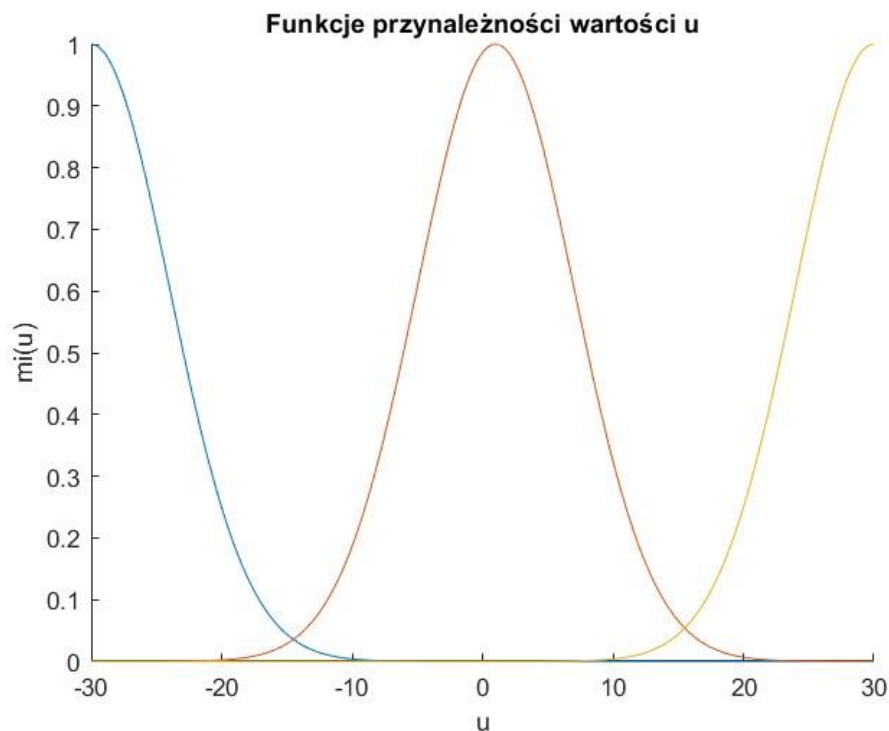


Rysunek 33. Cztery zbiory rozmyte sterowania u .

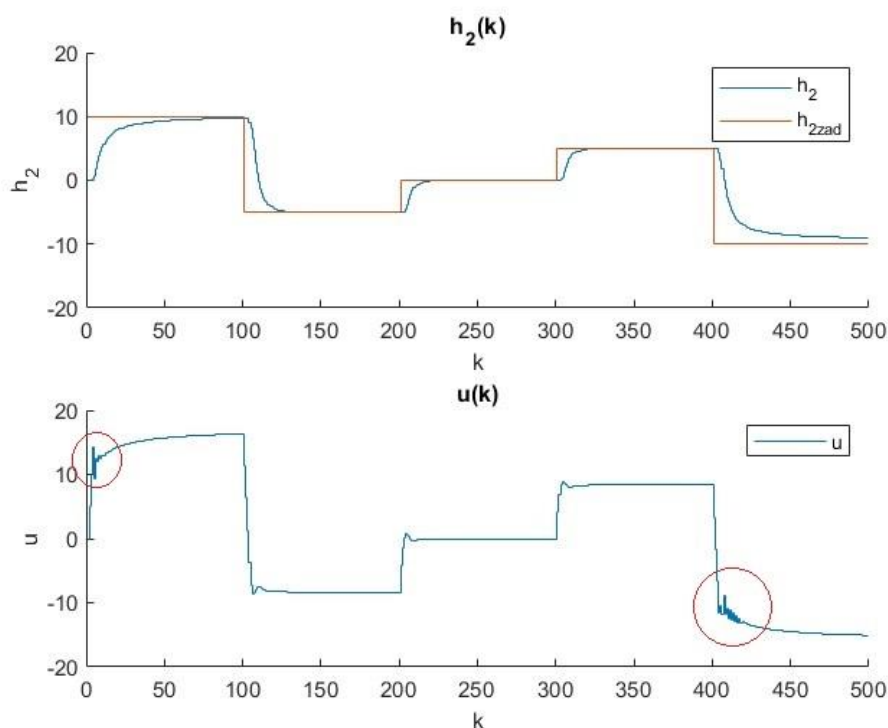


Rysunek 34. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z czterema modelami rozmytymi.

Dla czterech modeli rozmytych model ma duży problem z sytuacją, w której woda ze zbiornika odpływa. Ponadto w zaznaczonym obszarze występuje przełączanie między zbiorami, co skutkuje dużymi zmianami w sterowaniu.

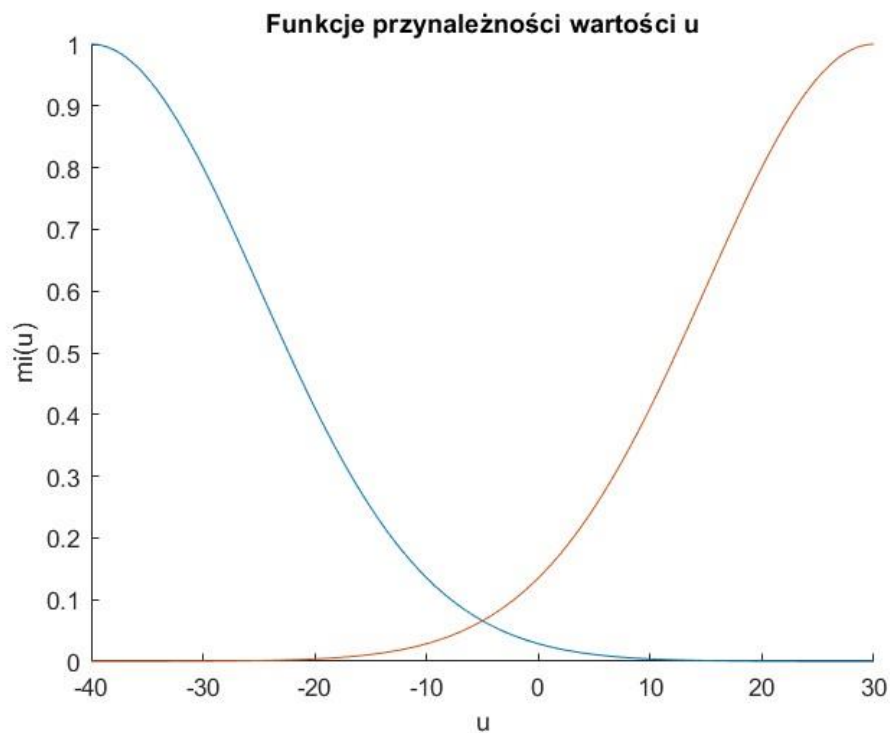


Rysunek 35. Trzy zbiory rozmyte sterowania u .

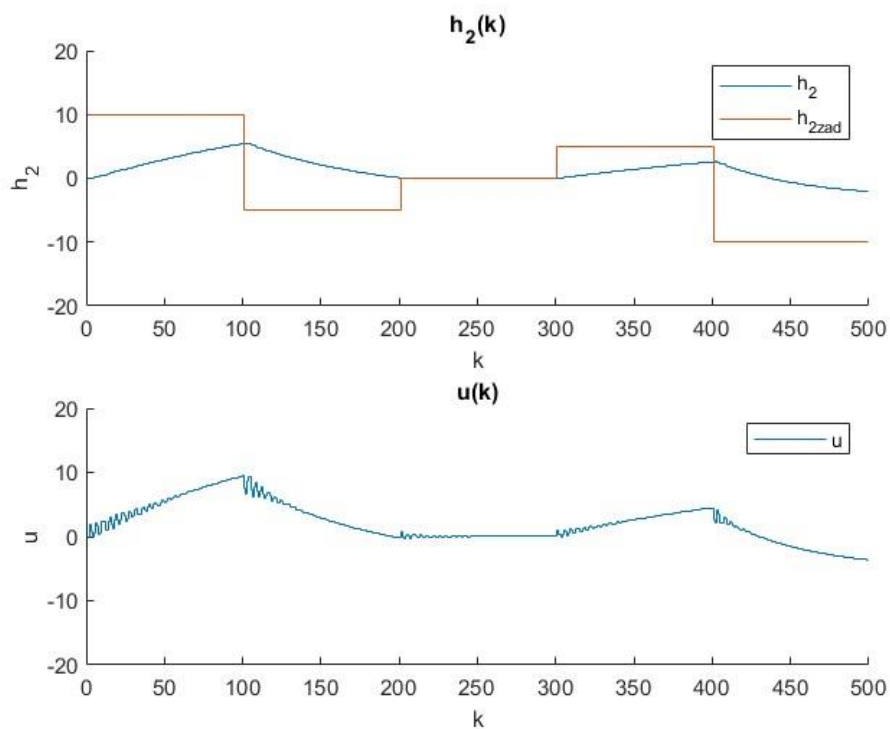


Rysunek 36. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z trzema modelami rozmytymi.

Dla tak dobranych, trzech zbiorów rozmytych widać, że model ma problem, gdy woda ze zbiornika odpływa (na wykresie $h_{2zad} < 0$). Należałoby nałożyć dodatkowe ograniczenia na przyrosty sterowania, aby pozbyć się obszarów zaznaczonych na rys. 31. W porównaniu do czterech zbiorów model lepiej sobie radzi z osiągnięciem zadanych wartości.



Rysunek 37. Dwa zbiory rozmyte sterowania u .



Rysunek 38. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z dwoma modelami rozmytymi.

Niestety dla dwóch zbiorów rozmytych nie udało się stworzyć jakościowego regulatora, który przeprowadzałby układ między kolejnymi wartościami zadanymi.

Reasumując, układ najlepiej współpracuje z nieparzystą liczbą zbiorów. Można w nim wyszczególnić jeden dobrze rozmywający wartości sterowania bliskie 0, natomiast pozostałe 2 w przypadku 3 zbiorów rozmytych i 4 w przypadku 5 zbiorów rozmytych, dobrze rozmywają wartości skrajne.

*Wszelkie symulacje i obliczenia wykonano używając skryptów: **DMC_fuzzy.m** i **step_response_fuzzy.m***

Na podstawie powyższych rysunków i obserwacji można wysnuć wniosek, że regulator rozmyty DMC lepiej przeprowadza układ między wartościami zadanymi.

9. Spis rysunków

Rysunek 1. Model obiektu.....	1
Rysunek 2. Charakterystyka statyczna $h_2(F)$, gdzie $F = F_1 + F_D$	3
Rysunek 3. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym.....	5
Rysunek 4. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku drugim.....	5
Rysunek 5. Model nieliniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym i drugim.....	6
Rysunek 6. Model liniowy – poziom cieczy w zbiorniku pierwszym.....	7
Rysunek 7. Model liniowy – poziom cieczy w zbiorniku drugim.....	8
Rysunek 8. Odpowiedzi układu na zmiany wartości zakłócenia – zbiornik pierwszy.....	20
Rysunek 9. Odpowiedzi układu na zmiany wartości zakłócenia – zbiornik drugi.....	20
Rysunek 10. Regulacja modelu regulatorem DMC.....	10
Rysunek 11. Regulator DMC, $N = 2$	11
Rysunek 12. Regulator DMC, $N = 3$	11
Rysunek 13. Regulator DMC, $N = 5$	12
Rysunek 14. Regulator DMC, $N = 10$	12
Rysunek 15. Regulator DMC, $N = 100$	13
Rysunek 16. Regulator DMC, $N = 100$, $N_u = \{1, 2, 5, 10, N/2\}$	14
Rysunek 17. Regulator DMC, $N = 100$, $N_u = 5$	14
18. Regulator DMC, $N = 100$, $N_u = 10$, $\lambda_1 = 0.1$, $\lambda_2 = 1$, $\lambda_3 = 10$	15
Rysunek 19. Testowanie zachowania obiektu w szerokim zakresie zmienności sterowania.....	16
Rysunek 20. Testowanie zachowania obiektu w szerokim zakresie zmienności sterowania z nałożonymi ograniczeniami.....	16
Rysunek 21. Funkcje przynależności dopływu sterującego F_1	17
Rysunek 22. Model rozmyty - poziom cieczy w pierwszym zbiorniku.....	18
Rysunek 23. Model rozmyty - poziom cieczy w drugim zbiorniku.....	18
Rysunek 24. Model rozmyty - poziom cieczy w pierwszym zbiorniku.....	19
Rysunek 25. Model rozmyty - poziom cieczy w drugim zbiorniku.....	19
Rysunek 26. Działanie układu dla trapezowej funkcji przynależności.....	23
Rysunek 27. Funkcje przynależności sterowania u	24
Rysunek 28. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC bez ograniczeń.....	25
Rysunek 29. Dostrojone funkcje przynależności.....	25
Rysunek 30. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC po dostrojeniu, bez ograniczeń.....	26
Rysunek 31. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC po dostrojeniu, z ograniczeniami.....	26
Rysunek 32. Zestawienie regulatora DMC oraz rozmytego DMC.....	27
Rysunek 33. Cztery zbiory rozmyte sterowania u	28
Rysunek 34. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z czterema modelami rozmytymi.....	28
Rysunek 35. Trzy zbiory rozmyte sterowania u	29
Rysunek 36. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z trzema modelami rozmytymi.....	29
Rysunek 37. Dwa zbiory rozmyte sterowania u	30
Rysunek 38. Regulacja z wykorzystaniem rozmytego regulatora DMC, z dwoma modelami rozmytymi.....	30

Spis treści

1. Założenia projektu	1
2. Cel projektu	3
3. Przebieg projektu.....	4
4. Model nieliniowy.....	4
5. Model liniowy	7
6. Regulator DMC	9
7. Modele rozmyte Takagi – Sugeno.....	17
8. Rozmyty regulator DMC	23
9. Spis rysunków	32