

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I ELEKTROTECHNIKI

INSTYTUT ROBOTYKI I INTELIGENCJI MASZYNOWEJ

ZAKŁAD STEROWANIA I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ



STEROWANIE ROZMYTE ZBIORNIKIEM.

METODY INTELIGENCJI MASZYNOWEJ W
AUTOMATYCE

MATERIAŁY DO ZAJĘĆ LABORATORYJNYCH

MGR INŻ. KRZYSZTOF SIEMBAB,

MGR INŻ. ADRIAN WÓJCIK

ADRIAN.WOJCIK@PUT.POZNAN.PL

I. CEL ZAJĘĆ

WIEDZY

Celem zajęć jest zapoznanie z:

- strukturą układów regulacji wykorzystujących wnioskowanie rozmyte Mamdaniego,
- techniką odsprzęgania sygnałów sterujących.

UMIEJĘTNOŚCI

Celem zajęć jest nabycie umiejętności w zakresie:

- analizy nieliniowych obiektów dynamicznych o wielu wejściach i wielu wyjściach,
- dopasowania przedziałów i parametrów funkcji przynależności wejść i wyjść regulatora rozmytego,
- budowy bazy reguł regulatora rozmytego na podstawie analizy obiektu sterowania w pętli otwartej.

KOMPETENCJI SPOŁECZNYCH

Celem zajęć jest kształtowanie właściwych postaw w zakresie:

- prawidłowego zarządzania bazą kodu i danych,
- prawidłowej prezentacji i dokumentacji systemów logiki rozmytej.
- skutecznej komunikacji w kontekście metod inteligencji maszynowej.

II. POLECENIA KOŃCOWE

Wykonaj [zadania laboratoryjne](#) zgodnie z poleceniami i wskazówkami prowadzącego. Zaprezentuj rozwiązania prowadzącemu. Zrealizowane zadania są oceniane zero-jedynkowo.

W przypadku niezrealizowania wszystkich zadań w trakcie zajęć możliwe jest wykonanie raportu w celu uzupełnienia punktacji uzyskanej na zajęciach. Raport oceniany jest dodatkowo pod względem redakcyjnym. Wymogi redakcyjne oraz szablon raportu laboratoryjnego dostępne są na portalu *eKursy* w katalogu „Wymogi raportu laboratoryjnego”. Raport należy przesłać jako rozwiązanie zadania na portalu *eKursy* w terminie do 7 dni od realizacji zajęć.

III. PRZYGOTOWANIE DO ZAJĘĆ

A) ZAPOZNANIE Z PRZEPISAMI BHP

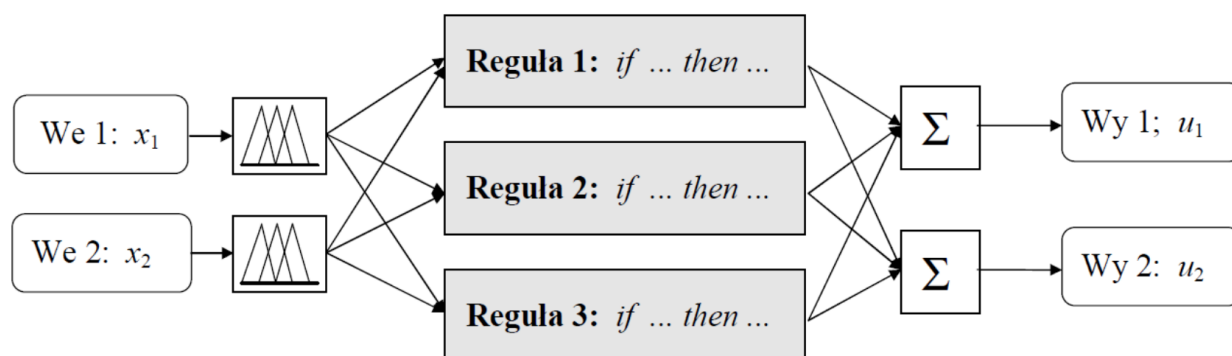
Wszystkie informacje dotyczące instrukcji BHP laboratorium są zamieszczone w sali laboratoryjnej oraz na stronie Zakładu [1]. Wszystkie nieścisłości należy wyjaśnić z prowadzącym laboratorium. Wymagane jest zaznajomienie i zastosowanie do regulaminu.

Na zajęcia należy przyjść przygotowanym zgodnie z tematem zajęć. Obowiązuje również materiał ze wszystkich odbytych zajęć.

B) WPROWADZENIE DO STEROWANIA Z WNIOSKOWANIEM MAMDANI'EGO

Sterowanie rozmyte z wnioskowaniem Mamdani'ego oferuje wygodne możliwości projektowania sterowania obiektami nieliniowymi, szczególnie w przypadku, gdy charakter nieliniowości utrudnia ich opisanie metodami analitycznymi, np. w formie równań różniczkowych lub algebraicznych, i wymagana jest zmiana parametrów regulacji w zależności od punktu pracy. Ze względu na możliwość implementacji algorytmu sterowanie rozmyte należy do komputerowych (mikroprocesorowych) metod regulacji. Można wyróżnić następujące cechy sterowania rozmytego:

- umożliwia zapisanie problemu w języku naturalnym na podstawie doświadczenia „eksperta” (analizy zależności zbioru danych z wejścia i wyjścia procesu), co ułatwia jego zrozumienie,
- umożliwia modelowanie zależności nieliniowych o dużej złożoności, gdzie opis analityczny jest trudny lub niemożliwy,
- umożliwia zastosowanie adaptacyjnej techniki doboru parametrów na podstawie danych uczących (np. *adaptive neuro-fuzzy inference systems*, ANFIS) [2],
- jest elastyczne i odporne na nieprecyzyjne dane,
- nadaje się do stosowania obliczeń równoległych,
- może być łączone z konwencjonalnymi metodami sterowania



Wejścia - konkretne liczby,
podlegają fuzyfikacji

Reguły obliczane w sposób
równoległy z zastosowaniem
zasad wnioskowania rozmytego

Wyniki implikacji są łączone
(agregacja) i poddawane defuzyfikacji

Wyjścia - konkretne
liczby

Rys. 1. Schemat działania układu rozmytego [3].

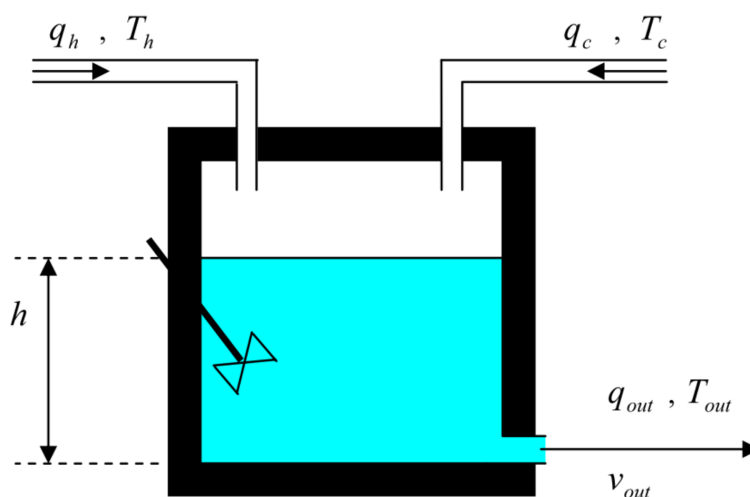
Projektowanie układu sprowadza się do zdefiniowania operacji wykonywanych w poszczególnych krokach. Poprawne działanie układu, np. regulatora rozmytego, zależy przede wszystkim od właściwego określenia liczby i parametrów funkcji przynależności wielkości wejściowych i wyjściowych do zbiorów rozmytych oraz od zdefiniowania operacji wnioskowania rozmytego w poszczególnych regułach, których liczba waha się od kilku do kilkudziesięciu.

- Fuzyfikacja (rozmywanie) wejść.** Na wejścia modelu rozmytego są wprowadzane wartości, które są reprezentowane przez liczby rzeczywiste. Określa się je jako wartości ostre (ang. *crisp numerical value*). W bloku fuzyfikacji dokonuje się operacji rozmywania czyli obliczania stopnia przynależności wejść do poszczególnych zbiorów rozmytych. Polega to na określeniu stopnia przynależności danej wartości wielkości wejściowej do każdego z odpowiadających jej zbiorów rozmytych pokrywających zakres możliwych wartości wejściowych (np. do jakiego stopnia prędkość jest np. duża, a do jakiego mała). Operacja ta sprowadza się do obliczenia funkcji lub wyszukiwaniu odpowiednich wartości w tabelach.

2. **Zastosowanie operatorów logiki rozmytej** do określenia stopnia, w jakim spełniona jest przesłanka w każdej z reguł. Wartościami wejściowymi są wartości przynależności wejść, na których wykonywane są rozmyte operacje logiczne (AND i OR) tworzące przesłankę. Jako wynik otrzymuje się pojedynczy poziom prawdy spełnienia przesłanki.
3. **Zastosowanie metody implikacji.** Operacja ta sprowadza się do zmiany kształtu funkcji przynależności zbioru rozmytego konkluzji zgodnie z poziomem prawdy spełnienia przesłanki (przez obcięcie lub skalowanie). Dodatkowo przesłance każdej z reguł można nadać wagę z zakresu od 0 do 1 wyrażającą jej ważność w porównaniu z innymi. Wynikiem operacji są zbiory rozmyte odpowiadające każdej wielkości wyjściowej występującej w konkluzji.
4. **Agregacja wszystkich wyjść.** Polega ona na połączeniu odpowiadających jej zbiorów wyjściowych ze wszystkich reguł w jeden zbiór rozmyty dla każdej wielkości wyjściowej. Na wejściu procesu agregacji mamy listę obciętych lub przeskalowanych w wyniku implikacji funkcji przynależności danej wielkości wyjściowej w poszczególnych regułach (niekoniecznie wszystkich).
5. **Defuzyfikacja (wyostrzanie) wyjść.** Polega na wyznaczeniu konkretnej wartości dla każdej wielkości wyjściowej ze zbioru rozmytego otrzymanego po agregacji zbiorów z poszczególnych reguł. Najczęściej stosowaną metodą defuzyfikacji jest obliczanie środka ciężkości obszaru pod krzywą zagregowanej funkcji przynależności (centroid method). Prowadzi to do wyznaczenia wartości będącej „średnią ważoną” z reguł: wagi reguł są proporcjonalne do poziomemu spełnienia ich przesłanek. Inne, prostsze możliwości to: średnia maksimum funkcji zbioru wyjściowego z poszczególnych reguł, wybór największego lub najmniejszego z maksimum czy metoda bisekcji.

c) MODEL SYMULACYJNY ZBIORNIKA

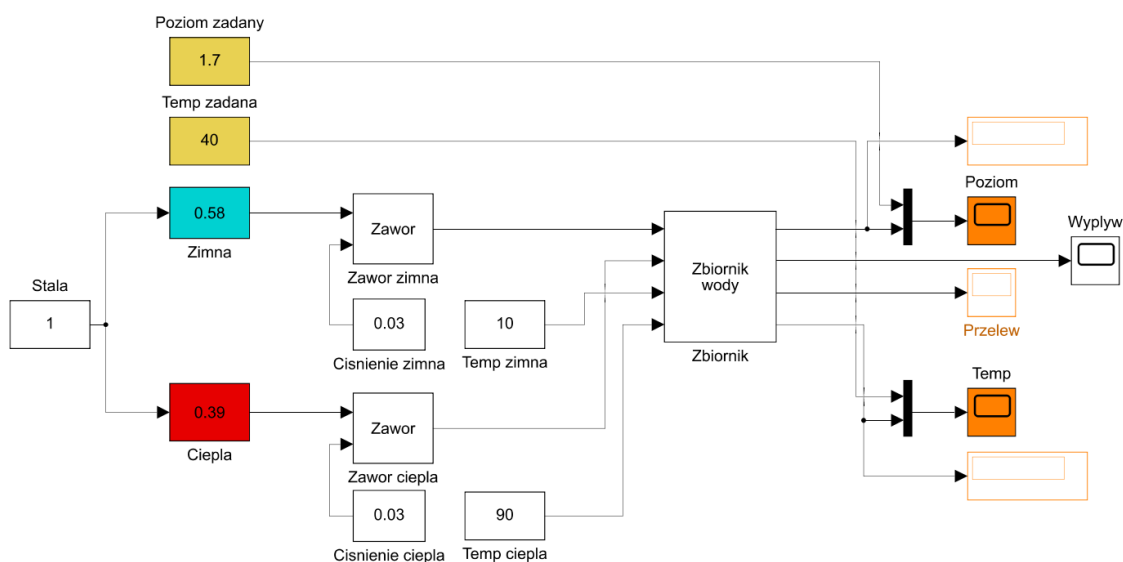
W ramach ćwiczenia zaprojektowany zostanie rozmyty układ sterowania dla zbiornika ze swobodnym wpływem. Zadanie układu regulacji polega na utrzymaniu zadanego poziomu i zadanej temperatury wody w zbiorniku. Szkic układu przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Szkic poglądowy obiektu regulacji.

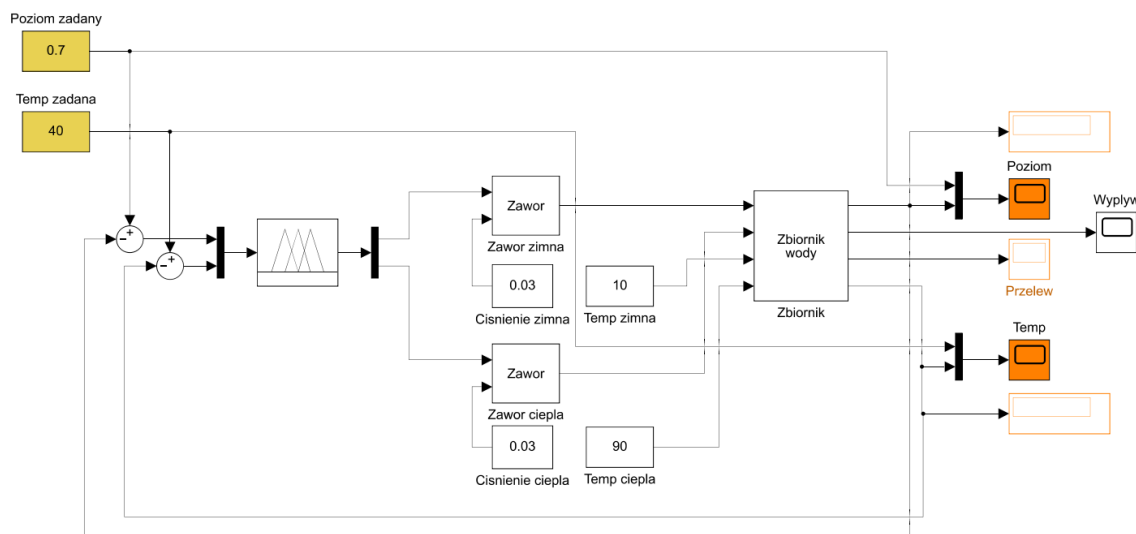
Do zbiornika doprowadzana jest woda gorąca o temperaturze T_h [$^{\circ}\text{C}$] z wydajnością (strumieniem objętości) q_h [m^3/s] oraz woda zimna o temperaturze T_c [$^{\circ}\text{C}$] z wydajnością (strumieniem objętości) q_c [m^3/s]. W zbiorniku woda jest mieszana i uzyskuje temperaturę T_{out} . Na dnie zbiornika znajduje się otwór o stałym przekroju, którym wypływa woda z wydatkiem q_{out} [m^3/s], zależnym od chwilowej wysokości słupa wody h . Mierzone są wysokość słupa wody i temperatura wyjściowa. Zmieniane są wydajności strumieni zimnej i ciepłej wody.

W celu identyfikacji obiektu sterowania należy wykorzystać model `zbiornik_test.slx`, przedstawiony na rys. 3. W programie MATLAB należy uruchomić pakiet symulacyjny Simulink, a następnie otworzyć podany model. Do zbiornika doprowadzana jest woda ciepła i zimna przez zawory o nastawie z zakresu $< 0, 1 >$. Zmianę pozycji zaworu można wykonywać interaktywnie, w trakcie symulacji, po kliknięciu w bloki odpowiednio „Zimna,” i „Ciepła”. Moduł animacyjny zakłada, że poziom wody zmienia się w zakresie od 0 do 2 m. Należy przeprowadzić testy zmierzające do określenia rozmytych reguł sterowania, umożliwiających utrzymanie zadanego poziomu i zadanej temperatury wody. Osobno należy opracować bazy reguł dla zimnej i ciepłej wody, korzystając z tych samych danych pomiarowych: poziom i temperatura oraz ich wartości referencyjnych.



Rys. 3. Model symulacyjny `zbiornik_test.slx`.

W ramach zadań laboratoryjnych należy zaimplementować zaproponowaną bazę reguł w modelu sterownika rozmytego. Model symulacyjny zawarty jest w modelu `zbiornik_fuzzy_viewer.slx` (rys. 4.). Wejściem do regulatora rozmytego są sygnały uchybów: poziomu i temperatury. Należy zwrócić uwagę, że dodatni uchyb poziomu oznacza, że wody w zbiorniku jest za mało, uchyb ujemny – za dużo. Podobnie dodatni uchyb temperatury oznacza, że woda jest za zimna, a uchyb ujemny – że woda jest za ciepła.



Rys. 4. Model symulacyjny `zbiornik_fuzzy_viewer.slx`.

Regulator temperatury należy zaprojektować korzystając z narzędzi Fuzzy Logic Toolbox. Zaprojektowany układ wnioskowania powinien mieć dwa wejścia: odpowiednio uchyb położenia i uchyb temperatury, oraz dwa wyjścia: odpowiednio sygnałysterowania dla zaworów wody zimnej i wody ciepłej. Zakresy zmiennych wejściowych i wyjściowych powinny wynosić:

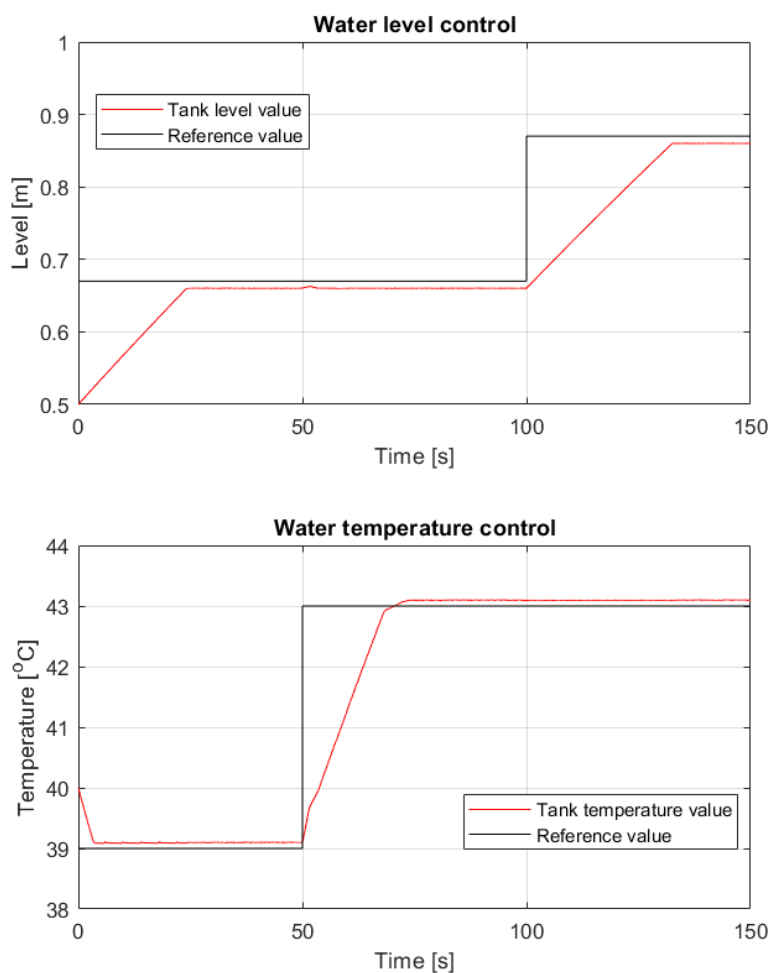
- uchyb położenia $< -2, 2 >$
- uchyb temperatury $< -80, 80 >$
- ysterowanie zaworów $< 0, 1 >$

Należy przyjąć 5 do 7 wartości lingwistycznych dla każdej ze zmiennych. Baza wnioskowania powinna być ustawiona zgodnie z regułami wyznaczonymi na podstawie analizy modelu `zbiornik_test.mdl`. Tak zaprojektowany układ wnioskowania należy zapamiętać w przestrzeni roboczej pod nazwą np.: `FisZbiornik`, i tą samą nazwę wpisać jako parametr bloku `Fuzzy Logic Controller` w modelu Simulink. Należy zarejestrować poziom i temperaturę wody orazysterowanie zaworów w czasie procesów przejściowych – skok poziomu zadanego oraz skok temperatury zadaney.

Uwaga techniczna: Poprawna praca może wymagać (zależnie od wersji środowiska MATLAB), by w modelu symulacyjnym ustawić parametr:

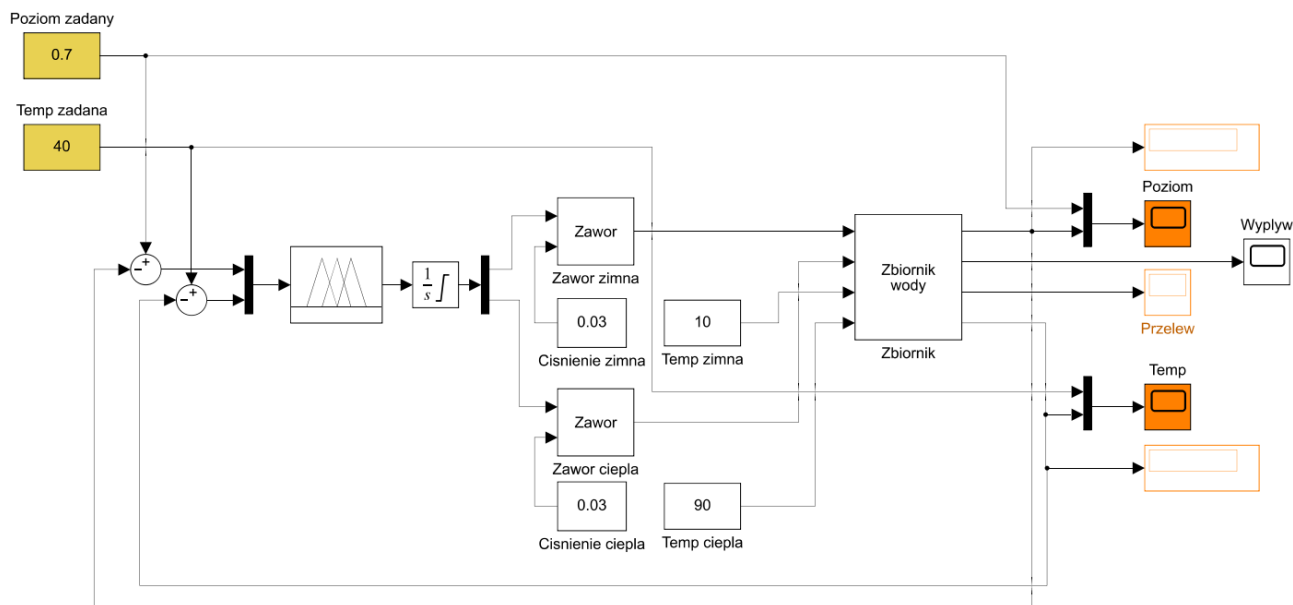
Simulation -> Simulation parameters -> Advanced -> Boolean logic signal = off.

Nawet poprawnie dobrany regulator w modelu `zbiornik_fuzzy_viewer.slx` charakteryzuje się istnieniem uchybu ustalonego. Przykładowe przebiegi przedstawiono na rys 5.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi w układzie regulacji `zbiornik_fuzzy_viewer.slx`.

Uchyb ten można wyeliminować poprzez zastosowanie bloków całkujących, zgodnie z rys. 6. (model: zbiornik_fuzzy_int_viewer.slx).

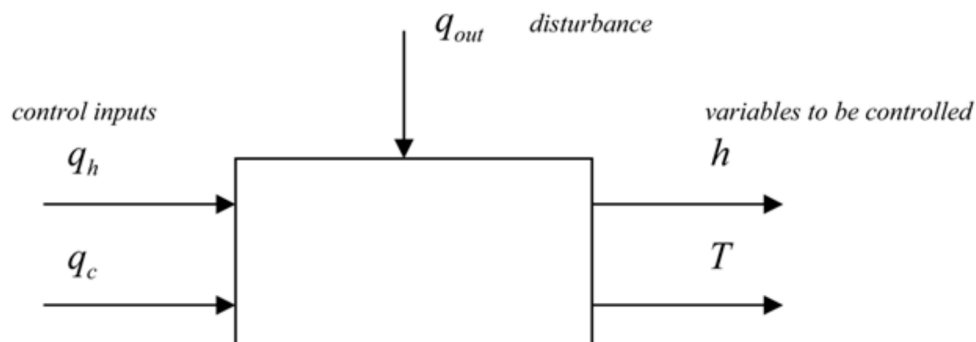


Rys. 6. Model symulacyjny zbiornik_fuzzy_int_viewer.slx.

W tym przypadku zmieniają się zmienne wyjściowe układu wnioskowania rozmytego. Zamiast wartości sygnałów sterujących zaworów są to szybkości zmian położenia zaworów. Dlatego też zakres tych sygnałów należy zdefiniować jako $\langle -1, 1 \rangle$. Wartość „0” oznacza brak zmian, „-1” najszybsze zamykanie zaworu, „+1” najszybsze otwieranie zaworów. Należy odpowiednio dopasować bazę reguł.

D) UKŁAD ODSPRZĘGAJĄCY

Rozważany wcześniej układ sterowania nie wymagał znajomości modelu matematycznego obiektu, lecz bazują na wiedzy eksperckiej (wnioski wyciągnięte z analizy zachowania modelu `zbiornik_test.mdl`). W tej sekcji zostanie wykonana analiza matematyczna i zaproponowana procedura odsprzężenia układu wyjściowego. Układ odsprzęgania można przedstawić w postaci jak na rys. 7. Przyjmuje się, że zakłócenie q_{out} (wyływ wody ze zbiornika) jest zależne od poziomu h wody w zbiorniku.



Rys. 7. Schemat blokowy układu odsprzęgnięcia.

Zmiana objętości wody w zbiorniku opisana jest równaniami:

$$dV = dV_h + dV_c - dV_{out} \quad (1)$$

gdzie: dV - zmiana objętości w zbiorniku [m^3],
 dV_h - objętość wpływającej *ciepłej* wody [m^3],
 dV_c - objętość wpływającej *zimnej* wody [m^3],
 dV_{out} - objętość wody wypływającej ze zbiornika [m^3],

Z równania (1) wyprowadzić można równanie różniczkowe (6) opisujące dynamikę poziomu wody w zbiorniku. W przekształceniach wykorzystano związek poziomu wody z objętością (4) oraz prawo Torricellego [4] opisujące prędkość wypływu cieczy wykorzystane w (5).

$$dV = q_h \cdot dt + q_c \cdot dt - q_{out} \cdot dt \quad (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = q_h + q_c - q_{out} \quad (3)$$

$$h = \frac{V}{a} \quad (4)$$

$$q_{out} = a_{out} \cdot v_{out} = a_{out} \cdot \sqrt{2g \cdot h} \quad (5)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_h + q_c - a_{out} \cdot \sqrt{2g \cdot h}}{a} \quad (6)$$

gdzie: a - pole przekroju zbiornika [m^2],
 a_{out} - pole przekroju wylotu [m^2],

Zmiana energii wody w zbiorniku opisana jest zależnością (7):

$$dQ = c\rho \cdot V \cdot dT \quad (7)$$

$$c\rho \cdot V \cdot dT = c\rho \cdot q_h \cdot (T_h - T) \cdot dt + c\rho \cdot q_c \cdot (T - T_c) \cdot dt \quad (8)$$

gdzie: c - ciepło właściwe wody ($4.2 \frac{J}{kg \cdot K}$),
 ρ - gęstość (masa właściwa) wody ($1000 \frac{kg}{m^3}$),

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_h \cdot (T_h - T) + q_c \cdot (T - T_c)}{ah} \quad (9)$$

Z równania bilansu energii (8) wyprowadzić można równanie różniczkowe (9) opisujące dynamikę temperatury w zbiorniku. Bazując na przedstawionym modelu można zaproponować sterowanie odsprzęgające (10, 11) – osobne wejście sterujące dla przepływu i osobne dla temperatury średniej strumienia.

$$u_{level} = q_h + q_c \quad (10)$$

$$u_{temp} = \frac{q_h}{q_c} \quad (11)$$

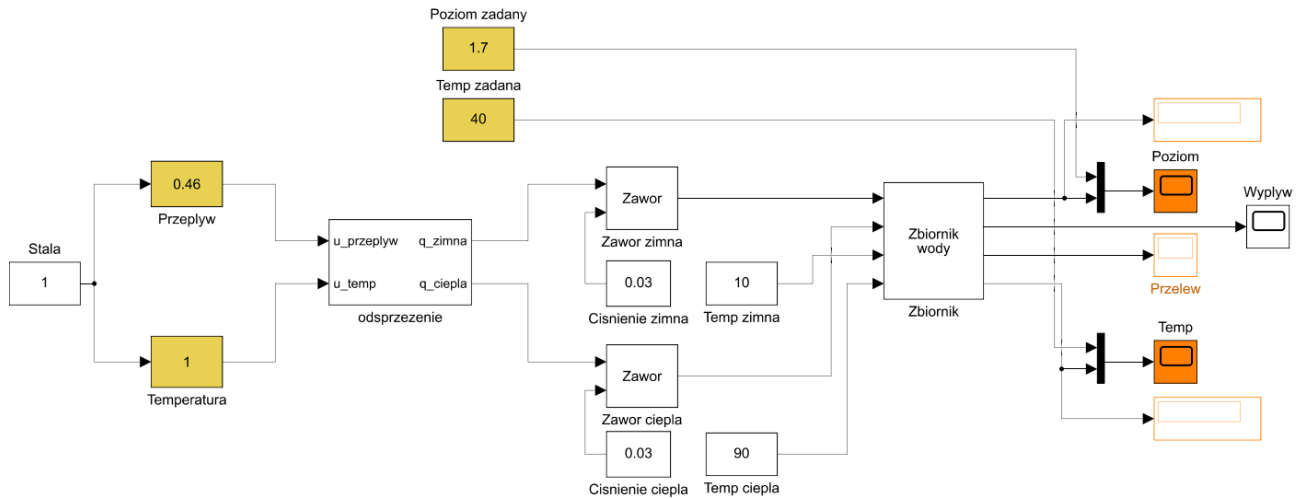
gdzie: u_{level} - sygnał sterujący przepływem,
 u_{temp} - sygnał sterujący temperaturą,

Rozwiązując układ równań (9) otrzymuje się równania układu odprzegającego (12, 13).

$$q_c = \frac{u_{level}}{1 + u_{temp}} \quad (12)$$

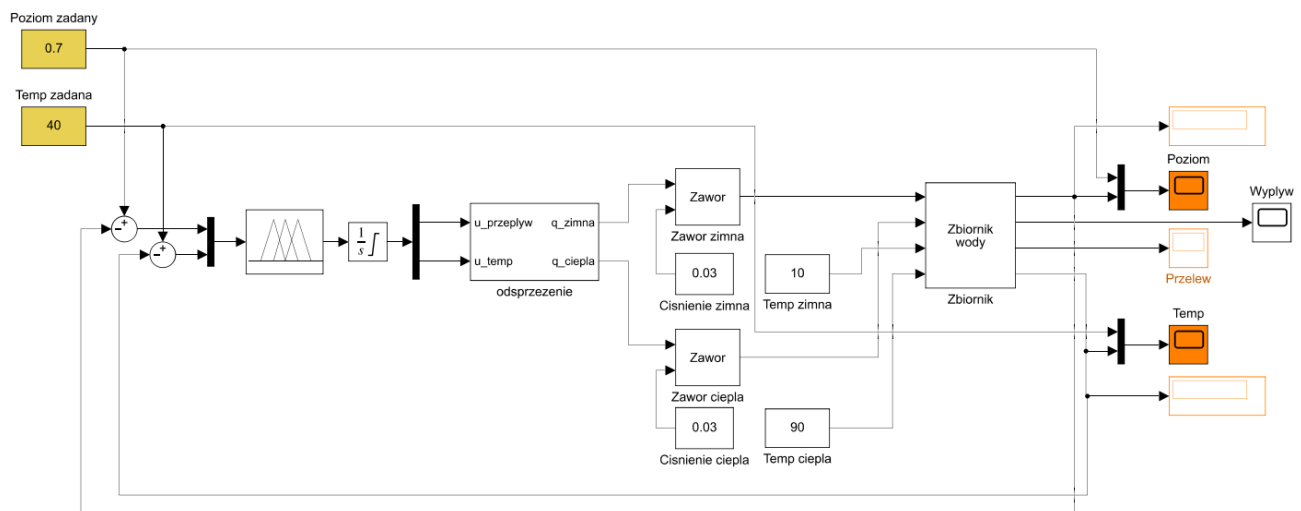
$$q_h = u_{temp} \cdot q_c \quad (13)$$

Ponieważ sygnał u_{temp} określający stosunek wody ciepłej i zimnej powinien przyjmować zakres od 0 (wyłącznie zimna woda) do inf (wyłącznie ciepła woda) zastosowano nieliniowy blok $\tan()$ dla argumentów od 0 do $\frac{\pi}{2}$. Na rys. 8 przedstawiono model symulacyjny zbiornika służący do analizy układu sterowania z odsprzeganiem w celu określenia bazy reguł dla regulatora rozmytego.



Rys. 8. Model symulacyjny `zbiornik_odsprzez_fuzzy_int_viewer.slx`.

Na rys. 9 przedstawiono model symulacyjny rozmytego układu sterowania zbiornikiem z wykorzystaniem odsprzegania. Projektując bazę reguł należy we wnioskowaniu dla wyjścia sterującego przepływem uwzględnić wyłącznie uchyb poziomu, natomiast dla sterowania stosunkiem wody ciepłej do zimnej – tylko informacje o temperaturze.



Rys. 9. Model symulacyjny `zbiornik_odsprzez_test.slx`.

IV. SCENARIUSZ DO ZAJĘĆ

A) ŚRODKI DYDAKTYCZNE

- Sprzętowe: • komputer,
Programowe: • MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox),
 • model symulacyjny zbiornika.

B) ZADANIA DO REALIZACJI

1. Zbuduj rozmyty regulator do sterowania poziomem wody i temperaturą wody w zbiorniku.
 - (a) Przeanalizuj pracę układu sterowania w pętli otwartej. Na podstawie wykonanych testów zaproponuj parametry *funkcji przynależności* wejść i wyjść oraz bazę reguł.
 - (b) Zaimplementuj układ rozmyty za pomocą narzędzi Fuzzy Logic Toolbox, wykorzystując graficzny interfejs użytkownika lub pisząc skrypt definiujący układ wnioskowania. Wykorzystaj wnioskowanie Mamdaniego.
 - (c) Uruchom układ regulacji w zamkniętej pętli z regulatorem rozmytym. Zarejestruj przebiegi dla skokowych zmian wartości referencyjnych temperatury i poziomu.
2. Zmodyfikuj rozmyty regulator o blok całkowania na wyjściu sterującym.
 - (a) Zmodyfikuj bazę reguł i funkcje przynależności wyjść uwzględniając nową interpretację wyjść układu rozmytego: zamiast *stopnia otwarcia* zaworu powinny być to *prędkości zamykania lub otwierania* zaworu
 - (b) Uruchom układ regulacji w zamkniętej pętli z regulatorem rozmytym. Zarejestruj przebiegi dla skokowych zmian wartości referencyjnych temperatury i poziomu.
3. Zbuduj rozmyty regulator do *odsprężonego* sterowania poziome wody oraz temperaturą wody w zbiorniku.
 - (a) Przeanalizuj pracę odsprężonego układu sterowania w pętli otwartej. Na podstawie wykonanych testów zaproponuj nową bazę reguł.
 - (b) Regulator powinien posiadać blok całkowania na wyjściu sterującym.
 - (c) Uruchom układ regulacji w zamkniętej pętli z regulatorem rozmytym. Zarejestruj przebiegi dla skokowych zmian wartości referencyjnych temperatury i poziomu.

BIBLIOGRAFIA

1. *Regulaminy porządkowe, instrukcje BHP* [online]. [B.d.] [udostępniono 2019-09-30]. Dostępne z: <http://zsep.cie.put.poznan.pl/materialy-dydaktyczne/MD/Regulaminy-porz%C4%85dkowe-instrukcje-BHP/>.
2. *Design, train, and test Sugeno-type fuzzy inference systems - MATLAB* [online] [udostępniono 2022-03-30]. Dostępne z: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/neurofuzzydesigner-app.html>.
3. *Fuzzy Inference Process - MATLAB & Simulink* [online] [udostępniono 2022-03-30]. Dostępne z: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>.
4. Torricelli's law. W: *Wikipedia* [online]. 2022 [udostępniono 2022-03-31]. Dostępne z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Torricelli%27s_law&oldid=1080101355. Page Version ID: 1080101355.