

## REGULATOR ROZMYTY O WŁAŚCIWOŚCIACH REGULATORA TRÓJPOŁOŻENIOWEGO

Jacek ZAWALICH

Politechnika Gdańska, Wydz. Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki  
tel.: 728 864 140 e-mail: jacek.zawalich@pg.edu.pl

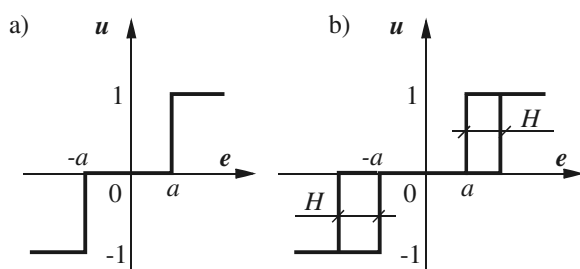
**Streszczenie:** Regulatory trójpołożeniowe są najprostszymi i najbardziej popularnymi regulatorami w układach automatyki, w których jako element wykonawczy zwykle stosuje się silnik elektryczny pracujący w sposób nawrotny. W takich układach jakość regulacji określa się m.in. poprzez analizę amplitudy i częstotliwości występujących oscylacji, przy zmianach wartości zadanej i wprowadzanych zakłóceniach. Referat jest próbą porównania otrzymywanej jakości regulacji w układzie z klasycznym regulatorem trójpołożeniowym oraz w układzie z regulatorem rozmytym, którego reguły wnioskowania mają realizować przybliżone właściwości regulatora trójpołożeniowego. W referacie przedstawione zostaną wyniki badań wykonane w programie Matlab-Simulink. Będą one odpowiedzią m.in.: na pytanie, czy regulator rozmyty może pracować podobnie jak regulator trójpołożeniowy.

**Słowa kluczowe:** regulator rozmyty, regulator trójpołożeniowy, jakość regulacji, porównanie regulatorów.

### 1. REGULATOR TRÓJPOŁOŻENIOWY

Regulator trójpołożeniowy najczęściej jest budowany z dwóch przekaźników elektromechanicznych, połączonych w ten sposób, aby jeden z nich był aktywny przy dodatnim uchybie regulacji, a drugi przy ujemnej jego wartości. Pracuje on zwykle w układzie regulacji z silnikowym elementem wykonawczym, co w rezultacie przekłada się na sytuację, w której sygnał sterujący generowany z takiego regulatora powoduje obroty silnika zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub przeciwnie albo pozostawia silnik w spoczynku. Odpowiada to sygnałom: 1, 0 lub -1 [1].

Teoretycznie charakterystyka regulatora trójpołożeniowego może być idealna, wg rysunku 1a lub rzeczywista, wg rysunku 1b. Ta druga jest stosowana w rozwiązaniach praktycznych, ze względu na konstrukcje samych przekaźników.



Rys. 1. Charakterystyki elementów trójpołożeniowych.  
a) charakterystyka idealna, b) charakterystyka rzeczywista;  
 $e$  - uchyb regulacji,  $u$  - sygnał sterujący,  $H$  - histereza

Charakterystykę idealną można uzyskać stosując odpowiedni program w sterowniku programowalnym, ale nie jest to korzystne, gdyż w rezultacie otrzymuje się dużą częstotliwość przełączeń w chwili, gdy uchyb regulacji jest w przedziale zmian wartości wyjściowej.

Istotną cechą układu regulacji z regulatorem trójpołożeniowym jest to, iż stosowany silnik mający właściwości całkujące powoduje sprowadzanie uchybu regulacji do wartości prawie zerowej.

### 2. REGULATOR ROZMYTY

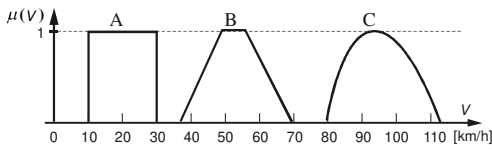
Regulatory rozmyte są obecnie często stosowane w różnych rozwiązaniach przemysłowych. Ich popularność wynika z osiągania lepszych jakości regulacji, szczególnie w przypadku obiektów nieliniowych i obiektów z dużymi opóźnieniami.

Budowa takiego regulatora opiera się na logice rozmytej, którą w roku 1965 wprowadził amerykański naukowiec pochodzenia azerskiego Lofti Zadeh [2]. Zaproponował, aby wielkości fizyczne oceniać za pomocą wartości lingwistycznych, czyli słownych. Zamiast stwierdzenia, że pojazd jedzie z prędkością 60 km/h, można powiedzieć, że pojazd jedzie z prędkością średnią. Zastosowane zostały liczby rozmyte typu: mniej więcej 9, pomiędzy 3 i 7, trochę więcej niż 2 itp. Daną wielkość fizyczną można więc ocenić poprzez przyporządkowanie kilku zbiorów rozmytych, np. „małe ciśnienie”, „średnie ciśnienie”, „duże ciśnienie”. Większa liczba zbiorów rozmytych, określana liczbą ziaren informacji, daje możliwość większej precyzji przy ocenie danej wielkości fizycznej. Jednakże zbyt duża liczba takich zbiorów powoduje zagubienie istotnych informacji. W rezultacie racjonalna liczba ziaren informacji powinna wynosić od pięciu do dziewięciu. Jest to wynikiem badań psychologów, którzy wykazali, że człowiek może zapamiętać do 9 stanów danego obiektu [3].

Zbiory stosowane w logice klasycznej umożliwiają jedynie stwierdzenie: czy dany element należy lub nie należy do określonego zbioru. Natomiast w przypadku zbiorów rozmytych istnieje możliwość częściowego przynależenia danego elementu do określonego zbioru poprzez zastosowanie funkcji przynależności. W rezultacie powstała możliwość zastosowania określeń słownych, stosowanych w warunkach rzeczywistych, do projektowania systemów sterowania.

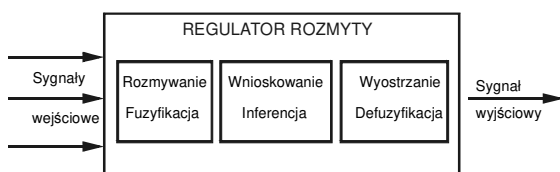
Przykładowo porównanie zbioru ostrego i zbioru rozmytego można przedstawić w sposób zilustrowany na

rysunku 2. W tym przypadku przynależność do zbioru ostrego A określona jest funkcją przynależności  $\mu(V) = 1$ . Pozostałe funkcje przynależności mogą przyjmować dowolne kształty i określać cząstkową przynależność elementów do danych zbiorów.



Rys. 2. Przykładowe funkcje przynależności dla zbiorów rozmytych A, B i C

Układ lub system o właściwościach rozmytych składa się z trzech podstawowych elementów: bloku rozmywania (fuzyfikacji), bloku wnioskowania (inferencji) oraz bloku wyostrażania (defuzyfikacji). Strukturę tę przedstawiono na rysunku 3 [3, 4, 5, 6, 7].

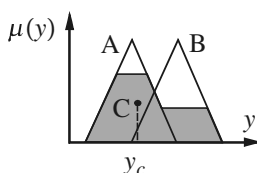


Rys. 3. Struktura regulatora rozmytego

W bloku rozmywania (fuzyfikacji) następuje przypisanie funkcji przynależności do danej ostrej wartości wejściowej w zależności od przyjętych zbiorów rozmytych. Obliczone wartości stopni przynależności  $\mu(x_1)$   $\mu(x_2)$  informują o tym, w jakim stopniu dane wartości przynależą do zbiorów rozmytych [3, 4, 5, 6, 7].

Blok wnioskowania (inferencji) służy do obliczania wynikowej funkcji przynależności. Wnioskowanie może przebiegać według metody Mamdaniego lub Takagi-Sugeno [3]. Różnica polega na tym, że w pierwszej metodzie dla określonych lingwistycznie przesłanek wniosek jest również określony lingwistycznie. Natomiast w drugiej - wniosek jest funkcją zmiennych wejściowych. Do wykonania tej operacji niezbędna jest baza reguł, przyjęty mechanizm wnioskowania oraz funkcje przynależności dla wielkości wyjściowych [3, 4, 5, 6, 7].

Ostatni blok wyostrażania (defuzyfikacji) ma za zadanie określić ostrą wartość sygnału wyjściowego. Do tego celu stosuje się różnorodne kryteria, jak np. metoda środka maksimum, metoda ostatniego maksimum i inne; ale najczęściej stosowana jest metoda środka ciężkości przedstawiona graficznie na rysunku 4.



Rys. 4. Defuzyfikacja metodą środka ciężkości  $y_c$  - sygnał wyjściowy elementu rozmytego [3]

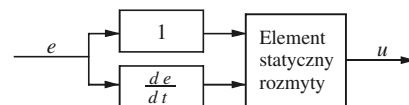
### 3. TRÓJPOŁOŻENIOWY REGULATOR ROZMYTY

Stosując metody projektowania elementów rozmytych można uzyskać obiekty o dowolnych charakterystykach statycznych. Również charakterystykę idealnego elementu

trójpołożeniowego można dość prosto osiągnąć, natomiast trudności występują przy modelowaniu charakterystyki rzeczywistej. Sygnał wyjściowy z elementu trójpołożeniowego zależy wówczas od trzech sygnałów: wejściowego sygnału uchybu, od jego dynamiki oraz od aktualnego stanu na wyjściu. Przy ciągłym wzroście sygnału uchybu można skorzystać ze zbudowanej charakterystyki statycznej, natomiast przy spadku tego sygnału – z przesuniętej drugiej charakterystyki uwzględniającej istnienie histerezy. Wpływ dynamiki uchybu na sygnał wyjściowy można zamodelować obliczając wartość pochodnej uchybu, a aktualną informację o stanie wyjściowym należałoby wprowadzić na wejście modelowanego regulatora. Informacja o stanie wyjściowym z elementu rozmytego gwarantowałaby dokładne określenie sygnału wyjściowego w przypadku, gdy uchyb jest w przedziale histerezy. Przykładową regułę wnioskowania (dla zakresu histerezy) można zapisać w postaci:

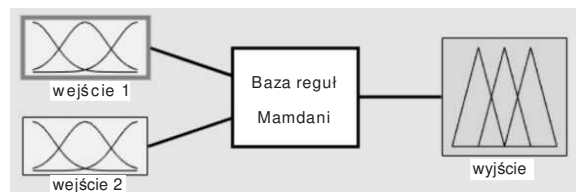
- jeżeli uchyb jest w przedziale histerezy i rośnie oraz jest stan wysoki to sygnał wyjściowy jest wysoki.

Jednak w prezentowanych badaniach podjęto próbę uproszczenia modelu tylko do dwóch sygnałów wejściowych zakładając, że zmiany sygnału uchybu w przedziale histerezy będą następować tylko w jednym kierunku. Badania symulacyjne opisane w punkcie 4 potwierdziły taką możliwość. Do badań przyjęto uproszczony model rozmytego regulatora, który uzależnia jego sygnał wyjściowy od aktualnej wartości uchybu oraz od jego kierunku zmian. Zastosowano strukturę z wprowadzoną dynamiką według rysunku 5.



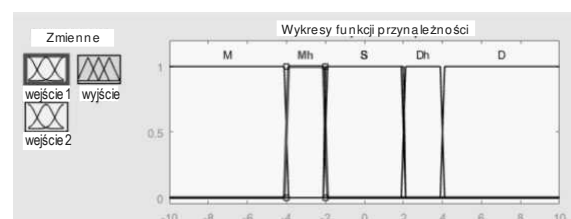
Rys. 5. Dynamiczny element rozmyty [3]

Dla przybliżonego rozmytego regulatora trójpołożeniowego, w programie Matlab-Simulink uzyskano reprezentację graficzną przedstawioną na rysunku 6.



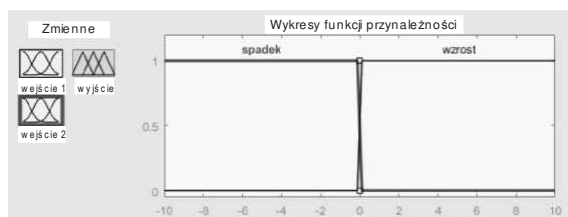
Rys. 6. Model struktury elementu rozmytego

Dla wejścia obsługującego sygnał uchybu regulacji określone zostały zbiory rozmyte oznaczone odpowiednio: M - ujemny uchyb, Mh - ujemny uchyb w strefie histerezy, S - strefa nieczułości, Dh - dodatni uchyb w strefie histerezy oraz D - dodatni uchyb; odpowiednią reprezentację graficzną przedstawia rysunek 7.



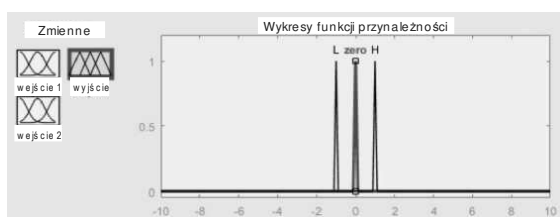
Rys. 7. Zbiory rozmyte dla sygnału wejściowego

Wejście dla sygnału pochodnej uchybu regulacji zostało zdefiniowane za pomocą dwóch zbiorów rozmytych oznaczonych: „spadek” oraz „wzrost” – ich odpowiednie funkcje przynależności przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zbiory rozmyte dla pochodnej uchybu

Dla sygnałów wyjściowych określono trzy zbiory rozmyte w postaci singletonów, graficznie zobrazowanych na rysunku 9, które są odpowiednikiem informacji ostrej. Singletony zostały odpowiednio nazwane jako: L - stan -1, zero - brak sygnału, H - stan +1.

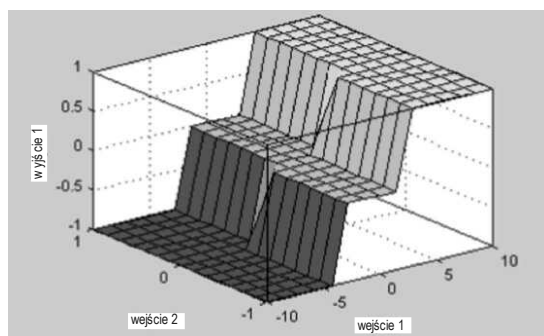


Rys. 9. Zbiory rozmyte na wyjściu rozmytego elementu trójpołożeniowego

Następny krok budowy przybliżonego rozmytego regulatora trójpołożeniowego polegał na określeniu reguł wnioskowania. W tym przypadku zostały one zapisane w postaci:

1. if (input1 is M) and (input2 is wzrost) then (output1 is L)
2. if (input1 is Mh) and (input2 is wzrost) then (output1 is L)
3. if (input1 is S) and (input2 is wzrost) then (output1 is zero)
4. if (input1 is Dh) and (input2 is wzrost) then (output1 is zero)
5. if (input1 is D) and (input2 is wzrost) then (output1 is H)
6. if (input1 is D) and (input2 is spadek) then (output1 is H)
7. if (input1 is Dh) and (input2 is spadek) then (output1 is H)
8. if (input1 is S) and (input2 is spadek) then (output1 is zero)
9. if (input1 is Mh) and (input2 is spadek) then (output1 is zero)
10. if (input1 is M) and (input2 is spadek) then (output1 is L)

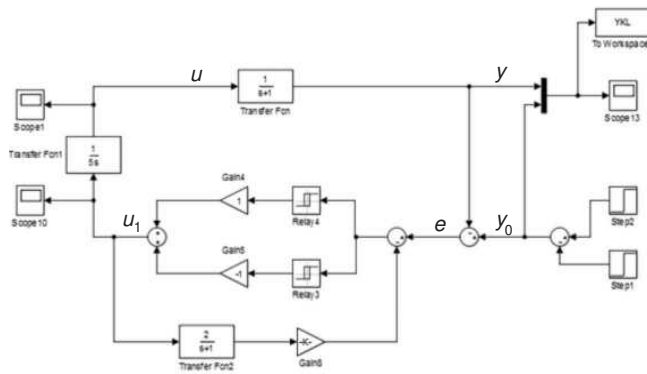
W rezultacie otrzymano dynamiczny element rozmyty o przybliżonych właściwościach elementu trójpołożeniowego. Graficzna interpretacja tej struktury została przedstawiona na rysunku 10.



Rys. 10. Graficzna interpretacja przybliżonego rozmytego elementu trójpołożeniowego

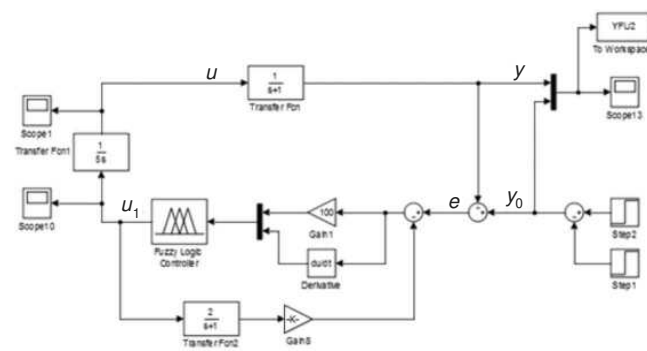
#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

Zaprojektowany w programie Matlab-Simulink przekładnikowy (klasyczny) element trójpołożeniowy został poddany badaniom symulacyjnym w układzie regulacji z obiektem inercyjnym pierwszego rzędu. W tym celu zbudowano model układu regulacji według schematu na rysunku 11 i zarejestrowano wyniki dla przypadku bez wprowadzenia sprzężenia korekcyjnego wokół elementu trójpołożeniowego.



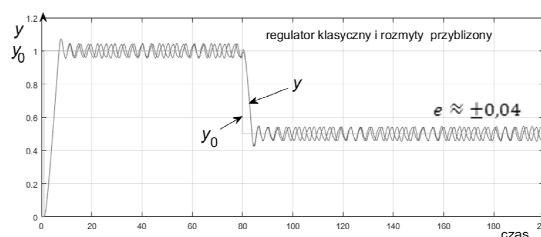
Rys. 11. Model układu regulacji z klasycznym regulatorem trójpołożeniowym

Dla tak zbudowanego modelu zastąpiono regulator klasyczny regulatorem rozmytym, zachowując te same parametry elementów składowych układu, budując strukturę według rysunku 12.



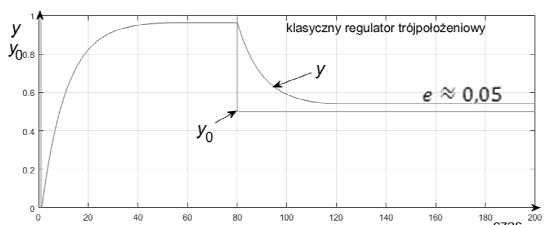
Rys. 12. Model układu regulacji z przybliżonym rozmytym regulatorem trójpołożeniowym

Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych z obu układów wykazały, że po zastosowaniu przybliżonego rozmytego modelu regulatora trójpołożeniowego można otrzymać prawie identyczne wyniki, co zostało zilustrowane na rysunku 13. W obu przypadkach zarejestrowano oscylacje przebiegu wielkości regulowanej o wartości około 0,25 Hz przy amplitudzie uchybu  $e \approx \pm 0,04$ .

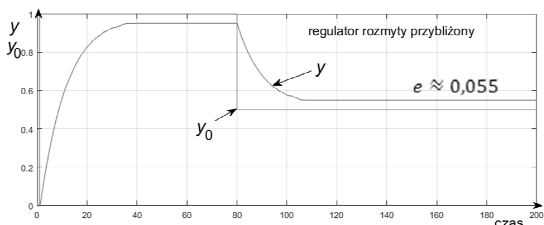


Rys. 13. Porównanie przebiegów wielkości regulowanej w układzie z klasycznym i przybliżonym rozmytym regulatorem trójpołożeniowym

Dla obydwu układów powtórzono badania wprowadzając sprzężenie korekcyjne wokół regulatorów, w postaci elementu inercyjnego pierwszego rzędu. W tym przypadku otrzymano przebiegi wielkości regulowanej bez oscylacji. Rejestrowany uchyb ustalony kształtował się na poziomie 0,05 przy początkowej wartości zadanej  $y_0 = 1,0$ . Przykładowy wynik symulacji z tak zastosowaną korekcją dla regulatora klasycznego, przedstawiono na rysunku 14, a dla przybliżonego rozmytego regulatora trójpołożeniowego na rysunku 15.



Rys. 14. Przebieg wielkości regulowanej w układzie z klasycznym regulatorem trójpołożeniowym ze sprzężeniem korekcyjnym



Rys. 15. Przebieg wielkości regulowanej w układzie z przybliżonym rozmytym regulatorem trójpołożeniowym ze sprzężeniem korekcyjnym

Dalsze zmniejszenie uchybu regulacji w przedstawionych układach jest możliwe po dokładnym dobraniu parametrów całkowitego elementu wykonawczego, jak również strefy nieczułości i histerezy elementu trójpołożeniowego.

## 5. JAKOŚĆ REGULACJI

W badaniach symulacyjnych wzięto pod uwagę jakość regulacji w postaci uchybu maksymalnego oraz czasu regulacji. Otrzymane wyniki były zbliżone dla obu struktur

regulatorów. Przykładowo dla układów bez korekcji i dla przyjętej histerezy elementu trójpołożeniowego 0,02, uchyb maksymalny wynosił około 0,04 dla regulatora klasycznego oraz dla przybliżonego regulatora rozmytego. Czasy regulacji kształtowały się na poziomie około 8 sek. w układzie bez korekcji i około 20 sek. w układzie z elementem korekcyjnym. W rezultacie potwierdziło się pierwotne założenie, że zamodelowany regulator rozmyty może pracować jako regulator trójpołożeniowy.

## 6. WNIOSKI

Bazy reguł stosowane w modelach rozmytych pozwalają na otrzymanie dowolnych właściwości badanych elementów, w tym również nieliniowych elementów trójpołożeniowych.

Przybliżony rozmyty regulator trójpołożeniowy oraz jego klasyczny odpowiednik mają porównywalne właściwości sterujące w badanych układach regulacji.

Badany przybliżony rozmyty regulator trójpołożeniowy może pracować w układach regulacji automatycznej, w których elementem wykonawczym są silniki nawrotne.

Zastosowanie inercyjnego sprzężenia zwrotnego w samych regulatorach pozwala na ograniczenie oscylacji wielkości regulowanej.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Findeisen W., Technika regulacji automatycznej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1965.
2. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, no 3, pp. 338-353, 1965.
3. Piegat A., Modelowanie i sterowanie rozmyte, EXIT, Warszawa 1999.
4. Kacprzyk J., Wieloetapowe sterowanie rozmyte, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2001.
5. Bubnicki Z., Teoria i algorytmy sterowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
6. Passino K. M., Yurkovich Stephen, Fuzzy control, An Imprint of Addison – Wesley Longman, Inc., California 1998.
7. Yager R. R., Filev Dimitar P., Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1995.

## FUZZY CONTROLLER ABOUT THE PROPERTIES OF THREE-POSITION CONTROLLER

Three-position controllers are the most popular and simplest controllers in automation systems, in which the electric motor working in a reversible manner was used as the executive element. Their important feature is that the control signal has only three different values. Such systems are usually used in industrial solutions where the requirements for the quality of regulation are not high.

At present, with advanced computational techniques available, fuzzy controllers are eagerly used, which on the one hand are more understandable for operators due to the generation of signals directly understandable to humans, and on the other hand enable the achievement of the properties of systems that in classic solutions were not times available.

The paper is an attempt to compare the quality of regulation obtained in a system with a three-position controller and in a system with an approximate fuzzy controller, whose inference rules are the implementation of simplified properties of the three-position controller. The implementation of the three-position characteristic in a fuzzy controller gives a view on new possibilities of using such systems. The paper presents the results of tests performed in the Matlab-Simulink program. They will be the answer, among others: what quality of regulation can be obtained and how can oscillations be reduced.

**Keywords:** fuzzy controller, three-position controller, quality of regulation, comparison of regulators.