

**RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Derugo  
pt. "Sieci Petriego w regulatorach rozmytych",  
przygotowana na zlecenie Prodziekana**

**Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej  
prof. dr. hab. inż. Andrzeja Bartoszewicza.**

**1. Temat i zakres rozprawy**

Oceniana rozprawa poświęcona jest zagadnieniu poprawy właściwości regulatorów rozmytych, a precyzyjniej regulatorów neuronowo-rozmytych, na drodze wprowadzenie do struktury regulatora sieci Petriego. Zakładanym przez Autora efektem tej ciekawej koncepcji ma być poprawa właściwości dynamicznych regulacji w porównaniu z układem wyposażonym w tradycyjny regulator neuronowo-rozmyty oraz a może przede wszystkim zmniejszenie złożoności obliczeniowej algorytmu regulatora. Krótkie sformułowanie tytułu rozprawy nie oddaje w pełni jej zakresu, który lepiej charakteryzuje podany przez Autora cel rozprawy. Polega na opracowaniu i przetestowaniu adaptacyjnych regulatorów neuronowo-rozmytych z dodatkowymi warstwami Petriego, przeznaczonych dla sterowania układami napędowymi o złożonej strukturze mechanicznej, czyli z elastycznym połączeniem silnika z napędzanym mechanizmem oraz możliwymi zmianami momentu bezwładności. Tak wybrany przez Autora obiekt regulacji stawia wysokie wymagania układowi sterowania nad sprostaniem którym pracuje aktualnie wiele ośrodków badawczych na świecie. Jednym ze stosowanych w tych układach rozwiązań są adaptacyjne struktury regulatorów neuronowo-rozmytych. Należy zatem podkreślić, że wybór przykładowego obiektu regulacji jest trafny i stwarza pole do doskonalenia właściwości dedykowanego dla niego układu sterowania przez wprowadzenie dodatkowych warstw Petriego.

Wprowadzenie sieci Petriego do zaawansowanych algorytmów sterowania jest zagadnieniem względnie nowym, które nie doczekało się wielu opracowań w literaturze światowej. Pierwsze pionierskie prace z obszaru zastosowań sieci Petriego w układach sterowania, opublikowane w ostatnich latach, pochodzą z Uniwersytetu w Tajwanie. Z pełnym przekonaniem można stwierdzić, że tematyka ta jest ciągle na etapie intensywnych badań w znanych ośrodkach naukowych na świecie a wiele problemów jest do dzisiaj nie rozwiązanych. Niniejsza rozprawa włącza się więc w ten aktualny nurt badań.

Autor rozprawy dokonuje obszernego przeglądu literaturowego metod sterowania złożonymi układami elektromechanicznymi ze szczególnym uwzględnieniem regulatorów neuronowo-rozmytych

oraz zagadnień stosowania teorii sieci Petriego w takich układach. Na podstawie przeprowadzonej analizy Autor sformułował zakres i cele swej pracy.

Postawione dwie tezy rozprawy brzmią następująco :

*"1. Wprowadzenie do regulatorów rozmytych sieci Petriego prowadzi do poprawy jakości sterowania obiektów o zmiennych parametrach.*

*2. Zastosowanie rozwiązań znanych z sieci Petriego w regulatorach rozmytych o dużej liczbie reguł umożliwia zmniejszenie złożoności obliczeniowej tych układów. "*

Tak postawione tezy i przyjęte cele rozprawy mieszczą się w aktualnej tematyce badawczej, rozwijanej przez wiele ośrodków naukowych. Temat opiniowanej rozprawy jest zatem ulokowany w światowym nurcie badań, jest aktualny i ważny dla rozwoju układów sterowania z regulatorami rozmytymi.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Opiniowana rozprawa obejmuje łącznie 254 strony i podzielona jest na dziewięć rozdziałów, bibliografię i załączniki. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie, charakteryzujące tematykę rozprawy, formułujące tezy rozprawy i określające jej cele. W rozdziale tym Autor dokonuje też przeglądu światowej literatury poświęconej zagadnieniom zastosowań logiki rozmytej w układach sterowania oraz wprowadzania teorii sieci Petriego do takich układów. W rozdziale drugim sformułowano modele matematyczne obiektów sterowania czyli silnika prądu stałego, silnika indukcyjnego ze sterowaniem wektorowym oraz silnika liniowego. W rozdziale trzecim przedstawiono opis regulatora neuronowo-rozmytego w postaci równań macierzowych oraz w formie algorytmicznej. Rozdział czwarty poświęcony jest opisowi struktury sterowania typu MRAS. W rozdziale tym zamieszczono także dowód na stabilność regulatora neuronowo-rozmytego. Rozdział piąty zawiera charakterystykę sieci Petriego, poprzedzoną pewnym rysem historycznym ich rozwoju, oraz podaje przykład działania tych sieci. Rozdział szósty przedstawia przyjętą koncepcję regulatora neuronowo-rozmytego z warstwami Petriego. Omawia możliwe struktury regulatora z warstwami konkurencyjnymi Petriego oraz z warstwami tranzycji Petriego. Analizuje możliwe struktury rekurencyjne regulatora aby w końcowym podrozdziale wytypować do badań jedną wybraną strukturę. Metodę doboru parametrów regulatora opisano w rozdziale siódmym. Obszerny rozdział ósmy zawiera wyniki badań wybranych struktur regulatora. Badania te przeprowadzono na drodze symulacyjnej oraz eksperymentalnej wykorzystując trzy wybrane układy napędowe opisane w rozdziale 2. i podrozdziale 8.2. W rozdziale dziewiątym dokonano podsumowania uzyskanych wyników i sformułowano wnioski końcowe. Rozprawa kończy się wykazem literatury, obejmującym 145 pozycji, oraz zestawem załączników.

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem jednak jest zbyt obszerna jak na rozprawę doktorską. Zawiera podrozdziały o charakterze przeglądowym, takie jak 5.1 czy fragmenty podrozdziałów 6.4.3, 6.4.4 i 6.5. Zbyt obszerny jest też rozdział ósmy, w którym część wyników

badan powtarzanych dla rónnych wariantów układu należałoby zrócznie podsumowaó w nieco krótszej formie. Objętość rozprawy zwiększa te¿ nadmiernie dodanie załącznika A, powtarzającego wyniki badan dla uproszonej metody wyostrzania singletonów oraz załącznika B, zawierającego obszerne tabele liczbowych wartości kryteriów jakości sterowania uzyskanych podczas badan. Wszystko to nadaje ocenianej rozprawie charakter bardziej zbliżony do sprawozdania z wykonanych prac badawczych aniżeli charakter rozprawy doktorskiej. Szczegółowe uwagi odnoszące się do redakcji pracy podano w p. 4 recenzji.

### 3. Główne rezultaty rozprawy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnień badawczych związanych z zastosowaniem sieci Petriego w strukturze regulatora neuronowo-rozmytego, dedykowanego dla układu regulacji prędkości obrotowej złożonego układu elektro-mechanicznego. Rozważono struktury regulatora nieadaptacyjnego i adaptacyjnego z modelem odniesienia (MRAS) oraz struktury rekurencyjne regulatora adaptacyjnego. Na podkreślenie zasługuje całościowe podejście do tematu badawczego, uwzględniające zarówno rozwiązanie zagadnień teoretycznych, obejmujących opis matematyczny i syntezę struktury regulatora, jaki i opracowanie modelu komputerowego do badan symulacyjnych oraz przeprowadzenie obszernych badan eksperymentalnych na trzech stanowiskach laboratoryjnych.

Do najważniejszych oryginalnych wyników rozprawy zaliczyć można:

- Opracowanie koncepcji adaptacyjnego neuronowo-rozmytego regulatora z warstwami Petriego o strukturze jednokierunkowej oraz rekurencyjnej, na co składa się opracowanie wybranych alternatywnych struktur regulatora, sformułowanie odpowiednich algorytmów sterowania oraz zaproponowanie skutecznej metody uczenia ‘on-line’.
- Wykazanie, że wprowadzanie do regulatorów neuronowo-rozmytych konkurencyjnych warstw Petriego prowadzi w większości przypadków do poprawy właściwości dynamicznych sterowanego obiektu. Jest to w szczególności widoczne dla układu z regulatorami o funkcji przynależności zbiorów rozmytych typu Gaussowskiego.
- Wykazanie, że wprowadzenie warstw tranzycji Petriego do regulatora neuronowo-rozmytego zapewnia zmniejszenie złożoności obliczeniowej algorytmu regulatora. Efekt ten jest tym większy im bardziej rozbudowaną bazę reguł przyjmie się dla regulatora.
- Wykazanie, że wprowadzenie struktury rekurencyjnej regulatora zapewnia poprawę wskaźników jakości sterowanie jednak zwiększa znacząco złożoność obliczeniową. W tej sytuacji szczególnie korzystne jest użycie warstw Petriego dla zmniejszenia tej złożoności.
- Przeprowadzenie dowodu stabilności układu zamkniętego z adaptacyjną strukturą sterowania z modelem odniesienia (MRAS).

Przeprowadzenie omówionych rozważań teoretycznych oraz obszernych badań symulacyjnych i eksperymentalnych dowodzi, że Autor posiadał ogólną wiedzę teoretyczną a także i praktyczną w dyscyplinie naukowej Automatyka i Robotyka. Rozwiązał samodzielnie trudne zagadnienia naukowe, sformułował założenia, wybrał i zastosował właściwe metody teoretyczne i doświadczalne oraz udokumentował to wynikami badań zamieszczonymi w rozprawie.

#### 4. Ważniejsze uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Wśród wielu ciekawych i oryginalnych rezultatów rozprawy można zauważyć także pewne zagadnienia dyskusyjne.

- 1) Pierwsza i zasadnicza uwaga odnosi się do zakresu badawczego rozprawy. Postawione dwie tezy rozprawy są bardzo ogólne i nie ukazują przyjętego przez Autora ukierunkowania prac na sterowanie układami elektro-mechanicznymi. Tezy te nie precyzują też jakie struktury regulatorów neuronowo-rozmytych będą przedmiotem badań. Wydaje się, że przyjęty wachlarz badanych struktur regulacyjnych można by z korzyścią dla przejrzystości i zwartości badań zawęzić, np. tylko do struktur adaptacyjnych ewentualnie adaptacyjnych o strukturze rekurencyjnej. Wielość wątków badawczych sprawia, że uporządkowanie i jasne przedstawienie bardzo dużej liczby wyników badań jest trudne. Przy takiej liczbie uzyskanych wyników warto by rozważyć przedstawienie tylko wybranych z nich, najbardziej znaczących i charakterystycznych, a krótkie skomentowanie pozostałych pozostawiając je w dokumentacji dostępnej na życzenie. Obiektem badań jest regulator prędkości obrotowej lub położenia kąтового działający w strukturze hierarchicznej z wewnętrzną pętlą regulacji momentu obrotowego lub siły w przypadku silnika liniowego. Regulator prędkości (położenia) steruje obwodem regulacji momentu (siły) dopasowanym i zoptymalizowanym do wybranego typu silnika elektrycznego. W takiej sytuacji nie jest bardzo istotne jaki silnik użyto w układzie regulacji prędkości czy położenia i dlatego nie bardzo widać potrzebę prowadzenia badań eksperymentalnych dla wybranych trzech typów układu napędowego. Dla regulatora prędkości lub położenia jest to w każdym przypadku podobny obiekt różniący się tylko wartościami stałych czasowych. W rezultacie prowadzi to do nadmiernie dużej liczby wyników badawczych o podobnym charakterze. Badanie wielu wariantów struktury mechanicznej obiektu regulacji z połączeniem sztywnym, z połączeniem elastycznym i zmianami momentu bezwładności na trzech stanowiskach eksperymentalnych ukazuje rzeczywisty zakres tematyczny rozprawy ukierunkowany na sterowanie złożonych układów elektro-mechanicznych. W takiej sytuacji można by się zastanowić, czy tytuł rozprawy nie powinien być nieco zmodyfikowany, jak np. "Zastosowanie sieci Petriego w rozmytych regulatorach prędkości dla złożonych układów elektromechanicznych".

- 2) Autor w kilku miejscach rozprawy stwierdza, że funkcje przynależności zbiorów rozmytych o kształcie funkcji Gaussa zapewniają lepsze właściwości układu sterowania aniżeli funkcje trójkątne jednak stwierdzenie to nie jest nigdzie jasno wykazane. W zestawieniach wyników badań obu tych rozwiązań pokazane są odpowiedzi na różniące się trajektorie wymuszeń, co utrudnia dobre porównanie ich właściwości.
- 3) W przypadku badania regulatora adaptacyjnego o strukturze rekurencyjnej zastosowano, po użyciu warstw Petriego, ponowne dostrajania współczynników wag natomiast nie zastosowano takiej procedury dla regulatorów bez rekurencji, co utrudnia obiektywne porównanie obu tych struktur.
- 4) W rozprawie arbitralnie przyjęto wartości ważnych dla działania układu współczynników adaptacji regulatora  $K_{P\_AD}$  i  $K_{D\_AD}$  (str. 78). Z rozprawy nie wynika czy były prowadzone jakieś wstępne testy wyboru wartości tych współczynników. Wynik takich testów byłby silnym argumentem przekonywującym, że arbitralny wybór współczynników adaptacji był prawidłowy.
- 5) W rozprawie założono ograniczenie zakresu zmian współczynników wagowych w strukturze regulatora bez członu całkującego arbitralnie przyjmując ich wartości (str.61). Czy wybór tych wartości został zweryfikowany jakimiś testami?
- 6) W rozdziale 8.7 przedstawiono wyniki badań złożoności numerycznej badanych struktur regulatora z warstwą tranzycji Petriego. Zaskakujące w prezentowanych wynikach jest to, że złożoność numeryczna dla regulatora z trójkątnymi oraz Gaussowskimi funkcjami przynależności dla układu z i bez warstw tranzycji jest bardzo zbliżona. Wydaje się, że wprowadzenie warstw tranzycji powinno dać znacząco lepszy wynik dla funkcji Gaussowskich.
- 7) Autor zaproponował ciekawą metodę uczenia sieci neuronowo-rozmytej w trybie "on-line" stanowiącą wyniki wcześniejszych prac zespołu badawczego, w którym pracuje, nie cytując odpowiednich materiałów źródłowych.
- 8) Wyniki przeprowadzonych badań oceniano w rozprawie na podstawie wybranych kryteriów całkowych (str. 82) oraz na podstawie przebiegów czasowych wybranych wielkości układu sterowania. Otóż te przebiegi czasowe przedstawione są na rysunkach o bardzo małym rozmiarze a ponadto w skali czasu rzędu sekund. Wszystko to sprawia, że trudno jest na ich podstawie precyzyjnie porównać uzyskane rezultaty. Wydaje się, że wybrane najistotniejsze charakterystyczne fragmenty przebiegów powinny być powiększone i umieszczone w dodatkowym oknie na tym samym rysunku.

- 9) Nie wiadomo z jakiego powodu zastosowano w procesie dostrajania (ponownego dostrajania) współczynników rekurencyjnego regulatora adaptacyjnego (rozd. 8.9) równocześnie dwie metody optymalizacji PS (*Pattren Search*) i PSO (*Particle Swarm Optimization*).
- 10) Po zapoznaniu się z głównymi wynikami rozprawy nazywa się pewna uwaga natury ogólnej. Jak wytłumaczyć racjonalnie, że po usunięciu, w wyniku działania warstw Petriego, pewnych reguł z dobrze dobranej bazy reguł regulatora neuronowo-rozmytego, czyli zubożeniu jego bazy reguł, układ działa lepiej? Czyżby znaczyło to, że pierwotna baza nie była wybrana optymalnie?

#### **Uwagi redakcyjne.**

Praca jest napisana poprawnym językiem jednak przy tej objętości tekstu można znaleźć szereg usterek natury redakcyjnej. Na kilka z nich zwrócono uwagę.

- Przebiegi czasowe analizowanych wielkości pokazane na rysunkach nie zawsze są jasno opisane, np. brak informacji jaki kolor co oznacza;
- Oznaczenia (skrót) w tabelach 27 i 28 są inne niż na odpowiadających im rysunkach 8.73 i 8.74 (TL a WTP, *triangle* a trójkąt);
- Oznaczenia (skrót) w tabelach 29 i 30 są inne niż na odpowiadających im rysunkach 8.75 i 8.76 (TL a WTP, *triangle* a trójkąt);
- Brak w tekście komentarza do rysunków 8.98 – 8.104;
- Stwierdzenie na stronie 170 (wiersz 10g) “Struktura DFOC działa poprawnie.” nie donosi się do prowadzonych w rozprawie badań;
- Opis jednego z bloków na rys. 8.1 (str. 81) “amperomierz” nie jest chyba trafny;
- Str. 78, wiersz 12d, jest “...żądana...” a powinno być “...żądaną...”;
- Str.116, wiersz 10g, jest “Na rys. 8.18 pokazują ...” a powinno być “Na rys. 8.18 pokazano ...”;
- Str. 160, wiersz 9g, jest “...koniczne...” a powinno być “...konieczny...”;
- Str. 162, ostatni akapit u dołu strony, pomyłono numerację opisywanych rysunków (8.92 – 8.95);
- Str. 168, wiersz 5g, zły numer rysunku (rys. 10 ?);

Przedstawione wyżej uwagi mają w głównej mierze charakter porządkujący i dyskusyjny i nie umniejszają głównych wyników rozprawy.

#### **5. Wniosek końcowy**

Opiniowana rozprawa mgr. inż. Piotra Derugo pt. “Sieci Petriego w regulatorach rozmytych” stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie ważnego oraz złożonego teoretycznie problemu

badawczego. Słabą stroną rozprawy stanowi jej zbyt obszerny zakres merytoryczny skutkujący dużą liczbą wyników badań trudną do zwięzłego i jasnego przedstawienia, co opisano w uwagach krytycznych pkt. 1. Wydaje się to świadczyć o pewnej małej umiejętności precyzyjnego a jednocześnie syntetycznego przedstawiania wyników badań przez Autora. Mimo tego, mając na względzie wartościowe wyniki uzyskane w ocenianej rozprawie uważam, że spełnia ona w stopniu dostatecznym wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i dlatego należy uznać ją za rozprawę doktorską i dopuścić do publicznej obrony.

