

Szczecin, 27.06.2016 r.

Prof. dr hab. inż. Stefan Domek
Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Derugo
„Sieci Petriego w regulatorach rozmytych”

wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki,
Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA, ZAKRES I CEL ROZPRAWY

Jednym z obszarów wiedzy, wzbudzającym od niemal 50 lat duże zainteresowanie teoretyków i praktyków automatyki, jest wykorzystanie praw logiki rozmytej w sterowaniu. Regulatory, kompensatory i modele rozmyte i rozmyto-neuronowe pozwoliły rozwiązać wiele praktycznych problemów charakterystycznych dla układów regulacji trudnych obiektów. Niestety, w przypadku obiektów nieliniowych ich złożoność numeryczna bardzo wzrasta co prowadzi do trudności implementacyjnych, zwłaszcza w przypadku rozwiązań adaptacyjnych. Aby wykorzystać potencjał sterowania neuronowo-rozmytego konieczne jest więc opracowanie nowych struktur regulatora lub ich uzupełnienie o dodatkowe mechanizmy wspierające efektywność działania przy zachowaniu akceptowalnej złożoności obliczeniowej.

Autor rozprawy postanowił wykorzystać w tym celu Sieci Petriego, ujmując sformułowane zadanie w postaci dwu odrębnych celów naukowo-badawczych, mających udowodnić dwie tezy:

- po pierwsze postanowił opracować nowe, adaptacyjne, neuronowo-rozmyte systemy sterowania uzupełnione o dodatkowe warstwy Petriego i wykazać, że prowadzi to do poprawy właściwości dynamicznych w relacji do klasycznych struktur regulatorów rozmytych,
- po drugie postanowił wykazać, że proponowane uzupełnienie o warstwy Petriego prowadzi do istotnego zmniejszenia złożoności obliczeniowej w stosunku do klasycznych struktur regulatorów rozmytych.

Proponowane rozwiązania postanowił zweryfikować przy pomocy badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych wybranych układów napędowych

Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej z tego zakresu było celowe i potrzebne, zarówno ze względów poznawczych jak i praktycznych a postawione cele określają istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy, a zarazem oryginalne, zadanie badawcze.

Warto podkreślić, że praca finansowana była przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu 2011/03/B/ST7/02517 „Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach”.

2. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa jest bardzo obszerna – liczy 254 strony, zawiera 160 rysunków oraz 80 tabel. Podzielona jest na dziesięć rozdziałów, w tym spis literatury, poprzedzonych wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów – łącznie 191 stron i uzupełnionych dwoma załącznikami z opisem przebiegu i wyników wybranych badań symulacyjnych oraz z zestawieniem tabel z wartościami liczbowymi uzyskanych kryteriów jakości sterowania.

W rozdziale pierwszym, oprócz celu, zakresu i założeń pracy, Autor przedstawił aktualny stan badań nad rozwojem układów sterowania rozmytego, zwłaszcza w kontekście wykorzystania w nich elementów Sieci Petriego.

W kolejnych czterech rozdziałach Autor przypomniał w sposób uporządkowany ogólnie znane zagadnienia będące podstawą dalszych rozważań. I tak:

– w rozdziale drugim opisał przyjęte do późniejszych badań symulacyjnych modele matematyczne silnika obcowzbudnego prądu stałego, silnika indukcyjnego oraz silnika liniowego z magnesami trwałymi, jak również przypomniał znane struktury sterowania takimi silnikami. Zaprezentował też przyjęte modele części mechanicznej układu napędowego dla przypadku połączenia sztywnego (jednomasowego) oraz dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym. We wszystkich przypadkach założono użycie w wewnętrznej pętli regulacji regulatora prądu typu PI a w nadrzędnej pętli proponowanych regulatorów neuronowo-rozmytych,

– w rozdziale trzecim opisał dwa równoważne opisy neuronowo-rozmytych układów wnioskowania: opis macierzowy oraz sieciowy, bardziej przydatny do analizy wpływu poszczególnych sygnałów na wartość sterowania,

– w rozdziale czwartym przypomniał strukturę układu adaptacyjnego sterowania neuronowo-rozmytego z modelem referencyjnym (ang. Model Reference Adaptive System, MRAS) oraz przedstawił opis algorytmu adaptacji współczynników wagowych regulatora uzupełniony o analizę jego stabilności w sensie Lapunowa,

– w rozdziale piątym przedstawił bogatą w odwołania do prac źródłowych historię rozwoju teorii Sieci Petriego, opisał model matematyczny sieci oraz wyjaśnił zasadę jej działania na przykładzie zaczerpniętym z literatury.

Zasadniczą, oryginalną część rozprawy stanowią rozdziały od szóstego do dziewiątego, w których Autor przedstawił proponowane sposoby implementacji elementów Sieci Petriego w nieadaptacyjnych i adaptacyjnych regulatorach neuronowo-rozmytych, dokonał analizy ich skuteczności i złożoności numerycznej oraz przeprowadził obszerne badania symulacyjne i eksperymentalne, uzupełnione o krytyczną analizę uzyskanych wyników. I tak:

– w rozdziale szóstym, moim zdaniem najważniejszym dla całej rozprawy, Autor najpierw (w podrozdziale 6.2) opisał szczegółowo proponowane miejsca implementacji konkurencyjnych warstw Petriego w regulatorze bez adaptacji: przed warstwą przesłanek (na dwa sposoby), pomiędzy warstwami wyznaczenia stopni spełnienia przesłanek i konkluzji oraz za warstwą konkluzji. Następnie opisał strukturę regulatora adaptacyjnego MRAS, analizując trzy dodatkowe

lokalizację warstw Petriego: eliminującą najmniej znaczące wagi adaptacji, wyłączającą poszczególne gałęzie wnioskowania oraz zerującą sygnały współczynników wagowych. Rozważania przeprowadził dla regulatorów typu PD oraz PI z dwoma wejściami, trzema funkcjami przynależności dla każdego z nich oraz dwoma sposobami defuzyfikacji: klasyczną i uproszczoną metodą singletonów.

W podrozdziale 6.3 wskazał na możliwe miejsca implementacji warstw Petriego typu tranzycja, które eliminując przetwarzanie niektórych sygnałów nie zmieniają wynikowego sterowania w porównaniu z warstwami konkurencyjnymi, ale mogą znacząco zmniejszyć nakład obliczeń.

Na koniec, w podrozdziałach 6.4 do 6.6 dokonał analizy możliwości łączenia warstw konkurencyjnych Petriego z różnego rodzaju sprzężeniami (rekurencjami) w systemie wnioskowania regulatora. Autor rozważył kilkanaście możliwych rodzajów rekurencji obejmujących pojedyncze węzły warstw regulatora neuronowo-rozmytego bądź całe warstwy pod kątem ich potencjalnego wpływu na jakość sterowania, skuteczność adaptacji lub złożoność obliczeniową regulatora. Opisał także przyjętą do dalszych badań strukturę adaptacyjnego regulatora rozmytego PID z rekurencją od wyjścia regulatora uzupełnioną o warstwy tranzycyjne Petriego,

– w rozdziale siódmym Autor przypomniał ogólne wytyczne strojenia rozważanych regulatorów neuronowo-rozmytych, również w wersji adaptacyjnej, wskazując na potencjalne trudności wyznaczenia optymalnych parametrów projektowych regulatora oraz podał konkretne wartości parametrów przyjęte podczas badań,

– w rozdziale ósmym, stanowiącym znaczną część pracy, opisał szczegółowo przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymenty laboratoryjne oraz poddał krytycznej analizie uzyskane wyniki. Najszersze badania Autor wykonał na drodze symulacyjnej w środowisku Matlab-Simulink z wykorzystaniem omówionych wcześniej modeli układów napędowych. Sprawdził w nich wszystkie omówione struktury regulatora neuronowo-rozmytego, z adaptacją i bez, z warstwami konkurencyjnymi i tranzycyjnymi Petriego umieszczonymi we wszystkich możliwych, opisanych wcześniej lokalizacjach. Symulacje przeprowadził dla sześciu różnych trajektorii odniesienia, ze stałym i zmiennym momentem obciążenia stosując cztery całkowite kryteria oceny jakości sterowania, osobno dla prędkości obrotowej i prądu.

Dla celów badań eksperymentalnych Autor zaimplementował układ sterowania czasu rzeczywistego w środowisku Matlab-Simulink uzupełnionym o kartę szybkiego prototypowania dSpace DS1103. W zależności od rodzaju badania wykorzystywał silnik prądu stałego sterowany poprzez mostek typu H z dodatkowym silnikiem obciążającym, silnik liniowy zasilany falownikiem z możliwością zmiany obciążenia zewnętrznego lub dwa silniki indukcyjne (jeden jako obciążenie) zasilane przez przemienniki częstotliwości.

Szczegółowy opis wszystkich badań i uzyskane wyniki Autor zestawił w podrozdziałach 8.3 do 8.10. W podrozdziale 8.7 dodatkowo zbadał na drodze symulacyjnej złożoność numeryczną regulatora z warstwą tranzycji Petriego dla układu dwumasowego z silnikiem prądu stałego a w podrozdziale 8.10 opisał precyzyjnie przebieg i wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych układu adaptacyjnego z obiektem, w którym zmianie w czasie pracy ulegał moment bezwładności maszyny roboczej.

Dużym walorem pracy jest bardzo szczegółowa prezentacja uzyskanych wyników. Oprócz przebiegów czasowych pokazanych na licznych rysunkach, Autor zestawiał wszystkie uzyskane wskaźniki jakości dla każdego badania w ponad trzydziestu wielobarwnych tabelach. Zaproponowana kolorowa metoda prezentacji pozwoliła na szybką, jednak tylko jakościową ocenę skuteczności poszczególnych regulatorów,

– w rozdziale dziewiątym Autor podsumował zawartość pracy, przebieg badań i uzyskane wyniki. Sformułował również liczne wnioski natury ogólnej i szczegółowej oraz wskazał na możliwe dalsze kierunki badań.

W zakończeniu rozprawy podał spis literatury obejmujący 145 pozycji, w większości trafnie dobranych i poprawnie cytowanych w tekście rozprawy. 15 pozycji stanowią ściśle związane z tematyką rozprawy prace autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, co świadczy o Jego dużej aktywności badawczej i umiejętności prezentowania własnych dokonań naukowych.

Mimo dużej objętości rozprawy, zapewne biorąc pod uwagę tysiące przeprowadzonych eksperymentów, Autor postanowił dołączyć do pracy dwa załączniki:

– w załączniku A zebrano wyniki badań analogicznych do omówionych w podrozdziałach 8.8 i 8.9 z regulatorami, w których zaimplementowano defuzyfikację uproszczoną metodą singletonów,

– w załączniku B zebrano wartości liczbowe wskaźników jakości uzyskanych w trakcie badań omówionych w głównej części rozprawy, przedstawionych tam jedynie w formie kolorowych znaków wartościujących typu: bez zmian (żółty), gorszy (czerwony), lepszy (zielony). Analiza zawartości tabel zamieszczonych w tym załączniku daje pełniejszy obraz uzyskanych efektów.

3. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY

Autor rozprawy zrealizował postawione cele w sposób kompleksowy, przejrzysto przywołując źródła inspiracji i założenia proponowanych metod. Wykazana znajomość literatury przedmiotu, obszerność rozważań, ogromna liczba eksperymentów i krytyczna ocena uzyskanych wyników zasługują na pochwałę i stanowią moim zdaniem główne osiągnięcie Autora.

Do pozostałych ważnych dokonań Doktoranta zaliczam:

1. systematyczny i przejrzysty opis podstaw teoretycznych sterowania neuronowo-rozmytego i Sieci Petriego wraz z krytyczną dyskusją możliwości ulokowania warstw konkurencyjnych i tranzycyjnych Petriego w strukturze regulatora bez adaptacji,
2. zaproponowanie neuronowo-rozmytego regulatora adaptacyjnego MRAS wykorzystującego elementy Sieci Petriego w warstwie adaptacji,
3. analizę teoretyczną wpływu typu i miejsca ulokowania warstw Petriego w regulatorze na jego złożoność numeryczną,
4. opracowanie modeli symulacyjnych układów napędowych z trzema rodzajami silników (obcwozbudnym prądu stałego, liniowym z magnesami trwałymi oraz indukcyjnym ze

sterowaniem wektorowym polowo zorientowanym) oraz dwoma rodzajami połączeń mechanicznych (sztywnym jednomasowym oraz sprężystym dwumasowym),

5. stworzenie oprogramowania symulacyjnego i oprogramowania systemu czasu rzeczywistego w środowisku Matlab-Simulink,
6. przeprowadzenie licznych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym z sumienną analizą uzyskanych wyników i sformułowaniem wniosków.

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka uwag, o charakterze częściowo dyskusyjnym, ale wartych komentarza Doktoranta:

1. Twierdzenie na str. 31 i jego dowód zapisane zostały z małą precyzją, na przykład zapis $0 < \lambda(N) \leq (e^2(N)/\delta_0^2 + \varepsilon_0)$ nie jest tożsamy zapisowi we wzorze 4.15; z czego wynikają różnice na graniczną wartość współczynnika adaptacji wag podane w twierdzeniu: $\gamma(N)^* = \lambda(N)/3R_d$, w jego dowodzie: $\gamma(N)^* = \lambda(N)/R_d$ i tekście pracy: *np.* $50\%\gamma$?
2. z czego wynika niesymetria w szablonowej, jak pisze Autor, bazy reguł przedstawionej w Tabeli 7.2 na str. 78?
3. w tytule podrozdziału 6.6 na str. 73 zasygnalizowano użycie warstwy konkurencyjnej Petriego a w tekście oraz na rys. 6.16 rozważa się warstwy tranzycyjne; podobnie w podrozdziale 8.9 pisze się o badaniach regulatora z warstwami tranzycyjnymi. Czy badano regulatory z dwoma rodzajami warstw Petriego czy skorzystano z równoważności wynikowej obu typów warstw Petriego, o której Autor pisze na str. 49?
4. na str. 84 oraz 183 Autor pisze, że badania symulacyjne wykazały, iż warstwa konkurencyjna k_6 sieci Petriego w regulatorze adaptacyjnym nie posiada dużego potencjału, jeśli idzie o poprawę wskaźników jakości sterowania. Moim zdaniem z rys. 6.3 na str. 43 bezpośrednio wynika, że może ona jedynie pogorszyć jakość nie zmniejszając przy tym nakładu potrzebnych obliczeń, ponieważ może wyeliminować znaczną część wyników obliczeń składowych sygnału sterującego. Jeśli założyć, że wcześniejsze warstwy regulatora zostały dobrane poprawnie to ich eliminacja na końcu nie wydaje się sensowna. Podobną uwagę można sformułować dla warstwy k_4 (w wersji nieadaptacyjnej) lub k_7 (w wersji adaptacyjnej). Zbliżone wnioski formułuje Autor na str. 49 pracy. Czy przeprowadzone, ale nie pokazane symulacje potwierdzają taką opinię?
5. Autor wielokrotnie pisze, że złożoność numeryczna konkretnej wersji regulatora neuronowo-rozmytego zależy m.in. od liczby wejść (*np.* str. 73), liczby i kształtu funkcji przynależności (*np.* str. 76) oraz od maksymalnej liczby reguł pozostałych w aktywności w wyniku działania warstwy tranzycyjnej Petriego a więc od wartości argumentów wejściowych funkcji (*np.* str. 57). Wartości podane w Tabeli 2 na str. 59 oraz wyniki opisane w podrozdziale 8.7 potwierdzają korzystne właściwości proponowanych algorytmów dla konkretnej struktury regulatora. Czy można jednak, zdaniem Autora, określić z góry zysk obliczeniowy dla konkretnej realizacji algorytmu, skoro w wyprowadzonych wzorach występują liczby aktualnie aktywnych elementów w każdej iteracji algorytmu?

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem oraz bardzo starannie zredagowana, choć zauważyć można liczne drobne błędy literowe oraz edytorskie, na przykład:

1. *pętla ta może być rozpatrywany jako i cewkami* na str. 17, *jest opisem macierzowy* na str. 23, *było by i nie rozsądnym* na str. 31, *Holt'a, Jack'a, Dennis'a* na str. 33, *P_5 jest węzłem wyjściowym dla T_2* na str. 36, *regulatorów nieadaptacyjny* w tytule podrozdziału 6.2.4 na str. 44, *z typu PD na typ* na str. 65, *w takim rozwiązaniu* na str. 66, *największe uzasadnienie stosowanie* na str. 73, *wartości adaptacyjny regulatora* na str. 147, *różnego rodzaju warunku aktywacji* na str. 183,
2. we wzorach 2.2 i 2.3 na str. 9 użyto niewłaściwych symboli na oznaczenie prędkości kątownej Ω i strumienia wzbudzenia silnika Φ_f ,
3. na str. 35 Autor pisze, że polską nomenklaturę terminów dotyczących Sieci Petriego zaczerpnął z anglojęzycznej pozycji [75] wykazu literatury,
4. na rys. 5.4c na str. 37 najprawdopodobniej źle oznaczono położenie tokena na pozycji P_7 ; podobnie na rys. 5.5 na str. 38,
5. na rys. 6.13 na str. 63 nie zaznaczono rekurencji typu η i θ ,
6. w tabelach 27 do 30 na str. 157 i 158 użyto opisów w języku angielskim,
7. w Załączniku B na str. 230, w tekście, w opisach tabel i w samych tabelach pomyłono numery przywołanych tabel,
8. z niewiadomych powodów w pracy zastosowano niespójny system numerowania rysunków (numeracja w ramach rozdziału) i tabel (numeracja ciągła w ramach całej pracy) co przy tak dużej objętości pracy utrudnia jej lekturę.

Zauważone błędy w żadnym stopniu nie obniżają mojej wysokiej oceny rozprawy.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W moim odczuciu rozprawa ma wybitnie poznawczy charakter i pokazuje potencjalne możliwości wykorzystania elementów Sieci Petriego w regulatorach neuronowo-rozmytych. Nie daje jednak jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy korzyści z takiego podejścia w porównaniu z prostszymi wersjami algorytmów, bez warstw Petriego, uzasadniają w ogólności sens jego stosowania. Widać to chociażby po pobieżnym przeglądzie bardzo ciekawych kolorowych tabel, w których często dominuje kolor żółty oznaczający brak poprawy, czy wręcz czerwony oznaczający pogorszenie jakości sterowania. Jeśli dodatkowo przeanalizuje się wyniki zamieszczone w Załączniku B to okaże się, że często kolor zielony oznaczający poprawę jakościową, w kategoriach ilościowych oznacza poprawę o kilka procent lub wręcz o ułamki procent.

Powyższe stwierdzenie nie jest w żadnym przypadku wadą pracy zwłaszcza, że Autor dostrzega te problemy w podsumowaniu. Stąd Jego dokonania przedstawione w rozprawie uważam za oryginalne i stanowiące zauważalny wkład w wykorzystanie teorii Sieci Petriego

w automatyce. Autor rozprawy wykazał, że posiada niezbędną wiedzę w zakresie dyscypliny *automatyka i robotyka* oraz że ma duże predyspozycje do prowadzenia badań naukowych, wcześniej potwierdzone publikacjami autorskimi wymienionymi w wykazie literatury. Zadanie naukowe określone w tytule i celach rozprawy zostało przez Niego jasno sformułowane a następnie poprawnie rozwiązane przy użyciu właściwych metod matematycznych oraz potwierdzone na drodze symulacji wykonanych przy pomocy nowoczesnych narzędzi numerycznych i badań eksperymentalnych przeprowadzonych w laboratorium z użyciem kilku różnych układów napędowych.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr. inż. Piotra Derugo pt. *Sieci Petriego w regulatorach rozmytych* spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) stawiane rozprawom doktorskim, jak również kryteria zwyczajowo przyjęte w tym zakresie w krajowym środowisku naukowym w dyscyplinie *automatyka i robotyka*, i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

