dr hab. inż. Remigiusz Wiśniewski, prof. UZ
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Uniwersytet Zielonogórski

Zielona Góra, 10.08.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Markiewicza
Hierarchiczna rozmyta interpretowana sieć Petriego

(podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Rzeszowskiej z dnia 9 czerwca 2021r.)

1. Obszar problemowy rozprawy

Sieć Petriego jest efektywnym narzędziem modelowania systemów sterowania współbieżnego, łączącym podejście formalne (opis matematyczny) z reprezentacją graficzną. Modelowany system współbieżny może zostać w łatwy i intuicyjny sposób zobrazowany za pomocą grafu dwudzielnego składającego się z miejsc, tranzycji oraz łączących je łuków, który jednocześnie posiada odwzorowanie matematyczne. Takie podejście pozwala na zastosowanie metod analizy, weryfikacji oraz walidacji systemu już na etapie jego specyfikacji. Dlatego też sieci Petriego stały się bardzo popularne w specyfikacji systemów sterowania w różnych dziedzinach życia, zarówno w nauce, jak i przemyśle - od modelowania procesów biologicznych oraz chemicznych, poprzez specyfikację procesów biznesowych, aż po prototypowanie systemów produkcyjnych oraz systemów informatycznych.

Z drugiej strony, klasyczna definicja sieci Petriego posiada istotne ograniczenia, które w wielu przypadkach uniemożliwiają skuteczne zastosowanie tego aparatu do właściwej specyfikacji systemu. Przykładowo, klasyczne sieci Petriego nie posiadają interfejsów wejść/wyjść, wobec czego system nie jest w stanie komunikować się z otoczeniem. Dlatego też powstały rozszerzenia klasycznych sieci Petriego, takie jak np. interpretowana sieć Petriego (ang. *Interpreted Petri Net*, IPN), czy rozmyta interpretowana sieć Petriego (ang. *Fuzzy Interpreted Petri Net,* FIPN), w której mogą zostać wykorzystane sygnały analogowe.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Michała Markiewicza wpisuje się w aktualny nurt modelowania systemów informatycznych za pomocą sieci Petriego. Doktorant zaproponował nowatorską koncepcję hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego (ang. *Hierarchical Fuzzy Interpreted Petri Net,* HFIPN), która pozwala modelować złożone systemy informatyczne, zorientowane na zastosowanie praktyczne. Tego typu podejście wydaje się słuszne, gdyż wykorzystuje synergię potencjałów klasycznej sieci Petriego (możliwość zastosowania formalnych metod analizy, weryfikacji, walidacji) oraz sieci rozmytej (sygnały analogowe), wzbogacając je o możliwość specyfikacji hierarchicznej. Wydaje się, że podejście

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. Ignacego Łukasiewicza
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI
35-959 Rzeszów, ul. W. Pola 2
tel. 17 865 1289, 1764

WPŁYNĘŁO
12. SIE. 2021

hierarchiczne może w znaczący sposób usprawnić proces projektowania systemu informatycznego, zarówno na etapie specyfikacji (choćby ze względu na mniejszą liczbę elementów do rozmieszczenia na danym poziomie hierarchii), jak i analizy (każdy moduł może zostać zweryfikowany osobno).

Uwzględniając powyższe uważam, że temat recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Markiewicza jest interesujący, aktualny i ważny technicznie. Teza oraz cele naukowe pracy zostały precyzyjne sformułowane, a stopień złożoności, znaczenie naukowe i zakres zadań odpowiadają ustawowym i zwyczajowym wymogom stawianym rozprawie doktorskiej.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa stanowi spójną tematycznie całość. Składa się z 9 rozdziałów wraz ze wstępem i podsumowaniem. Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 4 i 5 poświęcone hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego.

Część wstępna, obejmująca trzy początkowe rozdziały, formułuje hipotezę, cele oraz zakres badawczy, a także przedstawia podstawy dotyczące sieci Petriego (z uwzględnieniem sieci hierarchicznych oraz rozmytych) wraz z krótkim przeglądem literatury. Teza, cele oraz zakres pracy zostały precyzyjnie sformułowane. Czytelnik nie ma wątpliwości, co Autor chce zbadać i jakie metody naukowo-badawcze zastosować.

Rozdział 4 poświęcono hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego. Autor formalnie zdefiniował HFIPN, wprowadzając koncepcję sieci hierarchicznej zawierającej makromiejsca z jednym miejscem wejściowym i wyjściowym. Na podkreślenie zasługują matematyczne opisy i notacje sieci HFIPN (wraz z jej reprezentacją algebraiczną), które przedstawiono w sposób bardzo precyzyjny i jednocześnie przystępny. Reprezentacja algebraiczna HFIPN poparta jest wnikliwą analizą formalną sieci (określenie macierzy incydencji sieci, wyznaczenie wektora znakowania następniczego, itp.). Zagadnienia prezentowane w rozdziale 4 są podstawą rozdziału 5, w którym rozszerzono koncepcję HFIPN. Wprowadzono ideę instancji makromiejsc, a także możliwość specyfikacji podsieci z wieloma miejscami wejściowymi, wyjściowymi oraz wejściowo-wyjściowymi. W mojej opinii tego typu usprawnienia mogą bardzo istotnie wpłynąć na modelowanie złożonych systemów informatycznych, dlatego też uważam je za najbardziej wartościowe w pracy. Podobnie jak w przypadku poprzedniego rozdziału, prezentowane koncepcje są poparte reprezentacją algebraiczną. W tym miejscu kolejny raz należy podkreślić przemyślany oraz usystematyzowany sposób przedstawiania formalnych zapisów matematycznych. Prezentowane definicje i notacje pomimo dużego stopnia złożoności są czytelne i klarowne. Uważam, że wprowadzone definicje, notacje, funkcje oraz spostrzeżenia stanowią bardzo cenny wkład naukowy. Z drugiej strony, niewielkim mankamentem jest brak formalnych twierdzeń oraz dowodów dotyczących tych zagadnień (np. poprawności sposobu sumowania podsieci i jej podzbiorów, na czym bazują funkcje 5.4-5.16). Natomiast niewątpliwym plusem jest ilustracja omawianych aspektów za pomocą adekwatnych przykładów.

Rozdziały 6, 7 oraz 8 zorientowane są na praktyczne zastosowanie hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego. W rozdziale 6 wprowadzono koncepcję programowego modelu HFIPN, który m.in. łączy zalety hierarchicznej rozmytej sieci interpretowanej (hierarchia, sygnały analogowe) z możliwością automatycznego generowania kodu wykonywalnego. Formalnie zdefiniowano programowy model HFIPN oraz przedstawiono algorytmy umożliwiające generowanie tego modelu. Rozdział 7 omawia obiektowy model HFIPN, który jest zorientowany na praktyczną implementację w sterownikach logicznych. Z kolei rozdział 8 omawia symulator HFIPN-SML, umożliwiający graficzną specyfikację oraz symulację hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego. Pracę kończy rozdział 9, w którym Autor podsumował rozprawę oraz przedstawił możliwe kierunki dalszych prac.

Zastosowanie hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego w modelowaniu systemów informatycznych uważam za bardzo interesującą propozycję i jednocześnie ciekawą alternatywę dla istniejących rozwiązań. Za najważniejsze, oryginalne elementy rozprawy uważam:

- Zaproponowanie koncepcji hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego zawierającej makromiejsca z jednym miejscem wejściowym i wyjściowym;
- Zaproponowanie koncepcji hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego umożliwiającej wykorzystanie instancji makromiejsc oraz stosowanie podsieci z wieloma miejscami wejściowymi, wyjściowymi oraz wejściowo-wyjściowymi;
- Opracowanie reprezentacji algebraicznej dla obu powyższych koncepcji;
- Opracowanie strukturalnego oraz obiektowego modelu hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego;
- Opracowanie metod umożliwiających automatyczne generowanie kodu na podstawie modelu hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego;
- Opracowanie oraz realizację symulatora umożliwiającego modelowanie oraz symulację hierarchicznej rozmytej interpretowanej sieci Petriego.

Podsumowując ten fragment recenzji stwierdzam, że cele pracy zostały osiągnięte.

Rozprawa doktorska ma również swoje słabe strony i pewne niedociągnięcia, które podzieliłem na dwie części, grupując je w postaci uwag krytycznych oraz uwag szczegółowych. Jednocześnie chciałbym wyraźnie zaznaczyć, że sekcja „uwagi krytyczne" ma charakter dyskusyjny i dotyczy moich wątpliwości oraz pytań pojawiających się w trakcie czytania rozprawy.

3. Uwagi krytyczne, wątpliwości, pytania

1. Strona 28, pierwszy akapit: „*Na podstawie przytoczonej w poprzednich podrozdziałach literatury można dojść do wniosku, że samo zastosowanie hierarchii w PN nie przyśpieszy oraz nie* ***zwiększy efektywności działania*** *systemu*" – co Autor rozumie poprzez „zwiększenie efektywności działania" systemu? Podobnie, w kolejnym zdaniu: „*Jednak użycie hierarchii poprzez podzielenie systemu na komponenty, osobną ich analizę, modyfikację oraz symulację może wpłynąć na* ***polepszenie jakości*** *jego* ***działania***." – co jest rozumiane poprzez „polepszenie jakości działania" systemu? Jakie są kryteria efektywności oraz jakości systemu?
2. Definicje, notacje, funkcje oraz spostrzeżenia wprowadzone w rozdziałach 4 oraz 5 stanowią wg mnie bardzo cenny wkład naukowy. Jednakże brakuje formalnych twierdzeń oraz dowodów dotyczących tych zagadnień, np. dowodu poprawności sposobu sumowania podsieci i jej poszczególnych podzbiorów, na czym bazują funkcje 5.4-5.16.
3. Rozdział 4.2 przedstawia sposób utworzenia sieci hierarchicznej (makromiejsc) poprzez dekompozycję. Ponieważ problem dekompozycji wiąże się z odpowiednim podziałem sieci na komponenty, jego automatyzacja (algorytmizacja) zazwyczaj związana jest z wykładniczą złożonością obliczeniową w celu uzyskania optymalnego podziału. Czy istnieją algorytmy wspomagające automatyzację tego procesu dla sieci prezentowanych w rozprawie? Jaka jest ich złożoność obliczeniowa?
4. W rozdziale 4.5 (strona 53) napisano, że „*Zaproponowane rozwiązanie* [tzn. model sieci hierarchicznej – dopisek RW] *(...)* ***upraszcza realizację i walidację*** *złożonych systemów sterowania, ponieważ umożliwia podzielenie sieci na mniejsze fragmenty i ich analizę.*" Wg mnie jest to mocno dyskusyjne stwierdzenie, które powinno zostać poparte zarówno poprzez badania analityczne (algorytmy, twierdzenia, dowody), jak i eksperymentalne (przeprowadzone z zastosowaniem zbioru reprezentatywnych sieci testowych).
5. Kontynuując temat analizy sieci Petriego, w rozdziale 8.3 („Badanie właściwości sieci", strona 136) stwierdzono, że „*W symulatorze HFIPN-SML dynamiczne właściwości sieci mogą zostać zbadane poprzez użycie grafu osiągalności (RG, ang. Reachabality Graph). W celu utworzenia RG algorytm generujący go traktuje sieć rozmytą jak binarną, aby uniknąć eksplozji stanów*". W jaki sposób konwersja sieci rozmytej do sieci binarnej pozwala uniknąć problemu eksplozji stanów? Dalej, podobne stwierdzenie pojawia się na stronie 82: „*W przypadku użycia grafu osiągalności dla sieci z czujnikami analogowymi potrzebna jest ich zamiana na czujniki binarne, w celu uniknięcia eksplozji stanów.*". W jaki sposób zamiana czujników analogowych na binarne pozwala uniknąć eksplozji stanów?

4. Uwagi szczegółowe

1. W rozprawie brakuje podstawowych definicji oraz notacji związanych z „płaskimi" (zwykłymi) sieciami Petriego. Rozdział 3 od razu omawia rozmytą hierarchiczną sieć Petriego, w której pojawiają się sformułowania wcześniej niezdefiniowane, np. *przygotowanie tranzycji*, *uaktywnienie tranzycji*, *odpalenie tranzycji* (przy okazji: czym różnią się te pojęcia?), itp.
2. Brak rozwinięcia skrótów (PLC, FPGA, itp.).
3. Strona 14, rozdział 1.1, pierwszy akapit: „*W systemach, w których poprawność działania jest bardzo ważna ze względu na zagrożenie życia ludzkiego oraz poniesienie dużych kosztów w wyniku błędu, np. [80, 132, 209], ważne jest zastosowanie matematycznego opisu działania (...)*" – ten fragment jest niepoprawny stylistycznie i jednocześnie niezrozumiały (do czego odnoszą się cytowania)?
4. Strona 21, rozdział 2.2, pierwszy akapit: „*Redukcja jest metodą ułatwiającą udowadnianie właściwości sieci*", tu raczej powinno być: „*Redukcja jest metodą ułatwiającą* ***analizę*** *właściwości sieci*".
5. Strona 27, rozdział 2.6, ostatni akapit: „*Do do makra może zostać wstawiona dowolna liczba znaczników, wynikająca ze struktury podsieci [81, 89, 90], albo tylko jeden znacznik [84].*", powinno być: „***Do makra*** *może zostać* ***przekazana*** *dowolna liczba znaczników, wynikająca ze struktury podsieci [81, 89, 90], albo tylko jeden znacznik [84].*"
6. Strona 31, definicja 3.2, symbol „θ" nie został wcześniej zdefiniowany.
7. Strona 53, rozdział 4.4, brakuje omówienia rysunku 4.12 (wraz z zastosowanymi oznaczeniami). Dlaczego poszczególne makromiejsca zostały określone w taki, a nie inny sposób? (np. wydaje się, że miejsce mp2 może zostać zdekomponowane na dwie kolejne podsieci, odpowiadające przelewaniu cieczy przez poszczególne dozowniki).
8. Strony 72-75 (przykład 5.5), rys. 5.8: pytanie j.w. – dlaczego poszczególne podsieci zostały określone (podzielone) w taki sposób? Czy np. podsieć N_2 (rys. 5.8) może zostać podzielona na dwie kolejne podsieci realizujące funkcjonalność poszczególnych mieszalników? Wydaje się to intuicyjne, co więcej, zastosowanie mogłyby mieć instancje makromiejsc.
9. Strona 79, zdanie „*Spośród różnych klas PN, które są wykorzystywane do tego celu, większość posiada pewne ograniczenia w wizualizacji i sterowaniu.*" jest mocno ogólnikowe: jakiego typu są to ograniczenia i jakich klas dotyczą?
10. Strona 80, zdania „*Następnie zaprezentowane będą struktura HFIPNP* (...)" oraz „*Na koniec przedstawione będą przykład generowania* (...)" są niepoprawne gramatycznie.
11. Strona 112, rozdział 7.2.1, literówka: „*Funckja (6.1)*".
12. Strona 137, rozdział 8.3 jest bardzo ogólnikowy i nieprecyzyjny. Po pierwsze, pokazano, że symulator HFIPN-SML pozwala sprawdzić „wybrane statyczne właściwości statyczne sieci" (tzn. sprawdzić, czy jest siecią czystą, binarną, maszyną stanową, grafem synchronizacji). Dlaczego właśnie te własności są analizowane i jaki

jest ich cel? W jaki sposób przeprowadzana jest analiza? Jaka jest złożoność obliczeniowa zastosowanych algorytmów? Następnie stwierdzono, że „dynamiczne właściwości sieci mogą zostać zbadane poprzez użycie grafu osiągalności". Jest to prawda, istotnie na podstawie grafu osiągalności można zbadać dynamiczne właściwości systemu, lecz wymagane są odpowiednie dalsze operacje (algorytmy). Oczywiście możliwa jest analiza manualna, lecz jest to bardzo kłopotliwe, zwłaszcza w przypadku większych systemów. Kolejna sprawa – brakuje opisu algorytmu generującego graf osiągalności oraz oszacowania złożoności obliczeniowej tej metody (która w przypadku ogólnym jest wykładnicza).

Należy jednoznacznie stwierdzić, że powyższe uwagi szczegółowe wyspecyfikowano z opiniodawczego obowiązku i nie obniżają one wartości merytorycznej rozprawy.

5. Ocena końcowa rozprawy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Markiewicza stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a autorskie osiągnięcia przedstawione w rozprawie wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Recenzowana rozprawa spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, wobec czego wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Remigiusz Wiśniewski