

Lublin, dn. 22 listopada 2020 r.

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik  
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

(na zlecenie Rady Dyscypliny Informatyki Technicznej i Telekomunikacji AGH, uchwała RD.ITiT.WEAIiIB.510-8/19/513/2020)

**TYTUŁ ROZPRAWY: Adaptacyjne algorytmy estymacji sygnałów w systemie monitorowania obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi**

**AUTOR ROZPRAWY: mgr inż. Przemysław Hawro**

**PROMOTOR ROZPRAWY: dr hab. inż. Tadeusz Kwater, prof. PWSTE**

### **1. Ocena poziomu merytorycznego pracy**

Praca doktorska mgr inż. Przemysław Hawro poświęcona jest zagadnieniom kompleksowego monitoringu online obiektów lub procesów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi z zastosowaniem autorskich algorytmów adaptacyjnych o niewielkiej złożoności obliczeniowej. Zawiera ogółem 149 stron, na które składa się 7 rozdziałów, łącznie ze wstępem i wnioskami, wykazem literatury, zawierającym 71 pozycji, wykazem ważniejszych oznaczeń i symboli oraz spisami rysunków oraz tabel. Rozprawa zawiera 96 rysunków i wykresów oraz 30 tabel.

We wstępnym rozdziale Doktorant zaprezentował problematykę badań względem istniejących rozwiązań, w zakresie zagadnień systemów monitorowania i sterowania wybranych procesów na gruncie problemów ekologicznych, będących motywacją podjęcia tematu rozprawy. Dalsza charakterystyka filtru Kalmana, wraz z jego ograniczeniami



i modyfikacjami, a także odniesienie do ważnej klasy algorytmów adaptacyjnych poparte odpowiednią liczbą odnośników literaturowych wskazują, że jest to temat ważny i aktualny.

W dalszej kolejności przedstawiono potrzebę szacowania złożoności obliczeniowej algorytmów, wynikającej z zastosowań w rozwiązaniach mających ograniczenia sprzętowe.

W kolejnym rozdziale sformułowano cel pracy, którym było „**zaprojektowanie, implementacja i przeprowadzenie badań dla algorytmów adaptacyjnych estymujących sygnały w systemie czasu rzeczywistego monitorującym obiekty opisane nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi**”. Do jego realizacji wyszczególniono cele częściowe, obejmujące:

- interpretację modeli matematycznych obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi definiujących zanieczyszczoną biochemicznie rzekę oraz reaktor chemiczny z ciągłym mieszaniem,
- projekt i implementację adaptacyjnych algorytmów na potrzeby monitoringu online dla przyjętych obiektów o złożoności porównywalnej z filtrem Kalmana,
- realizację badań symulacyjnych z zaproponowanymi modelami i algorytmami, uwzględniających:
  - zmienność parametrów i warunków algorytmów,
  - porównanie rezultatów z użyciem wybranych wskaźników jakości,
  - określenie złożoności obliczeniowych implementacji algorytmów w ramach przeprowadzonych symulacji,
- weryfikację funkcjonowania opracowanych algorytmów podczas monitorowania układów, pracujących w czasie rzeczywistym na drodze symulacyjnej.

Zestawienie niniejszych celów i zadań badawczych pozwoliło na sformułowanie tezy: „**Można zastosować zaproponowane algorytmy adaptacyjne o złożoności obliczeniowej mniejszej niż  $O(n^3)$  i wyższej dokładności niż klasyczne podejścia np. filtr Kalmana do monitorowania w trybie *online* obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi**”.

W rozdziale drugim podjęto zagadnienia modelowania matematycznego systemów dynamicznych ukierunkowanych na biochemicznie zanieczyszczoną rzekę oraz reaktor chemiczny z ciągłym mieszaniem, dla których dalej prowadzone były badania symulacyjne z użyciem zaprojektowanych algorytmów. Badane układy opisano za pomocą nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych oraz wykonano dla nich symulacje, zapewniające zestawy danych do porównania działania zaproponowanych algorytmów. Analizowane modele





obiektów charakteryzują się zróżnicowaną dynamiką. O ile w przypadku reaktora chemicznego stała czasowa jest mierzona w sekundach, to w przypadku modelu rzeki wyraża się w dobach. Doktorant wykazał się umiejętnościami praktycznej znajomości modelowania i narzędzi matematycznych.

Problematyka estymacji stanu na rzecz odtwarzania niemierzalnych online sygnałów obiektu została omówiona w rozdziale trzecim. Na podstawie rozwiązań, stanowiących modyfikacje filtru Kalmana wykazane zostały ich ograniczenia i problemy dotyczące szacowania charakterystyki statycznych sygnałów zakłócających. W celu określenia wzmocnienia w równaniu filtracji, uwzględniono opis filtru Kalmana, gdzie występuje potrzeba wyznaczenia macierzy kowariancji błędu estymacji na podstawie nieliniowego równania Riccatiego. W celu zapewnienia precyzyjnego określenia jakości estymacji, zaproponowano i uzasadniono wybór wskaźników jakości: RMSE (*Root Mean Squared Error*) oraz MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).

Rozdział czwarty zawiera charakterystykę autorskich algorytmów. Wśród nich omówiono algorytm strefowy (AS), dla którego dokładność rozwiązań zależy głównie od liczby wprowadzonych stref błędu adaptacji oraz algorytm proporcjonalny (AP) wymagający efektywnego doboru wektora proporcjonalności przy obliczaniu korekty wzmocnienia. Jego rozwinięcie stanowi kolejny algorytm proporcjonalno-różniczkowy (APR) wyznaczania korekty wzmocnienia, dodatkowo biorący pod uwagę pochodną błędu adaptacji. Posiadają one mniejszą złożoność obliczeniową niż filtr Kalmana. Kolejne dwa algorytmy rozwijają możliwości AP i APR o osiągnięcie narzuconych wymagań własności dynamicznych systemu monitorującego, zdefiniowanych jako: algorytm proporcjonalny z zadanymi własnościami dynamicznymi (APWD) oraz algorytm proporcjonalno-różniczkowy z zadanymi własnościami dynamicznymi (APRWD). Wykorzystują one mechanizm zatraskowy, który zapewnia stabilność układu poprzez monitorowanie położenia wartości własnych układu. Wynika to z faktu, że dynamika zmian współrzędnych wektora stanu projektowanego systemu wzrasta wraz ze zmianą odległości wartości własnych od osi urojonej na charakterystykach amplitudowo-fazowych. Dzięki temu, algorytmy APWD oraz APRWD posiadają cechy skutecznego poszukiwania wymaganej dynamiki, zapewniając złożoność obliczeniową zbliżoną do filtru Kalmana.

W rozdziale piątym omówiono problematykę określania złożoności obliczeniowej oraz sformułowano ją dla zagadnień realizujących obliczenia prowadzone z wykorzystaniem zaproponowanych autorskich algorytmów.



W rozdziale szóstym ujęto opis warunków realizacji badań symulacyjnych oraz wybrane rezultaty, uzyskane z wykorzystaniem opracowanych algorytmów. Do zalet proponowanych rozwiązań należy zaliczyć zapewnianą uniwersalność oraz stabilność, ocenioną na podstawie uśrednionych wyników badań, obejmujących różne warianty oddziaływań sygnałów wymuszających, warunków początkowych i zakłóceń. Z kolei, przeprowadzone analizy z wykorzystaniem wskaźników jakości RMSE i MAPE w przypadku wszystkich badanych autorskich algorytmów przewyższały rozwiązania filtru Kalmana. Na uwagę zasługuje fakt poprawy jakości po uzyskaniu lokacji wartości własnych systemu monitorowania w narzuconym obszarze ich położeniu, w rezultacie zastosowania mechanizmu zatraskowego w algorytmach APWD oraz APRWD.

## **2. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej**

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Zaprojektowanie algorytmów adaptacyjnych, znajdujących zastosowanie do znacznej klasy obiektów, charakteryzujących się złożonością obliczeniową, określoną względem filtru Kalmana oraz niewymagających znajomości warunków początkowych a także charakterystyk statycznych zakłóceń systemowych i pomiarowych;
2. Opracowanie metody uzyskania żądanych własności dynamicznych systemu monitorującego przy założeniu określonej złożoności obliczeniowej;
3. Określenie złożoności obliczeniowej dla opracowanych algorytmów;
4. Wdrożenie i przeprowadzenie badań symulacyjnych zaproponowanych modeli oraz autorskich algorytmów na platformie Matlab, z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków oraz wyznaczeniem wartości wskaźników jakości RMSE i MAPE;
5. Przeprowadzenie analizy wyników z wykorzystaniem obranych metod.

## **3. Uwagi krytyczne, pytania**

*Uwagi ogólne:*

1. Autor w opisie określającym wielkość korekty wzmocnień w algorytmach odwołuje się do wiedzy eksperckiej wymaganej przy określeniu: wielkości korekty współczynnika  $\Delta K$  dla stref w algorytmie strefowym, współczynnika proporcjonalności  $k_p$  w algorytmach proporcjonalnych, czy współczynnika różniczkowego  $T_d$  w algorytmach proporcjonalno-różniczkowych. Z prezentowanych wyników badań można



wnioskować, że dokonano wielu eksperymentów w celu określenia tych wartości. Być może dokładniejsze omówienie sposobów doboru tych parametrów byłoby interesujące, z praktycznego i teoretycznego punktu widzenia. Gdyby pracę doktorską rozszerzyć o wyżej wspomnianą problematykę to obejmowałaby ona komplet podpowiedzi niezbędnych przy implementacji tych algorytmów.

2. W części pracy dotyczącej porównania złożoności obliczeniowej zaprojektowanych algorytmów i algorytmu filtru Kalmana dokonano oszacowań złożoności obliczeniowych, z których wynika, że złożoności algorytmu strefowego, proporcjonalnego i proporcjonalno-różniczkowego są rzędu  $O(n^2)$  natomiast algorytmy o zadanych własnościach dynamicznych oraz algorytm Kalmana charakteryzuje złożoność rzędu  $O(n^3)$ . W pracy niestety nie umieszczono czasów obliczeń dla poszczególnych algorytmów, co wraz z zamieszczonymi oszacowaniami złożoności stanowiłoby pełniejszy obraz prowadzonych rozważań (mogłoby to umożliwić wykazanie różnic na korzyść algorytmów o zadanych własnościach dynamicznych w stosunku do algorytmu filtru Kalmana).
3. Pomimo dużej ilości zaprezentowanych wyników eksperymentów symulacyjnych wyczuwa się pewien niedosyt wynikający z tego, że w badaniach rozważano przypadki obejmujące 36 dniowe okresy obserwacji trójodcinkowej rzeki. Można było przeprowadzić eksperymenty dla dłuższego czasu obserwacji i większej ilości dopływów co w większym stopniu wskazywałoby na stabilność proponowanych algorytmów. Mam również nadzieję, że doktorant będzie kontynuował badania w kierunku zachowania się algorytmów przy wystąpieniu braku niektórych pomiarów lub przy dokonywaniu pomiarów rzadkich, czyli nie w każdym kroku pomiarowym.
4. Część pracy, prezentująca wyniki eksperymentów symulacyjnych dotyczących reaktora chemicznego z ciągłym mieszaniem jest znacznie mniej obszerna w porównaniu do przypadku wyników dotyczących zanieczyszczonej biochemicznie rzeki. Niewątpliwie wzbogaceniem pracy byłoby zaprezentowanie większej ilości wyników eksperymentów dotyczących reaktora CSTR. W szczególności nie zaprezentowano eksperymentów z algorytmami o zadanych własnościach dynamicznych dla reaktora chemicznego, pojawia się zatem pytanie jak implementować te algorytmy do tego typu obiektów?
5. W pracy na str. 26 - 30 przedstawiono ideę transformacji równań różniczkowych cząstkowych do zbioru równań różniczkowych zwyczajnych. Idea ta zachowuje dokładność opisu zjawisk w tych modelach, jednak nie podano informacji jak określać

warunki początkowe dla równań różniczkowych zwyczajnych. Można postawić pytanie: czy jest związek, a jeśli jest to jaki, między warunkami granicznymi dla równań różniczkowych cząstkowych a warunkami początkowymi dla równań różniczkowych zwyczajnych?

***Uwagi szczegółowe:***

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Hawro recenzent zgłasza następujące uwagi szczegółowe:

s. 11, w. 13: W pracy napisano „system oparty na systemie operacyjnym Android”. W tym przypadku bardziej właściwym terminem byłby „aplikacja dla systemu operacyjnego Android”.

s. 23, w. 10-12: Dla wskazanych współczynników  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  przyjęto zakresy wartości, lecz nie podano źródła ich ustalenia.

s. 35., w. 6: W pracy użyto termin „pomiarów otrzymujemy w postaci przestarzałej” względem estymacji. Zasadne jest użycie pojęcia „pomiarów nieaktualnych” lub „historycznych”.

s. 41, w. 25: Doktorant użył stwierdzenia, że „określenie wzmocnienia nie zależy od znajomości statystyk sygnałów wymuszających (jak w filtrach Kalmana), które przyjmuje się jako nieznanne zakłócenia”. Zadaniem Filtru Kalmana jest estymacja stanu systemu dynamicznego w oparciu o model tego systemu oraz pochodzące z niego obserwacje. W praktyce, stwierdzenie w jakim stanie znajduje się sterowany system prawie nigdy nie bywa oczywiste. Jest to dokonywane przy użyciu pewnych obserwacji i mechanizmu analitycznego przekształcającego obserwacje w estymatę stanu. W niektórych chwilach  $t$  dostępne są obserwacje  $y_t$  zanieczyszczone przez szum z rozkładu normalnego.

Formalnie, zadanie filtru polega na obliczeniu nieobciążonych estymat stanu systemu na podstawie informacji do chwili  $t$ , najpierw bez uwzględnienia obserwacji, a potem po uwzględnieniu obserwacji, a także macierzy kowariancji obu tych estymat.

s. 50, w. 23: Użyto: „współrzędne stanu obiektu”, powinno być: „współrzędne wektora stanu obiektu”.

s. 69. w.3: Jest: „Jak praktyka wskazuje pomiarów”, powinno być: „Jak wskazuje praktyka pomiarów”.

s. 69. w. 19: Jest: „Model rzeki opisano równaniami różniczkowymi zwyczajnych”, powinno być „... zwyczajnymi”.

s. 83, w. 11: Warto przywołać ww. równanie.



s. 91, w. 14: Doktorant użył pojęcia „odporności algorytmu AP na niedokładność identyfikacji wartości parametrów modelu” nie przeprowadzając analizy odporności.

s. 101, w 15: Termin „nieznacznie lepsze wyniki dla algorytmu APR” jest subiektywnym opisem nietechnicznym.

s. 134, w. 5: Jest „miernikami RMSE i MAPE”, powinno być: „wskaźnikami RMSE i MAPE”

s. 146, Nieprawidłowe oznaczenie poz. 40. w wykazie literatury: brak wydawcy i roku wydania.

W pracy występuje problem z poprawnością interpunkcji. Warto nadmienić, że znaki interpunkcyjne wskazują relacje składniowe, jakie występują między wyrazami, a także oddzielają wtrącenia czy dopowiedzenia.

**Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne (głównie redakcyjne) nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.**

#### **4. Ocena analizy źródeł**

Rozprawa zawiera 71 pozycji literaturowych, numerowanych według kolejności cytowania, z których 36 opublikowane zostały po 2010 roku. Ponadto, 53 źródła bibliografii stanowią artykuły, 15 to monografie. Pomimo zastrzeżeń co do jednorodności formatowania (jak np. w przypadku pozycji 24, 25, 29, 40, 55, 58, 70) literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy.

#### **5. Podsumowanie**

**Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Hawro „Adaptacyjne algorytmy estymacji sygnałów w systemie monitorowania obiektów opisanych nieliniowymi równaniami różniczkowymi” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2004r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej w reprezentowanej przez Doktoranta dyscyplinie. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Przemysława Hawro do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

