



Prof. dr hab. inż. Jacek Kluska
Katedra Informatyki i Automatyki
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 10 stycznia 2017 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Krutysa pt. *“Algorytm adaptacyjnej estymacji wektora stanu z niemierzonymi współrzędnymi dla obiektów o strukturze szeregowej”*

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego – Pana dr hab. inż. Jerzego Pejasia, z dnia 27 grudnia 2016 r., w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych Panu mgr inż. Pawłowi Krutysowi.

Celem pracy doktorskiej jest “Opracowanie algorytmu adaptacyjnej zmiany współczynnika wzmocnienia filtru do estymacji wektora stanu z niektórymi niemierzonymi współrzędnymi dla obiektów o strukturze szeregowej”. Z kolei **teza** pracy mówi, że “Stosując zaproponowany algorytm adaptacyjny wyznaczania wartości współczynnika wzmocnienia filtru można realizować estymatę stanu z niemierzonymi współrzędnymi dla wybranej klasy obiektów z efektywnością porównywalną lub lepszą niż w przypadku metod klasycznych. Czas realizacji i złożoność obliczeniowa będą korzystniejsze od standardowego rozwiązania filtru Kalmana”.

1 Zawartość rozprawy

Praca liczy 131 stron, składa się z 7 rozdziałów, cytuje się 66 pozycji literatury. W cytowanej bibliografii Autor rozprawy występuje jako współautor w 8 publikacjach, które wyglądają następująco:

- 1 artykuł ukazał się w “Przeglądzie Elektrotechnicznym” w 2013 r., który jest czasopismem dobrze znanym głównie w środowisku elektryków polskich (lista B MNiSW, 10 punktów),
- 1 artykuł w kwartalniku naukowym “Edukacja–Technika–Informatyka” wydawanym przez Uniwersytet Rzeszowski, (lista B MNiSW, 6 punktów).
- 4 artykuły ukazały się w czasopiśmie wydawanym przez Politechnikę Lwowską “Technical News” w latach 2007, 2010, 2009 oraz 2013,
- 1 artykuł w materiałach wydawnictwa Uniwersytetu Rzeszowskiego,
- 1 streszczenie (str. 307) o udziale w konferencji w Dreźnie.

We wprowadzeniu została omówiona tematyka rozprawy, cel i teza, jak również przedstawiono obecny stan badań związanych w pewien sposób z tematyką pracy oraz omówiono krótko zawartość poszczególnych rozdziałów.

2 Uwagi do rozdziału 2 “Metody numeryczne w zagadnieniach modelowania matematycznego”

Omówiono metody numeryczne wykorzystywane dalej w pracy, w tym metodę różnic skończonych, metodę Eulera i metodę Rungego-Kutty całkowania równań różniczkowych zwyczajnych. Metody te są powszechnie znane, więc ten rozdział można było zredukować.

W omawianym rozdziale występują pewne niedociągnięcia:

1. Na str. 19 i 24 funkcję $f(t, y)$ nazwano równaniem różniczkowym. Chodzi tu jednak o równanie różniczkowe $dy/dt = f(t, y)$ z warunkiem początkowym $y(t_0) = y_0$. Wypadało też podać dziedzinę i własności prawej strony równania różniczkowego.
2. Brak uzasadnienia dlaczego stosuje się metodę całkowania ze stałym krokiem h .
3. Niepotrzebna jest zmiana zmiennej czasu t na x na str. 20 – po co mówi się o funkcji $f(x, y)$ i przedziale $(x_n, x_n + h)$, skoro dotąd była funkcja $f(t, y)$, gdzie zwyczajowo zmienna t jest czasem, ($t \geq 0$) ?

3 Uwagi do rozdziału 3 “Modele matematyczne obiektu o strukturze szeregowej”

Przedstawiono wstęp w odniesieniu do modelowania obiektu o strukturze szeregowej w odniesieniu do rzeki. Opisano składniki i własności wód powierzchniowych, w tym zagadnienia istotne z punktu widzenia rozprawy: biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (w skrócie BZT) oraz rozpuszczony tlen (w skrócie RT). Omówiono również metody pomiaru wybranych wskaźników jakości wody, w tym budowę automatycznej stacji do pomiaru jakości wody i system akwizycji danych ze stacji telemetrycznych, metody pomiaru wskaźników BZT i RT. Następnie przedstawiono problem modelowania zanieczyszczonej rzeki. Na wykresach przedstawiono rozkłady wskaźników BZT i RT w funkcji czasu i przestrzeni dla różnych wariantów warunków brzegowych, uwzględniając dopływy boczne. Szkoda, że nie wyjaśniono sposobu, w jaki były uwzględnione dopływy boczne w rozpatrywanych modelach rzeki. W punkcie 3.3.1 przedstawiono model matematyczny zanieczyszczonej rzeki uwzględniający jej pojedynczy odcinek. Ma on postać równania różniczkowego cząstkowego typu hiperbolicznego wraz z warunkami: początkowym i brzegowym. Warunki graniczne uwzględniają szeregowie połączenie odcinków rzeki, jakkolwiek mogłyby być podane bardziej precyzyjnie. Przedstawiono kilka wyników symulacji rozkładu w przestrzeni i czasie dwóch zmiennych stanu (BZT i RT) z uwzględnieniem szumu występującego w mierzonych sygnałach.

Podrozdział 3.3.2 dotyczący przejścia z modelu o parametrach rozłożonych do modelu opisanego systemem równań różniczkowych zwyczajnych jest napisany nieprecyzyjnie – brak definicji funkcji występujących w równaniu różniczkowym (3.9): $v_i(z_i(t))$, $z_i(t)$ oraz stałej z_{0i} . Czytelnik nie może się domyślać o co chodzi. Nie wiadomo po co napisano

równanie (3.12) skoro jest (3.11). Przy tej, albo innej okazji, nie zaszkodziłoby również sformalizowanie pojęcia obiektu o strukturze szeregowej, skoro to występuje w tytule doktoratu.

Usterki i wątpliwości:

1. Na str. 38 we wzorze (3.5) macierz **B** nie została podana, podobnie wektor wymuszeń **w**.
2. Na str. 39 napisano o zdolności rzeki do samooczyszczania powołując się na pozycję [50] literatury, która jest poradnikiem użytkownika systemu Matlab / Simulink.
3. Na rysunkach 3.11-3.17 długość rzeki wynosi raz 200 km, innym razem 400 km. Powinno być jakieś wyjaśnienie tych założeń.
4. Str. 54. Podano model (3.13) dla odcinka rzeki, który jest podstawą dla sformułowania problemu estymacji. Model ten ma postać liniowego niestacjonarnego systemu dynamicznego opisanego w przestrzeni stanu, bez jasnego wyjaśnienia postaci macierzy stanu **A** i macierzy oddziaływań zakłóceń **B**.
5. Fragment na str. 54–55 dotyczący rozwiązania równania różniczkowego zwyczajnego pierwszego rzędu (3.14) i dalej analitycznego rozwiązania prostego równania (3.17) dla wskaźnika BZT są zbyt elementarne, by je zamieszczać w doktoracie. Poza tym dalej, we wzorach (3.22) i (3.23) niepotrzebnie wyrażona jest druga zmienna stanu poprzez pierwszą. Szkoda, że zamiast rozwiązania analitycznego, Autor nie podał portretu fazowego rozpatrywanego systemu fizycznego w układzie współrzędnych $0 - x_1 - x_2$, dla $t \in [0, \infty)$.
6. Na str. 57 opisując metodę Eulera należało napisać, że chodzi o rozwiązanie równania różniczkowego $dx/dt = f(t, x)$, aby było jasne skąd się bierze $f(t, x)$ po prawej stronie równania (3.24). We wzorze (3.24) brakuje znaku dodawania, powinno być $x(t + h) = x(t) + hx^{(1)}(t) + \dots$
7. Na str. 58 po stwierdzeniu, że algorytm R-K 4-go rzędu jest najczęściej stosowany, pojawia się niepotrzebne stwierdzenie Autora, że “Z przeprowadzonych badań wynika, iż dokładność rozwiązania za pomocą metody Rungego-Kutty jest porównywalna jak w metodzie Eulera”. Przecież metoda Eulera to jest to samo co metoda RK 1-go rzędu.
8. Str. 58–60. Opis porównania dokładności rozwiązań prostego układu dwóch liniowych równań różniczkowych o stałych współczynnikach można było znacznie skrócić.

4 Uwagi do rozdziału 4 “Estymacja stanu obiektu filtrem Kalmana”

Przedstawiono problem estymacji stanu rzeki z wykorzystaniem filtru Kalmana i przedstawiono wyniki symulacji w zakresie estymacji stanu rzeki, tzn. wskaźników BZT i RT za pomocą filtru Kalmana przyjmując różne warunki początkowe, uwzględniając jeden lub więcej dopływów rzeki oraz biorąc pod uwagę zakłócenia pomiarowe. Otrzymano estymaty wektora stanu w funkcji odległości.

Dodam na marginesie, że w tym rozdziale przedstawiono ideę filtru Kalmana w postaci ciągłej. Należę do tej szkoły, która ciągłą postać filtru Kalmana nazywa filtrem Kalmana-Bucy (por. z pracą Bucy, R.S. and Joseph, P.D., *Filtering for Stochastic Processes with Applications to Guidance*, John Wiley & Sons, 1968; 2nd Ed., AMS Chelsea Publ., 2005). Oczywiście nie ma to większego znaczenia z punktu widzenia oceny tej pracy. Sądzę tylko, że można było od razu przedstawić dyskretną w czasie postać filtru Kalmana, zamiast jego postaci ciągłej, ponieważ w doktoracie rozwiązuje się równania dyskretnie w czasie, za pomocą komputera.

Bardziej szczegółowe uwagi przedstawiają się następująco.

1. Wstęp do rozdziału 4 zawarty na stronie 61 jest napisany niezrozumiale (nie wyjaśniono np. co to jest $x_1, \dots, x_n$ i dlaczego n powinno dążyć do nieskończoności). Związek tego tekstu z następnym jest niejasny. Strony 61–63 również zawierają tekst bezużyteczny, bez podania jasnego związku z równaniami filtru Kalmana i równaniem Riccatiego.
2. Str. 64. Warunek początkowy (4.13) zapisany jest niefortunnie: $\mathbf{P}(t_0) = \mathbf{P}(t_0)$?
3. Str. 65–66. W podrozdziale 4.2 nie wiadomo w jaki sposób wykorzystano równania: (4.15) – transport adwekcyjno-dyfuzyjny, oraz (4.16)–(4.17) – model i -tego odcinka rzeki. Nie wiadomo nawet co oznaczają występujące w tych równaniach macierze i wektory. Najpierw wprowadzono modele w postaci równań różniczkowych zwyczajnych – równania (3.9) i (3.13) w rozdziale 3, natomiast w rozdziale 4 omówiono ogólne modele w postaci równań różniczkowych cząstkowych, z których te poprzednie powinny wynikać. Rozpatruje się równania różniczkowe cząstkowe, które sprowadzone zostają do pewnego układu równań różniczkowych zwyczajnych. To jest w porządku, ale dlaczego najpierw omówiono model w postaci równań różniczkowych zwyczajnych w rozdziale 3 a dopiero potem w rozdziale 4 rozpatrzono model o parametrach rozłożonych ?
4. Str. 67. Dlaczego wprowadzono potrójne indeksowanie chwil czasowych “ t_{mi}^i ” ? Co oznaczają te indeksy oraz pozostałe indeksy: p, k oraz l w równaniach (4.18)–(4.20) ? Równanie (4.20) jest niepoprawne (indeks l).
5. Str. 67. Wzory (4.21)–(4.23) na filtrację nie zostały omówione, ani też wyprowadzone. Należało podać źródło albo wyprowadzić.
6. Str. 68. Wzory (4.24)–(4.25) na predykcję nie zostały wyprowadzone. Zapis (4.25) jest niepoprawny – nie jest to równanie. Skąd się wzięły te wzory i jaka jest ich interpretacja ?
7. Nie mam zaufania do wyników badań symulacyjnych przedstawionych w punkcie 4.3, zwłaszcza podanych na str. 72–81. Niżej podaję przyczyny moich wątpliwości.
 - (a) Najpierw na str. 64 przedstawiono w postaci ciągłej równania filtru Kalmana (4.11), następnie równanie różniczkowe Riccatiego (4.12). Z kolei dalej na str. 72 napisano, że “W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano następujące wartości współczynników wzmocnienia: $K_{FBZT} = -3$, $K_{FRT} = 0.9$ ”. Wiadomo, że macierz wzmocnienia filtru Kalmana $\mathbf{K}_F(t)$ otrzymana w następstwie rozwiązywania równania Riccatiego (4.12) nie jest stała, lecz zgodnie z równaniem

(4.14) – jest funkcją czasu, tj. $\mathbf{K}_F(t) = [K_{FBZT}(t), K_{FRT}(t)]^T$. Skąd wzięto stałe współczynniki $\mathbf{K}_F(t) = [-3, 0.9]^T$?

- (b) Napisano dalej, że “W fazie filtracji rozwiązano układ równań (4.27)”. Z oznaczeń wynika, że zrobiono to w celu uzyskania estymaty wektora stanu $\hat{\mathbf{x}}$. Przyjęto zerowy warunek początkowy. Łatwo sprawdzić, że postać macierzowa tego prostego układu równań jest następująca

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t_k) + \mathbf{K}_F(y(t_{k-1}) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t_{k-1})), \quad \hat{\mathbf{x}}(t_0) = 0, \quad (4.27)$$

gdzie

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{BZT} \\ \hat{x}_{RT} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} K_{FBZT} \\ K_{FRT} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Pojawiają się następne wątpliwości:

- i. Dlaczego teraz macierz $\mathbf{A}$ jest macierzą jednostkową, skoro była przyjmowana wcześniej w modelu Streetera-Phelpsa na str. 38 jako

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ -k_2 & -k_3 \end{bmatrix}, \quad k_1, k_2, k_3 > 0.$$

- ii. Podano kilkanaście wykresów przedstawiających zależność wskaźnika BZT (niemierzonej współrzędnej stanu), bądź BZT i RT od odległości a nie od czasu – są to rysunki 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.11, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22. Rysunki te zamieszczono zaraz za równaniami (4.27). Ponieważ w całym podrozdziale 4.3 nt. badań symulacyjnych nie ma już więcej wzorów, więc pojawia się pytanie, jaki związek mają te wykresy z równaniami (4.27)?
- iii. Czytelnik nie jest w stanie odtworzyć wyników otrzymanych na wyżej wymienionych rysunkach, ponieważ nie podano dokładnej postaci rozwiązywanych równań, warunków początkowych i brzegowych, parametrów szumu gaussowskiego itp. Zamiast podawania niepotrzebnych treści można było pracę skrócić o ok. 30% i przedstawić – najlepiej w dodatku do tekstu rozprawy – to, co jest potrzebne czytelnikowi, który chciałby odtworzyć choćby część wyników i móc w ten sposób je uwiarygodnić.

5 Uwagi do rozdziału 5 “Projekt adaptacyjnego algorytmu estymacji stanu obiektu szeregowego”

Rozdział ten ma zasadnicze znaczenie dla rozprawy, ponieważ dotyczy sedna tematyki doktoratu. Autor omawia tu w istocie heurystyczną metodę modyfikacji na bieżąco, tzn. w dyskretnych chwilach czasu – dwóch współczynników wzmocnienia filtru Kalmana na podstawie sygnału błędu, który jest różnicą między zmierzoną wartością wyjścia i estymowaną wartością wskaźnika RT (ściślej, korzysta się z informacji o błędzie i jego pochodnej). Stanowi to pewien element nowości. Dotąd mówiono o (jednym) “współczynniku” wzmocnienia, w tym rozdziale wreszcie mówi się o (dwóch) “współczynnikach” wzmocnienia filtru.

Oto konkretne uwagi do omawianego rozdziału.

1. Wstęp do rozdziału 5 na stronie 82 jest istotny, ponieważ stanowi zapowiedź przedstawienia koncepcji adaptacyjnego współczynnika wzmocnienia, co jest istotą doktoratu. Autor stwierdził, że “zapropomowano autorskie podejście adaptacyjne dla filtru polegające na modyfikacji jego współczynnika wzmocnienia K_F ”.
2. Podrozdział 5.1 “Paradygmaty algorytmów” jest zupełnie niepotrzebny. Zawiera on szcążtkowe informacje nt. historii algorytmiki, mnóstwo stwierdzeń ogólnikowych, niedojrzałych, które niczego ważnego nie wnoszą do rozprawy, których nie godzi się zamieszczać w doktoracie, jak. np. “komputery mogą reagować na całkowicie jednoznaczne instrukcje”, albo “niektóre algorytmy mają za zadanie wyłącznie przeprowadzanie komputera z jednego stanu wewnętrznego do innego”. Niepotrzebnie i w sposób niedojrzały pisze się o maszynie Turinga. Roi się od stwierdzeń niewiele mających wspólnego z tematem pracy na str. 85 i 86. Na przykład na str. 85 jest napisane: “Dla przykładu mózg ptaka implementuje arytmetykę w postaci sieci neuronowej, dzięki temu zwierzę jest w stanie porównywać pewne odstępy czasu”. Ten podrozdział (na szczęście niezbyt długi) jest kompromitujący. Prosiłem o jego usunięcie w poprzedniej wersji doktoratu, jednak Autor tego nie uczynił.
3. Str. 89. Napisano, że “Precyzyjny opis wyznaczania błędu estymacji i jego pochodnej prezentuje blok 5 na rys. 5.2”. W bloku 5 na tym rysunku jest napisane: “Obliczanie błędu estymacji ε i jego pochodnej $d\varepsilon/dt$ ”, więc trudno się zgodzić, że ten opis jest precyzyjny, bo sposób obliczania tych wartości podają dopiero równania (5.1)–(5.2), (nawiasem mówiąc, należało dopisać, że $dt = t_2 - t_1$).
4. Kod programu komputerowego na Rys. 5.5 niewiele daje, bo zawiera wielkości niezdefiniowane: `pe` oraz `eps2`.

W omawianym rozdziale na stronach 94–102 podano liczne przebiegi symulacyjne pokazujące zmianę współczynników wzmocnienia filtru w funkcji czasu, dla różnych wartości parametrów (współczynnika “ostrożności” η , strefy nieczułości ε , okresu dyskretyzacji dt). Badano również wpływ bocznych dopływów rzeki. Zawarto też przebiegi czasowe estymaty współrzędnych wektora stanu.

Podsumowując ten rozdział można stwierdzić, że otrzymane przebiegi czasowe świadczą o wystarczającej skuteczności heurystycznej metody adaptacji współczynników wzmocnienia filtru Kalmana. W omawianym rozdziale chodziło więc o przedstawienie prostego i skutecznego algorytmu przyrostowej poprawy współczynników filtru, który w pewnym sensie przypomina algorytm zmiany wag sieci neuronowej, jakkolwiek porównanie do sieci neuronowej jest o tyle niedokładne, że w sieci mamy dane uczące i minimalizujemy funkcję celu uczenia (np. metodą najszybszego spadku gradientu), czego tutaj nie ma. W omawianej części rozprawy starano się symulacyjnie pokazać, że zaproponowany algorytm jest zbieżny. Oczywiście symulacja w żaden sposób nie stanowi dowodu zbieżności algorytmu, jednak ona może, chociaż nie musi – przekonać badacza, że tak właśnie jest.

6 Uwagi do rozdziału 6 “Rozszerzony adaptacyjny algorytm estymacji stanu”

Mim zdaniem rozdział ten jest najciekawszy. Zaprezentowano w nim ulepszony algorytm zmian współczynników filtru na podstawie pomiarów z trzech chwil czasowych: obecnej

(k), poprzedniej ($k - 1$) i jeszcze wcześniejszej ($k - 2$). Poza pewnymi niedociągnięciami (na rys. 6.3 powtarza się $d\varepsilon_1/dt$, powinno być $d\varepsilon_1/dt$ i dodatkowo $d\varepsilon_2/dt$), potknięciami o charakterze językowym (str. 106 i dalej), zawarto ciekawy schemat blokowy 6.4 ilustrujący zastosowanie koncepcji “okna obserwacji”. Koncepcja jest czytelna; można ją łatwo zrealizować za pomocą prostego układu kombinacyjnego, znanego z techniki cyfrowej (choć takiej uwagi nie ma w doktoracie). Szkoda, że nie wyjaśniono szczegółowo o co chodzi w ocenie “czy operacja jest przeprowadzona prawidłowo” na rys. 6.5 – można się tylko domyślać. Blok warunkowy na schemacie 6.7 też nie został dokładnie opisany.

W podrozdziale 6.2 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych a w punkcie 6.3 porównano działanie mechanizmu z “oknem obserwacji” z algorytmem z poprzedniego rozdziału. Otrzymano obiecujące wyniki.

7 Uwagi do rozdziału 7 “Wnioski końcowe i podsumowanie”

Rozdział ten stanowi podsumowanie całej rozprawy.

8 Usterki redakcyjne

Podaję kilka usterek redakcyjnych.

1. Ostatnie zdanie na str. 48 jest niekompletne.
2. Str. 50. Zamiast “musiała by być” powinno być “musiałaby być” (partykułę *by* z czasownikami osobowymi piszemy łącznie).
3. Podpisy pod rysunkami 3.23–3.26. Zamiast “z oraz bez zaszumienia” lepiej byłoby napisać “w obecności szumu (i podać jego parametry) i bez niego”.
4. Str. 64 (i w zasadzie większość tekstu pracy). Autor zignorował potrzebę podawania rozmiarów wektorów i macierzy.
5. Str. 65 (i w zasadzie większość tekstu pracy). Fatalna interpunkcja.
6. Str. 68. W ostatniej linii słowo “równaniami” należy skreślić.
7. Tekst na str. 69 jest powtórzeniem wcześniejszego. Brak konsekwencji oznaczeń – raz używana jest czcionka pogrubiona do oznaczenia macierzy, innym razem nie jest. Np. czym się różni K_F od $\mathbf{K}_F$?
8. Str. 88. Oznaczenia na tej stronie nie są takie same, jak dotąd stosowane, teraz X oznacza wektor stanu, Y – pomiar, itd. Nie podano nawet wymiarów wektorów. Już dalej na następnej stronie oznaczenia są inne.

9 Podsumowanie uwag i całości rozprawy

Temat rozprawy jest aktualny i interesujący z praktycznego i teoretycznego punktu widzenia. Obiekt, który został rozpatrzony, czyli zanieczyszczona rzeka wraz z dopływami, jest trudny do analizy, zwłaszcza, że pierwotny model matematyczny obiektu ma postać równań różniczkowych cząstkowych typu hiperbolicznego. Uważam, że jest to obiekt o strukturze szeregowej, jakkolwiek szkoda, że w tej pracy nie podano formalnej definicji tego pojęcia. Za właściwe uważam podejście praktyczne polegające na transformacji tego modelu do systemu równań różniczkowych zwyczajnych, jakkolwiek zgodnie z moją uwagą zawartą w punkcie 4 niniejszej recenzji, w doktoracie najpierw wprowadzono modele w postaci równań różniczkowych zwyczajnych (w rozdziale 3), natomiast później (w rozdziale 4) omówiono ogólne modele w postaci równań różniczkowych cząstkowych, z których te poprzednie powinny wynikać. Byłoby znacznie lepiej odwrócić kolejność rozpatrywania tych modeli.

Poprawne jest sformułowanie problemu konstrukcji filtra Kalmana i generalnie, jasna jest idea algorytmu rekurencyjnego wyznaczania minimalno-wariancyjnej estymaty wektora stanu modelu liniowego układu dynamicznego na podstawie pomiarów jego wyjścia i wejścia. Zasadne jest założenie, że zarówno pomiar jak i proces przetwarzania wewnątrz układu jest obciążony błędem, powiedzmy o rozkładzie gaussowskim. Słuszną wydaje się idea rozprawy mówiąca o tym, że warto rozwijać metody adaptacyjnego wyznaczania macierzy wzmocnienia filtra, które byłyby obliczeniowo atrakcyjne w porównaniu z klasycznym algorytmem filtra Kalmana.

Zatem generalnie, tematyka pracy, którą zakwalifikowałbym jako będącą na styku informatyki i teorii sterowania nadaje się na doktorat i idea rozwiązania postawionego problemu jest właściwa. Zdając sobie sprawę z uniwersalnego znaczenia i wielu różnych zastosowań filtra Kalmana, nie miałbym nic przeciwko zakwalifikowaniu tematyki rozprawy do informatyki.

Praca zawiera błędny podrozdział 5.1 "Paradygmaty algorytmów", który na szczęście nie był w pracy wykorzystywany. Opisywano metodę Rungego-Kutty, która bardziej nadaje się do skryptu dla studentów, niż do doktoratu (chyba, że się samemu tę metodę udoskonala). Oznaczenia w rozprawie nie zawsze są konsekwentne; nie podaje się wymiarów macierzy i wektorów, raz macierz jest oznaczana zwykłą czcionką, innym razem czcionką pogrubioną. Tak więc, praca w obecnym kształcie zawiera pewną liczbę usterek i błędów, jednak nie wpływają one w sposób zasadniczy na ocenę całości.

Teza pracy mówi, że stosując zaproponowany algorytm adaptacyjny wyznaczania współczynnika wzmocnienia filtra można realizować estymatę stanu z efektywnością porównywalną lub lepszą niż w przypadku metod klasycznych, tzn. czas realizacji i złożoność obliczeniowa będą korzystniejsze od standardowego rozwiązania filtra Kalmana. Autor zapewne ma rację, chociaż wolałbym liczbowe porównanie czasów niezbędnych do wykonania obliczeń w obu przypadkach. Rozbudowana jest w pracy część symulacyjna, jakkolwiek osobiście preferowałbym jakiś wynik analityczny przekonujący o zbieżności zaproponowanego procesu adaptacji. Generalnie jednak można uznać, że cel pracy został osiągnięty i teza obroniona.

10 Ocena końcowa

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Krutysa pt. "Algorytm adaptacyjnej estymacji wektora stanu z niemierzonymi współrzędnymi dla obiektów o strukturze szeregowej" w obecnej (poprawionej) wersji, spełnia wymagania stawiane przez ustawodawcę kandydatom w przewodach doktorskich, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. W szczególności rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegającego na opracowaniu algorytmu adaptacyjnej estymacji wektora stanu dla pewnej klasy obiektów dynamicznych. Rozprawa wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej informatyka. Sądzę, że Autor posiadał też umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

