



Dr hab. inż. Jerzy Kasprzyk, prof. Pol. Śl.
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 16
44-100 Gliwice

Gliwice, 14.01.2014

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Identyfikacja parametrów biliniowych modeli ciągów czasowych w pełnym zakresie ich stabilności

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Maliński

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Ewa Bielińska, prof. Pol. Śl.

1. Zakres, charakter i cel rozprawy

Analiza ciągów czasowych oraz identyfikacja ich modeli ma już wieloletnią historię. Klasa modeli biliniowych dla ciągów czasowych nie jest tak popularna w badaniach teoretycznych i zastosowaniach jak klasa modeli liniowych. Stąd też wiedza na ich temat jest znacznie uboższa niż dla modeli liniowych. Wynika to zapewne z trudności w identyfikacji oraz analizie teoretycznych własności takich modeli. W szczególności uważa się, że modele nieodwracalne nie nadają się do identyfikacji ze względu na niestabilność modelu odwrotnego, który wykorzystywany jest do estymacji wartości pobudzenia procesu, potrzebnych w procedurze wyznaczania parametrów modelu. Celem rozprawy jest opracowanie takich metod identyfikacji, które pozwolą rozwiązać ten problem. Autor wprawdzie ograniczył się do zadania identyfikacji modeli biliniowych elementarnych (dalej w skrócie EB), jednak podjęty przez niego problem jest wystarczająco trudny ze względu na silnie nieliniowe własności takich modeli i może stanowić dobry punkt wyjściowy do dalszych prac w tym zakresie. Tak więc problematykę recenzowanej rozprawy należy uznać za aktualną i ważną. Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, przy czym przez eksperymenty należy tu rozumieć badania symulacyjne.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa liczy 127 stron, w tym 3 strony to bibliografia. Składa się z przedmowy i dziesięciu rozdziałów.

W przedmowie Autor przedstawił motywację do prowadzenia badań nad identyfikacją modeli biliniowych, opisał syntetycznie zawartość rozprawy oraz wyraził podziękowania promotorowi i innym osobom, które przyczyniły się do jej powstania.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor przedstawił cel rozprawy, sformułował tezę pracy oraz omówił przyjętą metodykę badań. Dokonał także obszernego przeglądu literatury dotyczącej tematyki rozprawy oraz przedstawił potencjalne możliwości zastosowania modeli biliniowych.

Rozdział drugi zawiera podstawy teoretyczne dla prowadzonych dalej rozważań. Autor zdefiniował pojęcie modelu ciągu czasowego oraz przedstawił wybrane struktury parametrycznych modeli ciągów czasowych. Podał definicje momentów statystycznych procesu losowego. Zdefiniował pojęcie modelu EB, dokonał klasyfikacji modeli EB oraz omówił problem identyfikacji struktury modelu.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił wybrane metody estymacji parametrów modeli biliniowych oparte na minimalizacji błędu predykcji jednokrokowej oraz bazujące na właściwościach statystycznych. Do pierwszej grupy należą ważona rozszerzona rekurencyjna metoda najmniejszych kwadratów i metoda największej wiarygodności. Drugą grupę reprezentują metody momentów: zwykła i uogólniona.

Rozdział następny obejmuje opis trudności, z jakimi można się spotkać w identyfikacji modeli EB. W przypadku metod statystycznych trudności wynikają z problemów związanych z poprawnością wyznaczenia ocen momentów statystycznych. W przypadku metod opartych na minimalizacji błędu predykcji silnie nieliniowy charakter zależności funkcji kosztów od parametru modelu może prowadzić do znalezienia minimum lokalnego. Poza tym dla modeli nieodwracalnych wyznaczane w algorytmie oceny stymulacji mogą nie być zbieżne do prawdziwych wartości, a co za tym idzie, wartości oceny parametru modelu EB nie będą zbieżne do prawdziwej wartości tego parametru. W rozdziale tym Autor zasugerował możliwości rozwiązania dwóch ostatnich problemów zaznaczając jednocześnie, że na razie nie jest znany sposób uniknięcia pierwszej ze wspomnianych trudności. Przedstawione tu propozycje zostały szczegółowo omówione w następnych dwóch rozdziałach.

I tak w rozdziale piątym Autor proponuje rozwiązanie problemu estymacji parametru dla modelu nieodwracalnego poprzez wprowadzenie wartości nasycenia błędu identyfikacji do funkcji kosztów. Na wielu przykładach symulacyjnych pokazał, że takie rozwiązanie umożliwi uzyskanie poprawnych ocen parametru, mimo że model jest nieodwracalny. Na drodze symulacji Autor przebadął także właściwości statystyczne estymatora bazującego na funkcji kosztów z nasyceniem. Na tej podstawie zaproponował algorytm rekurencyjnego doboru wartości nasycenia wykazując jego skuteczność w przypadku modeli nieodwracalnych.

Ponieważ wielomodalność funkcji kosztów stanowi poważny problem w identyfikacji modeli biliniowych, zwłaszcza nieodwracalnych, stąd Autor zaproponował wykorzystanie algorytmu memetycznego w zadaniu optymalizacji funkcji kosztów. Na podstawie własnego doświadczenia wybrał algorytm ewolucyjny. Rozdział szósty zawiera szczegółowy opis algorytmu, omówienie doboru parametrów sterujących, mechanizmów poszukiwania globalnego (tzw. eksploracja) i lokalnego (tzw. udoskonalenie) oraz adaptacji poziomu nasycenia (tzw. rewolucja).

Przykłady wyników uzyskanych dzięki zastosowaniu algorytmu memetycznego z dobranymi przez siebie parametrami Autor przedstawił w rozdziale siódmym. Ponieważ na ogół wyniki te prezentowane są w postaci graficznej, stąd na początku rozdziału znajduje się szczegółowy opis sposobu prezentacji wyników. Następnie zostały przedstawione wybrane przykłady identyfikacji modeli odwracalnych oraz nieodwracalnych. Badania prowadzono dla danych symulowanych, dzięki czemu możliwe było porównanie otrzymanych ocen parametrów modeli z parametrami symulowanych procesów EB. Autor wykazał tu, że o ile identyfikacja modeli odwracalnych na ogół nie stanowi poważnego problemu, to w przypadku modeli nieodwracalnych, które powszechnie uznaje się za nieidentyfikowalne, zastosowanie

opracowanego przez siebie algorytmu pozwala uzyskać poprawne wyniki. Mogą się jednak zdarzyć złośliwe przypadki, powodujące istotne trudności w identyfikacji.

Jak Autor słusznie zaznaczył, analiza wybranych przykładów jeszcze nie dowodzi prawdziwości tezy, stąd rozdział ósmy został poświęcony przedstawieniu wyników obszernych badań statystycznych, obejmujących testowanie algorytmu dla różnych struktur procesów EB, odwracalnych i nieodwracalnych, różnych wartości parametru symulowanego procesu oraz różnej liczby przetwarzanych danych. Badania te wykonano dla setek wygenerowanych realizacji ciągów czasowych dla różnych kombinacji ww. parametrów, a następnie przeprowadzono wnioskowanie statystyczne korzystając z testów Kołmogorowa i Wilcoxon. W podsumowaniu rozdziału Autor podkreślił, że wyniki badań statystycznych dają podstawy do stwierdzenia, że zaproponowane przez niego podejście rozwiązuje problemy, o których pisał w rozdziale czwartym, co potwierdza tezę pracy.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono bardzo ciekawy przykład wykorzystania nieodwracalnych modeli EB do szyfrowania informacji. Idea zaprezentowana przez Autora polega na kodowaniu poszczególnych znaków alfanumerycznych za pomocą odpowiedniej wartości parametru nieodwracalnego EB i wygenerowaniu odpowiedniej liczby próbek dyskretnego procesu losowego. Próbkę tę, po przesłaniu na odległość, zostają podzielone na odpowiednie podciągi danych, dla których dokonuje się identyfikacji modelu EB. Otrzymane parametry modelu powinny umożliwić zdekodowanie wysłanego ciągu znaków.

Rozdział dziesiąty stanowi podsumowanie pracy, w którym Autor wypunktował najważniejsze jego zdaniem osiągnięcia pracy. Jeszcze raz uzasadnił, dlaczego zdecydował się na zastosowanie badań symulacyjno-statystycznych do wykazania tezy pracy. Wspomniał też o słabych stronach zaproponowanego algorytmu wynikających z jego dużej złożoności obliczeniowej, ale wyraził nadzieję, że rozwój metod przetwarzania równoległego powinien rozwiązać tę niedogodność.

3. Opinia merytoryczna

Poprawność i oryginalność tezy rozprawy oraz czy teza została wykazana

Oceniana rozprawa porusza bardzo ciekawy z naukowego punktu widzenia problem identyfikacji elementarnych biliniowych modeli ciągów czasowych. Powszechnie przyjmuje się, że modele biliniowe nieodwracalne są nieidentyfikowalne. Tymczasem Autor postawił tezę, że stosując odpowiedni algorytm identyfikacji, a w szczególności zastosowanie odpowiedniego ograniczenia na wartości ocen stymulacji, można uzyskać poprawną identyfikację wartości współczynnika modelu EB w całym zakresie stabilności tego modelu, a więc zarówno dla modeli odwracalnych, jak i nieodwracalnych.

W celu wykazania postawionej tezy Autor posłużył się metodami opartymi na badaniach symulacyjnych oraz statystycznych. Należy tu podkreślić, że złożoność badanego problemu nie pozwala przy obecnym stanie wiedzy na wykazanie tezy w sposób analityczny. Stąd przyjętą przez Autora metodę można uznać za odpowiednią do postawionego problemu.

Podsumowując stwierdzam, że postawiona teza jest poprawna i oryginalna, oraz wykazano jej słuszność na drodze badań statystycznych

Analiza źródeł i wiedza Autora w danej dyscyplinie naukowej

W rozdziale pierwszym Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy wykazując bardzo dobrą orientację w tym temacie. Bibliografia liczy 57 pozycji, z czego 8 pozycji jest autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, na ogół pochodzących

z materiałów konferencji międzynarodowych. Wybór pozycji jest trafny i odpowiedni do realizacji celów pracy, a sposób prowadzenia analizy odpowiada potrzebom rozprawy.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy w literaturze światowej

Liczba pozycji literatury światowej dotycząca identyfikacji modeli biliniowych nie jest zbyt imponująca w porównaniu z innymi zagadnieniami z zakresu identyfikacji. Wynika to prawdopodobnie z tego, że jest to tematyka trudna, nie mająca jeszcze zbyt wielu zastosowań. Na tle literatury przedmiotu rozprawa wyróżnia się oryginalnym i twórczym podejściem do problemu identyfikacji modeli nieodwracalnych. Jako nowatorskie rozwiązanie należy tu uznać modyfikację funkcji kosztów przez wprowadzenie nasycenia oraz wykorzystanie algorytmu memetycznego do minimalizacji funkcji kosztów, co pozwoliło na rozwiązanie problemu identyfikacji modeli nieodwracalnych.

Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej

Praca stanowi istotny wkład w rozwój metod identyfikacji biliniowych modeli ciągów czasowych. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że zaproponowany algorytm identyfikacji modeli EB jest skuteczny i może znaleźć zastosowanie w praktyce identyfikacji. Szczególnie interesujący jest przedstawiony w rozdziale dziewiątym przykład wykorzystania modeli EB do szyfrowania informacji.

Umiejętność Autora przedstawienia uzyskanych wyników

Zasadniczo Autor przedstawia wyniki badań oraz analizę teoretyczną problemu w sposób zrozumiały i przy użyciu właściwych środków. Rozprawa posiada logiczny układ. Niestety, redakcja pracy jest jej najsłabszą stroną, co być może wyniknęło z pośpiechu w jej przygotowaniu. Uwagi szczegółowe dotyczące redakcji rozprawy przedstawiono poniżej.

4. Słabe strony rozprawy

Uwagi natury ogólnej

Podstawowa uwaga dotyczy przedstawionych w rozdziale drugim pojęć podstawowych. Zasadniczą wartość rozprawy stanowią rozdziały, w których przedstawiono rozwiązania istotnych i trudnych problemów identyfikacji modeli EB, i które spokojnie wystarczyłyby na pozytywną ocenę rozprawy. Autor więc niepotrzebnie usiłował wprowadzać własne definicje pojęć, które nie zawsze są przejrzyste i konsekwentne, a czasami są wręcz niepoprawne. Lepiej by było, gdyby po prostu skorzystał z dobrego źródła, np. z pracy oznaczonej w rozprawie jako [Bie8], i potem trzymał się konsekwentnie przyjętej terminologii. Uwaga ta odnosi się w szczególności do punktu 2.1 rozprawy.

Podanie na str. 17 „zasady działania modelu ciągu czasowego” w postaci określenia wartości zmiennej procesowej jako sumy składowej deterministycznej i losowej oraz dalsza dyskusja ma się nijak do rozpatrywanej klasy modeli EB. Mylone są tu pojęcia wyjścia modelu i wartości zmiennej procesowej, co ma potem swoje konsekwencje w punkcie 2.4 rozprawy, a także w wielu innych miejscach. Występujący w modelu $EB(k,l)$ składnik biliniowy $\beta u(k)u(l)$ nie jest składową deterministyczną. Obawiam się niestety, że Autor wpadł tu w pułapkę „symulatora” wynikającą stąd, że swoje badania oparł prawie wyłącznie na symulowanych ciągach czasowych. W efekcie zaczął nie rozróżniać, co tu jest modelem, co

procesem, co stymulacją (nb. wolałbym określenie pobudzenie zamiast stymulacja) a co residuum (a może lepiej po polsku reszty zamiast residua?).

Na str. 41 Autor wprowadza pojęcie *trajektorii* jako zbioru N realizacji procesu biliniowego zarejestrowanych w czasie. Tak definiowana trajektoria jest po prostu ciągiem czasowym, więc jej wprowadzenie uważam za całkowicie zbędne. Przy okazji, co to jest *trajektoria niezależna*? Z kolei na str. 81 Autor błędnie traktuje ciąg czasowy jako proces biliniowy o zadanych parametrach. Ciąg czasowy nie jest procesem, ale zbiorem realizacji procesu w czasie.

Dobłą praktyką jest także, aby w pracach tego typu zamieszczać spis ważniejszych oznaczeń. Niestety, Autor tego nie zrobił, co czasem utrudnia czytelnikowi odpowiednie zrozumienie rozważań. Na przykład we wzorach (2.1), (2.2) itd. pojawiają się oznaczenia, które nie zostały wyjaśnione, a których czytelnik spoza środowiska naukowego Autora może po prostu nie znać. Z drugiej strony zemściło się to także na Autorze rozprawy, który nie trzyma się konsekwentnie przyjętych oznaczeń. Przykładowo we wzorze (2.26) występuje σ zamiast poprzednio używanego symbolu λ .

Redakcja rozprawy pozostawia wiele do życzenia. Autor ignoruje zasady interpunkcji w języku polskim. Podobna uwaga dotyczy dzielenia wyrazów. Zdarza się także pisanie osobno wyrazów, które powinny być pisane łącznie. Poza tym występuje sporo tzw. literówek, np. nazwisko Wilcoxon pojawia się w rozprawie w trzech wersjach. Błędy natury redakcyjnej nie zmniejszają wartości merytorycznej pracy, ale jednak utrudniają jej czytanie.

Uwagi szczegółowe

1. Str. 16 - Model zbudowany na bazie przetwarzania zmiennych procesowych niekoniecznie musi być modelem stochastycznym, np. model trendu wielomianowego.
2. Str. 17 - Niespełnienie warunku stałości okresu próbkowania nie oznacza, że nie można uzyskać modelu określającego relacje między wartościami zmiennych procesowych. Jest to prawda dla pewnych klas modeli, tj. takich, w których nie występuje jawnie czas, np. modeli ARMA czy rozpatrywanych w pracy modeli biliniowych.
3. Na str. 19 i 20 pojawiają się definicje modeli MA, AR itd. bez wyjaśnienia, co to są występujące we wzorach a_n , c_n , e_j itd.
4. We wzorze (2.10) występuje S^2 na oznaczenie wariancji z próby, dalej w rozprawie stosowane jest oznaczenie S_y^2 . W (2.11) podana jest definicja autokowariancji, w dalszej części pracy Autor wielokrotnie odwołuje się do autokorelacji bez jej zdefiniowania.
5. We wzorze (3.7) brakuje $1/a$ przed nawiasem.
6. Nie podoba mi się określenie „wizualizacja funkcji kosztów”(rys. 4.3, 4.4. itd.) To są po prostu wykresy zależności funkcji kosztów od wartości parametru modelu.
7. Na stronie 101 występują odwołania do wzorów (8.1) do (8.6), których w pracy nie ma. Okazało się, że w trakcie drukowania rozprawy gdzieś te wzory zniknęły, czego Autor nie zauważył. Brakujący wydruk powyższych wzorów został mi dostarczony.

Inne, mniej istotne uwagi redakcyjne czy dotyczące nieprecyzyjnego słownictwa zostały zaznaczone w dostarczonym mi egzemplarzu rozprawy i przekazane bezpośrednio Doktorantowi.

Uwagi dyskusyjne

Na str. 26 Autor stwierdza, że jeżeli obserwujemy dwa ekstrema na wykresie trzeciego momentu centralnego łącznego, to możemy wybrać zarówno model superdiagonalny, jak i subdiagonalny, a parametry k i l powinny odpowiadać współrzędnym pików. Intuicyjnie

wydaje się, że ze względu na różną strukturę, a co za tym idzie różną „pamięć”, modele te powinny mieć różne właściwości dynamiczne czy np. predykcyjne. Przykładowo, własności modelu $EB(4,1)$ powinny być inne niż $EB(1,4)$. Stąd z punktu widzenia zastosowania modelu chyba nie jest obojętne, czy wybrany będzie model superdiagonalny, czy subdiagonalny. Proszę Doktoranta o komentarz i wyjaśnienie tego problemu w ramach dyskusji

5. Wniosek końcowy

Przedstawione wyżej uwagi krytyczne nie zmieniają mojej ogólnie pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Podsumowując stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Malińskiego pt. „Identyfikacja parametrów biliniowych modeli ciągów czasowych w pełnym zakresie ich stabilności”** spełnia wymagania określone w „Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym” i wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej autora do publicznej obrony.



Wojciech