

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Szymona Łagosza

Modelowanie systemów nieliniowych o nieznanej strukturze

w postępowaniu prowadzonym przez
Radę Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Politechniki Wrocławskiej
w dyscyplinie *automatyka i robotyka*

1. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy jest związana z identyfikacją modeli nieliniowych, których struktura nie jest znana, chociaż spełnia pewne, dosyć ogólne założenia. Dokładniej, rozważana w rozprawie klasa modeli obejmuje modele rozwijalne w szeregi Volterra i Wienera, których dużą zaletą jest możliwość odwzorowania bardzo szerokich klas modeli nieliniowych, a jednocześnie liniowość względem nieznanymi parametrów. Klasa tych modeli nie wyczerpuje oczywiście możliwości budowania modeli nieliniowych o nieznanej strukturze na podstawie danych empirycznych. Nawet jeszcze łagodniejsze założenia wystarczają w rozpowszechnionych obecnie modelach neuronowych. Jednak te ostatnie są trudniejsze do interpretacji fizycznej niż modele rozwijane w szeregi, gdy tymczasem interpretowalność może na przykład znacznie pomóc w walidacji uzyskanych finalnie modeli. Inna ogólna klasa to modele nieparametryczne, jednak po pierwsze dają one bardziej informacje jakościowe, a po drugie wymagają dużych zbiorów pomiarów silnie rosnących ze wzrostem wymiarowości modelu. Duża liczba pomiarów jest zresztą także potrzebna w przypadku modeli neuronowych i pod tym względem modele parametryczne są zazwyczaj bardziej konkurencyjne. Oczywiście powszechnie stosuje się też linearyzację, ale efektywność opartych na niej metod bardzo zależy od typu nieliniowości. Te argumenty powodują, że rozwijanie badań nad klasami modeli przedstawionymi w rozprawie w celu wyznaczenia zakresu ich użyteczności jest ważne. Tematyka rozprawy ma też wartość czysto poznawczą polegającą na wykazaniu nowych właściwości metod o dużej tradycji. Warto też dodać, że w wyniku prowadzonych rozważań teoretycznych Doktorant zaproponował algorytm identyfikacji rekurencyjnej, który w perspektywie może być konkurencyjny do innych stosowanych metod.

Tematyka rozprawy bardzo dobrze wpasowuje się też w tradycyjne badania szkoły wrocławskiej w dziedzinie identyfikacji modeli nieliniowych i jest kolejnym znaczącym krokiem w badaniach prowadzonych w tym zakresie w Politechnice Wrocławskiej.

WPLYNĘŁO

17.08.2021

RDN-AEE/134/2021

2. Cel i zakres rozprawy

Głównym celem rozprawy jest analiza metod modelowania dynamicznych systemów nieliniowych opisanych szeroką klasą szeregów Volterra i rozwinięć Wienera na podstawie pomiarów ich sygnałów wejściowych i wyjściowych. Analizę poprzedza bardzo dobrze pomyślany rozdział wstępny, w którym wprowadzono używane dalej pojęcia związane z modelami oraz metodami stosowanymi do estymacji ich parametrów. Rozważania te poparto ciekawym i informacyjnym przeglądem publikowanych osiągnięć związanych z tematyką rozprawy, których historia sięga ich źródeł z połowy ubiegłego wieku, a także późniejszych prac wprowadzających istotne nowe elementy.

W rozdziale 2 szczegółowo opisano rozwinięcia Volterra oraz skupiono się na analizie ich właściwości aproksymacyjnych, a następnie rozpatrzono specyficzną klasę modeli Wienera-Hammersteina (LNL), dla której wyprowadzono oszacowania dokładności aproksymacji.

Rozwinięcia Wienera są tematem rozdziału 3. Wprowadzono tu reprezentację ortogonalną funkcjonału Wienera względem zadanego rozkładu prawdopodobieństwa, a następnie rozpatrzono reprezentację względem rozkładu normalnego oraz oszacowanie błędu aproksymacji dla takiego przypadku. Dla klasy modeli Hammersteina (NL) wyprowadzono oszacowania błędu aproksymacji. Rozważono też rozwinięcie w chaos wielomianowy dla przypadkowych sygnałów wejściowych systemu o rozkładzie niegaussowskim.

Rozdział 4 jest poświęcony głównie wyznaczaniu oszacowań błędu estymacji modeli. Rozważono klasę algorytmów stochastycznych zwaną w rozprawie „algorytmem lustrzanym z uśrednianiem”, który można by było może też nazwać „algorytmem uśredniania w przestrzeni dualnej” lub „algorytmem uśredniania ocen dualnych”, sięgający korzeniami do metody aproksymacji stochastycznej zaproponowanej na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i silnie rozwijany w początkach tego wieku przez grupę rosyjskich naukowców (A. Juditsky, A. Nemirovski, Y. Nesterov). Tutaj Doktorant zajmuje się zarówno dostosowaniem tych metod do optymalizacji kryterium estymacji modeli jak i oszacowaniami błędów estymacji, szczególnie dla modeli dynamicznych. Wyprowadza także oszacowania dla modelu Wienera-Hammersteina. Następnie opisuje wyniki numeryczne dla nieliniowego modelu dwóch połączonych zbiorników zamkniętych pętlą przez pompę ze sterowanym przepływem, w którym należy stabilizować poziom cieczy w jednym ze zbiorników. Doktorant napisał program wykonujący obliczenia oraz skorzystał z opublikowanych danych pomiarowych uzyskanych z działania rzeczywistego systemu. Rozdział 5 jest rozdziałem podsumowującym.

Rozdziały 2, 3 i 4 są uzupełnione przez dodatki, w których zamieszczono szczegółowe informacje przydatne do zrozumienia zasadniczego tekstu, a także wiele dowodów lematów i twierdzeń sformułowanych w zasadniczym tekście rozdziałów.

Konstrukcja rozprawy jest starannie przemyślana, a sposób prowadzenia rozumowania jest logiczny.

Tematyka rozprawy jest związana z teoretycznymi podstawami budowy modeli służących do automatycznego sterowania i niewątpliwie należy do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

3. Oryginalność rozprawy

Rozprawa zawiera wiele oryginalnych wyników, przede wszystkim w zakresie wyprowadzenia i dowodów oszacowań błędów aproksymacji i estymacji modeli. I tak, w rozdziale 2 nowe wyniki Doktoranta są związane z szacowaniem dokładności aproksymacji modeli Wienera-

Hammersteina przez podwójnie obcięty szereg Volterry, co jest opisane w podrozdziale 2.3 i dodatku 2.A. W szczególności, nowość stanowi udowodniony lemat 2.1 o oszacowaniu błędu aproksymacji. Wyniki te zostały zresztą już niedawno opublikowane w artykule Doktoranta i promotorów w wysoko notowanym czasopiśmie *European Journal of Control*.

Nowe wyniki w rozdziale 3 to wniosek 3.1 i twierdzenie 3.2 dotyczące oszacowań błędów aproksymacji szeregami Wienera, a w szczególności oszacowania dla modelu Hammersteina zapisane w lematkach 3.1 i 3.2. Nowe są także wyniki dotyczące ortogonalizacji funkcjonałów Volterry dla modeli z czasem dyskretnym, zamieszczone w dodatku 3.B.

Szczególnie wiele nowych wyników zawiera rozdział 4. Dotyczą one oszacowań błędów estymacji modeli i są zawarte w twierdzeniu 4.1 i lemacie 4.1 (modele statyczne), twierdzeniu 4.2 i wniosku 4.3 (modele dynamiczne z pamięcią skończoną), twierdzeniu 4.3 i wniosku 4.4 (systemy dynamiczne z pamięcią zanikającą); twierdzeniu 4.4 (dla modelu Wienera-Hammersteina); a także doboru długości kroku algorytmu w iteracji we wnioskach 4.1 i 4.2. Doktorant opracował też nowy szybki rekurencyjny algorytm 4.1, podał oszacowanie błędu estymacji przez algorytm we wniosku 4.5 i wykazał działanie algorytmu na wspomnianym wcześniej przykładzie dwóch zbiorników.

Tak duży wkład oryginalnych wyników Doktoranta jest warty wyraźnego podkreślenia.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne i dyskusyjne

Wykaz z punktu 3 wskazuje na dużą oryginalność wyników przedstawionych w rozprawie. Tylko mała ich część została dotąd opublikowana. Z tego względu umieszczam poniżej wiele uwag technicznych oraz o charakterze dyskusyjnym. Mam nadzieję, że te uwagi pomogą w dopracowaniu końcowej prezentacji materiału w zgłoszeniach publikacyjnych. Natomiast nie uwzględniam w uwagach (nielicznych) literówek i drobnych przejęczyzeń, które łatwo wychwycić w końcowej edycji tekstu skierowanego do publikacji.

Poniżej, \mathbf{a}^b oznacza b -ty wiersz od góry na stronie \mathbf{a} , a \mathbf{a}_b oznacza b -ty wiersz od dołu na stronie \mathbf{a} .

Pierwsza uwaga, choć może nie do końca przydatna dla przygotowania publikacji, gdzie w publikowanych fragmenty rozprawy łatwiej jest nad tym panować, dotyczy kłopotów z oznaczeniami, które nie są objaśnione albo mają wielokrotne znaczenia, co nie jest dostatecznie objaśnione w tekście. Rozumiem kłopot z doбором oznaczeń przy tak dużej ich liczbie i skomplikowanych matematycznie rozważaniach, ale niejednoznaczność oznaczeń bardzo utrudnia czytelnikowi śledzenie rozumowania, gdy musi poszukiwać ich znaczenia i zastanawiać się, które z wcześniej wprowadzonych odpowiadają temu właśnie użytemu. Warto więc zwrócić na to większą uwagę. Oto kilka przykładów.

2, wzór (1.5) – Jest tu wprowadzone oznaczenie $T_{lin}[\mathbf{x}_n, \lambda]$ jako alternatywa dla oznaczenia systemu $m_{sys}[\mathbf{x}_n]$. Oznaczenie to nie jest później używane, aż pojawia się w 30²⁰ i na następnej stronie we wzorach (2.6) i (2.7) jako $T[\mathbf{x}_n]$, gdy czytelnik przyzwyczał się do oznaczeń $m_{sys}[\mathbf{x}_n]$. Dodatkowo, w wykazie oznaczeń T jest tłumaczone jako liczba iteracji algorytmu.

153 – Tutaj R oznacza górne ograniczenie normy ℓ_1 wektora parametrów. W 20¹⁷ oznacza „promień” zbioru ograniczeń wektora parametrów. Potem pojawia się we wzorze 67² jako pierwiastek ograniczenia funkcji kary. W 68^{4.3} stała R^2 jest określana jako „pojemność” zbioru ograniczeń wektora parametrów. Natomiast w 71⁹ jest określona nieco podobnie jak

w 20¹⁷, ale z wyraźnymi różnicami w definicji. Z kolei w 72³ z powrotem wyraźnie użyto definicji z 67². W wykazie oznaczeń stała R nie występuje.

71¹¹ – Jest tu wprowadzone oznaczenie stałej r jako ograniczenie normy ℓ_2 wektora parametrów. W 79⁴ jest to ograniczenie normy ℓ_1 . Czy w 80¹³ stała r ma coś wspólnego z poprzednimi jej znaczeniami, czy ma inne znaczenie? W wykazie oznaczeń stałej r nie ma.

A teraz inne uwagi.

1, wzór (1.1) – Co oznaczają nawiasy kwadratowe?

2, ostatni akapit – Pojęcie modelowania jest tu ograniczone do pojęcia identyfikacji systemów, a nawet przytacza się definicję z rozprawy habilitacyjnej P. Wachla, gdzie jest ono definiowane jako fragment procesu identyfikacji. Na ogół jednak termin modelowanie rozumie się znacznie szerszym znaczeniu. Ograniczając się do budowy modelu matematycznego i pomijając na przykład takie znaczenia, jak „model postępowania”, „model jako osoba prezentująca nowe kolekcje ubrań,” czy ‘modelowanie baz danych’, przez modelowanie rozumie się zazwyczaj całość procesu budowy modelu, przy czym nie zawsze trzeba brać w tym pod uwagę pomiary. Wiele modeli zbudowano tylko na podstawie różnych praw fizycznych, chemicznych, ekonomicznych i innych, bez stosowania pomiarów. O tym rozróżnieniu piszą na przykład dosyć wyraźnie L. Ljung i T. Glad w książce dla studentów *Modeling and Identification of Dynamic Systems*, Lund, Szwecja, 2016 (ISBN: 9789144116884):

„This is a book about how to build models both from first principles in physics and from information in collected input and output measurements from the system.

Physical modeling is nowadays typically done by object oriented software, such as Modelica and Matlab's Siscap. These techniques are described in the book, together with their theoretical and mathematical underlying principles. Domain-independent methods, such as following energy flows in bond graphs gives a useful background for understanding object oriented modeling. Both classical state-space models and general differential algebraic equations (DAE) are treated.

The book also gives a comprehensive treatment of system identification, that is, techniques to estimate mathematical models from measured system inputs and outputs. Both linear and nonlinear models are treated, including artificial neural networks.”

Oczywiście można użyć pojęcia modelowania w węższym kontekście, na przykład właśnie jako określenia klasy modeli w procesie identyfikacji. Ale trzeba to opatrzyć wyraźnym komentarzem, nie pretendując do stwarzania wrażenia ogólności takiej definicji. Trochę podobną uwagę umieściłem w recenzji rozprawy habilitacyjnej P. Wachla i dlatego tak szeroko o tym piszę z okazji tej recenzji, aby tę sprawę naświetlić bardziej szczegółowo. Zresztą poza tym fragmentem, w tej rozprawie termin „modelowanie” jest używany często w ogólnym znaczeniu, nawet w tytule rozprawy.

5² – Trudno mi się zgodzić ze stwierdzeniem, że suma splotowa jest standardowym opisem liniowego systemu dynamicznego. Jest to jeden z opisów, może nawet rzadziej stosowany niż na przykład równania różniczkowe lub różnicowe.

11³⁻⁶ – Niezbyt rozumiem to stwierdzenie. Może chodzi o niezerowe prawdopodobieństwo, że takie sygnały będą dostatecznie bliskie?

12⁴⁻⁵ – Pojęcia długości pamięci i rzędu są zdefiniowane dopiero na str. 28.

13¹⁴ – Chyba chodzi o $M - 1$ pierwszych pomiarów sygnałów wejściowych.

- 148.7 – Chodzi o warunek regularności ograniczeń Slatera. Nie jest to jedyny warunek regularności ograniczeń.
- 157-12 – Eliminacja nieistotnych parametrów (zmniejszanie ich liczby) była znana w metodach identyfikacji znacznie wcześniej niż powstały prace, na które się Doktorant powołuje w tekście.
- 20¹⁷ – Stała R zależy od „dowolnie wybranego wektora” (patrz 20²⁻³) θ_1 , wobec czego wszystkie dalsze podane oszacowania w tym fragmencie pracy też są funkcją tego wektora. Nie są to zbyt wygodne oszacowania.
- 31¹² – Poprzednio jądra były oznaczane przez h_p , tutaj g_p a dalej, np. na stronie 52, jest też używane oznaczenie k_p .
- 34₂ – Chyba chodzi o twierdzenie 3 w [11]?
- 35⁹ – W określeniu domeny m^+ należy albo dwa razy użyć m , albo dwa razy V .
- 36₁₂ – Co oznacza tutaj L ?
- 42₁₃ – Co to są „pewne przekształcenia”? Bo to jest ważne dla dalszych wyprowadzeń.
- 43₁₃ – W odpowiednim wzorze należy użyć nawiasów, to znaczy pisać $g_{(2r-1)(p)}$. Inaczej nie do końca można zrozumieć, jak interpretować ten wskaźnik dolny. To samo dotyczy podobnych oznaczeń w dalszej części rozprawy.
- 53⁷ – Tu warto dodać, że $0 < \rho < 1$. To ograniczenie jest, co prawda, wplecione w tekst na poprzedniej stronie, ale dla kompletności lepiej je powtórzyć w sformułowaniu lematu.
- 53₇ – Czy tutaj q to jest stała z definicji przestrzeni Sobolewa?
- 58₂ i 59² – powinno być $\langle G_1, G_3 \rangle$.
- 68⁹⁻¹¹ – Wyjście systemu nie zależy od θ_t , ale od θ . Chyba że chodzi nie o system, ale o estymowany model.
- 68¹³⁻¹⁵ – Mam tu wątpliwości co do rozumowania. Zgodnie z (4.2) θ_t zależy od $g_{1:(t-1)}$, czyli od sumy gradientów od g_1 do g_{k-1} . Są one liczone odpowiednio w punktach od θ_1 do θ_{t-1} , a więc właściwie θ_t zależy od \mathcal{F}_{t-1} . Mam wrażenie, że końcowy wniosek jest poprawny, ale należałoby to rozumowanie lepiej poprowadzić. Analogiczne rozumowanie powtarza się też dalej, w następnych dowodach.
- 69¹⁰ – Skrót *p.n.* ma chyba znaczenie „prawie na pewno”. Jestem jednak przyzwyczajony do powszechnie stosowanego skrótu *p.w.* oznaczającego „prawie wszędzie”. W tym kontekście znaczenie skrótu *p.n.* może się wydawać „prawie nigdzie”.
- 71¹⁻³ – Przydałoby się lepsze uzasadnienie wyprowadzonego oszacowania.
- 80₂ – Gdzie jest twierdzenie 4.10? Może chodzi o twierdzenie 4.3?
- 82₂ – Powinno być „Za sprawą dolnego i górnego oszacowania wzoru Sterlinga...”.
- 83-84, fragment dotyczący opisu modelu – Z opisu wynika, że system działa w zamkniętej pętli, co zmienia charakterystykę wejściowo-wyjściową modelu. Nie mogę znaleźć w opisie, jak jest to uwzględniane. Czy przy identyfikacji wzięto to pod uwagę, czy też otrzymany z identyfikacji model jest modelem całego układu z zamkniętą pętlą?
- 92¹¹ – Powinno być chyba $L_S(\theta^*)$.
- 96, początek dowodu lematu 4.3 – Funkcja lipschitzowska nie musi być różniczkowalna, na przykład $f(x) = |x|$ jest funkcją lipschitzowską, ale w punkcie $x = 0$ nie jest

różniczkowalna. Dlatego tutaj albo trzeba założyć, że funkcja jest różniczkowalna, albo rozważyć subgradient zamiast gradientu, tak jak to zrobiono w [99].

98 – W lemacie 4.5 powinno być „subgradientu” zamiast „gradientu”.

5. Podsumowanie

Rozprawa ma głównie charakter teoretyczny i znacznie poszerza teoretyczne wyniki opublikowane wcześniej w literaturze. Doktorant wyprowadził i udowodnił wiele nowych rezultatów. Na ich podstawie Doktorant opracował i przetestował na symulowanym przykładzie rekurencyjny algorytm identyfikacji nieliniowego modelu z rzeczywistymi danymi. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością literatury oraz zaawansowaną znajomością trudnych zagadnień teoretycznych stosowanych w wyprowadzeniach i dowodach wzorów. Przedstawione w rozprawie wyniki w pełni wykazują przedstawione tezy pracy.

Rozprawa z całą pewnością i z nadmiarem spełnia kryteria naukowe stawiane pracom doktorskim zarówno ustawowe jak i zwyczajowe. Wnioskuje więc do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr. inż. Szymona Łagosza do publicznej obrony.

Jednocześnie, wysoko oceniając duży nowy wkład w rozwój metod identyfikacji modeli nieliniowych przedstawiony w pracy, wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Łagosza.

