

dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk, prof. uczelni  
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa

12.7.2021

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Łagosza  
pt. „Modelowanie systemów nieliniowych o nieznanej  
strukturze”

wykonana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Andrzeja  
Dziedzica, Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
Politechniki Wrocławskiej

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Przemysław Śliwiński, prof. uczelni  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Wachel, prof. uczelni  
Dyscyplina naukowa: automatyka, elektronika i elektrotechnika

### 1. Ogólna charakterystyka, zakres, cel i teza rozprawy

Tematyka pracy doktorskiej mgr. inż. Szymona Łagosza dotyczy zagadnienia modelowania dynamicznych procesów nieliniowych przy założeniu, że struktura wewnętrzna modeli nie jest znana. W rozważanych modelach stosowane są reprezentacje wielomianowe, które oparte są o szereg Volterra oraz szeregi ortogonalne (szeregi Wienera). Do modelowania zastosowano wymienione szeregi, ponieważ mają one właściwości uniwersalnej aproksymacji. Niestety, użycie szeregów Volterra oraz ortogonalnych oznacza, że otrzymane modele mogą mieć bardzo dużą liczbę parametrów, które są konieczne do otrzymania dokładnych modeli. Liczba parametrów modelu rośnie gwałtownie (ekspotencjalnie) przy wzroście złożoności modelu (tzw. zjawisko przekleństwa wymiarowości). Aby ograniczyć skutki tego niekorzystnego zjawiska, Doktorant wykorzystuje odpowiednio dobrane algorytmy optymalizacji wypukłej.

Doktorant definiuje następujące cele pracy (s. 25):

- a) *opracowanie efektywnych obliczeniowo metod i algorytmów modelowania szerokiej klasy dynamicznych systemów nieliniowych, których stosowanie nie wymaga znajomości struktury badanego systemu, a szybkość zbieżności zależy tylko w niewielkim stopniu od poziomu złożoności rozważanej klasy modeli,*
- b) *analiza własności statystycznych algorytmów, ze szczególnym uwzględnieniem własności o charakterze nieasymptotycznym, tj. dla skończonej liczby pomiarów,*

WPLYNĘŁO

14.07.2021

- c) implementacja opracowanych algorytmów oraz przeprowadzenie ich weryfikacji w ramach eksperymentów numerycznych na – o ile to możliwe – zbiorach pomiarowych fizycznie istniejących sygnałów.

Teza pracy (s. 25) jest stosunkowo rozbudowana: *Nowoczesne gradientowe metody optymalizacji wypukłej, takie jak algorytmy lustrzane z uśrednianiem, mogą stanowić wydajne obliczeniowo narzędzie modelowania nieliniowych systemów dynamicznych. Wykorzystanie nieeuklidesowych wariantów tych metod, m.in. opartych o funkcję ujemnej entropii, pozwala dodatkowo znacznie ograniczyć negatywny wpływ wymiaru problemu na szybkość zbieżności metody, co w konsekwencji umożliwia efektywną estymację modeli o dużych słownikach. Metody te mogą być rozpatrywane pod kątem zastosowania reprezentacji niewymagających znajomości struktury badanego systemu, opartych o rozwinięcie Volterry lub rozwinięcie Wienera.*

Tematyka badawcza, związana z modelowaniem oraz identyfikacją parametrów modeli nieliniowych procesów dynamicznych, jest bardzo aktualna i ma duże znaczenie praktyczne. Pomimo opracowania bardzo wielu algorytmów, w przypadku procesów nieliniowych właściwie nie istnieje uniwersalny algorytm służący do modelowania, który nie ma wad i ograniczeń. Na przykład, modele w postaci szeregów Volterry oraz ortogonalnych, które są rozważane przez Doktoranta, wymagają bardzo dużej liczby parametrów. Pomijając złożoność samego problemu modelowania, zastosowanie takiego modelu w automatyce, na przykład do celów bieżącej (on-line) predykcji i optymalizacji sygnałów sterujących w algorytmie regulacji predykcyjnej, może być trudne lub wręcz niemożliwe dla przyjętego okresu próbkowania. O ile w systemach automatyki przemysłowej okresy próbkowania algorytmów regulacji są dość długie, rzędu sekund, dziesiątek sekund lub nawet minut, to w szybkich systemach wbudowanych wymagane są okresy próbkowania rzędu milisekund lub nawet poniżej milisekundy. Analogiczny problem występuje w przypadku zastosowania modeli dynamicznych do bieżącej diagnostyki procesów. Doktorant zaproponował efektywny sposób modelowania procesów nieliniowych, który, dla przyjętej reprezentacji (szeregi Volterry oraz szeregi ortogonalne), prowadzi do otrzymania modeli o umiarkowanej liczbie parametrów.

## 2. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 108 stron, zawiera 5 rozdziałów oraz 3 dodatki. Dodatki umieszczono nie na końcu rozprawy, jak to zwykle ma miejsce, lecz po rozdziale drugim, trzecim i czwartym, co umożliwia szybkie znalezienie odpowiednich treści. Na początku rozprawy podano listę użytych symboli oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Spis literatury zawiera 122 pozycje bibliograficzne.

Pierwszy rozdział rozprawy jest rozszerzonym wprowadzeniem do tematyki modelowania i identyfikacji modeli procesów. Omówiono kwestie związane z wyborem reprezentacji, w tym szeregi Volterry i ortogonalne, a także modele szeregowe (blokowo-zorientowane): Hammersteina, Wienera oraz Wienera-Hammersteina. Uzasadniono wybór modeli wielomianowych. Omówiono metody estymacji modeli wielomianowych, w tym metody najmniejszych kwadratów oraz algorytmy optymalizacji stochastycznej. Po tak wyczerpującej dyskusji rozważanych zagadnień, na s. 25 sformułowano cele pracy oraz tezę.

W drugim rozdziale dokładnie omówiono reprezentacje oparte na szeregu Volterry. Omówiono ogólne właściwości aproksymacyjne takich reprezentacji. Jako przypadek szczególny omówiono strukturę Wienera-Hammersteina. Na końcu rozdziału omówiono kwestie konstrukcji modeli volterrowskich.

Trzeci rozdział rozprawy jest podobny do rozdziału drugiego, ale dotyczy reprezentacji opartych na szeregach ortogonalnych. Po omówieniu ogólnych właściwości aproksymacyjnych, rozważono strukturę Hammersteina. Omówiono również kwestie konstrukcji modeli opartych na szeregach ortogonalnych.

W czwartym rozdziale zbadano możliwość wykorzystania algorytmu lustrzanego z uśrednianiem (ang. dual averaging method) w zadaniu estymacji modeli wielomianowych. Podano dowód zbieżności błędu estymacji dla systemów z pamięcią zanikającą ekspotencjalnie. Działanie algorytmu sprawdzono dla danych pomiarowych zarejestrowanych podczas pracy procesu dynamicznego w postaci zbiorników z wodą.

W piątym rozdziale krótko podsumowano prowadzone prace. Podano w punktach oryginalne wyniki uzyskane przez Doktoranta oraz sformułowano otwarte problemy badawcze, które mogą być rozważone w przyszłości.

### 3. Ocena rozprawy

#### 3.1. Ocena merytoryczna rozprawy

Stwierdzam, że Doktorant wykazał słuszność tezy rozprawy oraz zrealizował cele pracy (s. 25).

Po pierwsze, w rozprawie opisano zaproponowaną przez Doktoranta metodę estymacji modeli wielomianowych, wykorzystano przy tym algorytm lustrzany z uśrednianiem. Oprócz propozycji algorytmu, w rozprawie bardzo dokładnie przeanalizowano właściwości algorytmu. Dowiedziono zbieżności błędu estymacji dla systemów z pamięcią skończoną oraz z pamięcią zanikającą ekspotencjalnie. Przeprowadzono również analizę właściwości nieasymptotycznych odmiany rozważanego algorytmu, który oparty jest na funkcji ujemnej entropii. Wykazano teoretycznie potrzebę stosowania adaptacyjnego doboru kroku wówczas, gdy mamy do czynienia z danymi losowymi oraz systemami statycznymi.

Po drugie, dokonano analizę właściwości aproksymacyjnych reprezentacji wielomianowych dla dwóch wybranych reprezentacji. Rozważano mianowicie system Wienera-Hammersteina (reprezentacja oparta na szeregach Volterry) oraz system Hammersteina (reprezentacja oparta na szeregach ortogonalnych).

Po trzecie, opracowano implementację entropijnego wariantu zaproponowanego algorytmu oraz przeprowadzono obliczenia dla danych zarejestrowanych podczas pracy rzeczywistego procesu dynamicznego (zbiorniki z wodą). Jest to jeden z wielu znanych w środowisku przykładów testowych, dane są dostępne w internecie.

W mojej ocenie część teoretyczna pracy jest bardzo dobra, mogę zaryzykować twierdzenie, że nie ma ona wad. Doktorant zaproponował algorytm modelowania systemów nieliniowych i bardzo dokładnie zbadał jego właściwości w sposób teoretyczny. Jak już pisałem omawiając ogólną charakterystykę, zakres, cel i tezę rozprawy, rozważana tematyka ma również duże znaczenie praktyczne, ponieważ istnieje potrzeba efektywnego modelowania systemów nieliniowych, przy czym pożądanym jest aby otrzymane modele były dokładne, lecz jednocześnie miały możliwie prostą strukturę i możliwie mało parametrów. Wydaje się, że doktorant zaproponował dobrą metodę, która służy temu celowi.

Wprowadzenie oraz część teoretyczna rozprawy są napisane bardzo dobrze. Doktorant ma nie tylko wiedzę szczegółową z zakresu modelowania przy wykorzystaniu zastosowanej

reprezentacji wielomianowej, lecz również wiedzę ogólną, dotyczącą szeroko pojętych zagadnień modelowania i identyfikacji.

Mam jedynie cztery uwagi merytoryczne:

- a) Na rys. 1.4 oraz w tekście na s. 7 i 8 nie podano struktury Hammersteina-Wienera. Z mojego prywatnego przeglądu literatury wynika, że w zastosowaniach w automatyce publikacje dotyczące modelu Hammersteina-Wienera są znacznie częstsze niż publikacje rozważające model Wienera-Hammersteina. Na przykład, zastosowanie pierwszego z wymienionych modeli w algorytmach regulacji jest znacznie częstsze niż drugiego. Dlatego szkoda, że przedstawiony opis nie dotyczy struktury Hammersteina-Wienera.
- b) W celu ilustracji skuteczności proponowanego algorytmu Doktorant rozważył problem identyfikacji zespołu dwóch zbiorników z wodą, do obliczeń wykorzystano dane zarejestrowane podczas pracy rzeczywistego urządzenia, a nie dane wygenerowane podczas symulacji. Problem modelowania tego zjawiska dynamicznego jest omówiony w rozprawie w sposób wystarczający. Rozumiem, że wybór tego zadania mógł być decyzją promotora. Analogicznie, ograniczenie się tylko do jednego problemu testowego również mogło być narzucone Doktorantowi przez promotora. Jako recenzent, muszę jednak stwierdzić, że bardzo chętnie zapoznałbym się z opisem działania skuteczności algorytmu zastosowanego do modelowania kilku procesów, co najmniej dwóch. Zwróćmy uwagę, że rozważany opis fizyczny zbiorników (s. 83) jest bardzo prosty: ma tylko dwie zmienne stanu, jedyna nieliniowość jest związana z pierwiastkami zmiennych stanu, nie występuje opóźnienie. Aby w pełni zademonstrować skuteczność proponowanego algorytmu, moim zdaniem Doktorant powinien rozważyć bardziej złożone systemy, przede wszystkim, o bardziej wyszukanej nieliniowości oraz, ewentualnie, o większej liczbie zmiennych stanu. Dla uproszczenia, dodatkowe systemy mogą być symulowane. Jako przykład systemu o znacznie bardziej skomplikowanej nieliniowości można podać reaktor neutralizacji (pH), który jest klasycznym przykładem testowym, stosowanym do weryfikacji metod modelowania i identyfikacji. Jestem bardzo ciekawy jaka będzie potrzebna liczba parametrów modelu wspomnianego reaktora neutralizacji.
- c) Nie da się ukryć, że dokładność modeli otrzymanych oboma rozważanymi w rozprawie metodami nie bardzo jest duża, co pokazano na rys. 4.5. W dyskusji wyników brakuje mi propozycji co można zrobić aby jednak zwiększyć dokładność modeli. Czy przyczyną niedoskonałości modelu są ograniczenia algorytmu obliczeniowego czy użytej postaci modelu?
- d) Wykorzystany przez Doktoranta zestaw danych, pochodzący z laboratoryjnego zestawu trzech zbiorników, jest dobrze znany w środowisku. Zapoznałem się z szeregiem prac, w których do modelowania tego procesu zastosowano różne struktury oraz algorytmy obliczeniowe. Do tych prac można bardzo łatwo dotrzeć śledząc cytowania dokumentu [97], a także innych, ponieważ problem testowy omówiono w kilku pracach. Niektóre z opublikowanych wyników wydają się być lepsze od rezultatów otrzymanych przez Doktoranta. W rozprawie brakuje odniesienia do tego typu prac. Oczywiście, nie chodzi o bardzo dokładny przegląd literatury na temat modelowania zbiorników (to nie jest cel pracy doktorskiej), ale spodziewałbym się odniesienia do najważniejszych z prac innych osób, zajmujących się tym samym zagadnieniem. Oczywiście, bezpośrednio podawanie wyników z innych prac jest ryzykowne, ponieważ do końca nie jesteśmy pewni jakie były wszystkie ustawienia algorytmów obliczeniowych. Dlatego, według mnie, warto by było, aby Doktorant samodzielnie wykonał odpowiednie obliczenia i zademonstrował skuteczność

innych struktur modeli, zastosowanych do rozwiązania rozważanego problemu. Można w tym celu zastosować pakiet MATLAB, który oferuje wiele struktur modeli i algorytmów obliczeniowych służących do ich wyznaczania. Otrzymane wyniki powinny stanowić podstawę do dyskusji na temat możliwości różnych struktur modeli oraz, ewentualnie, algorytmów obliczeniowych.

Bardzo proszę Doktoranta o przygotowanie odpowiedzi na powyższe uwagi na piśmie i przesłanie ich do mnie pocztą elektroniczną co najmniej tydzień przed obroną. Dodatkowe wyniki mogą być również wykorzystane podczas obrony, co według mnie będzie bardzo korzystne.

### 3.2. Poprawność językowa rozprawy

Praca napisana jest bardzo dobrym językiem polskim. Co ważne, Doktorant nie używa żargonu. Na pochwałę zasługuje to, że Doktorant zadał sobie trud przetłumaczenia angielskich nazw na język polski i używa ich konsekwentnie w całej pracy. Zauważyłem jedynie następujące drobne mankamenty, które nie wpływają na ogólną ocenę poprawności językowej:

- a) Cała rozprawa napisana jest konsekwentnie w pierwszej osobie liczby mnogiej (*będziemy nazywali... , zauważmy... , założmy...*). Przyznam, że w rozprawie doktorskiej, która jest pierwszą dłuższą pracą naukową, spodziewałbym się raczej bardziej formalnej formy bezosobowej.
- b) W pracy występują nieliczne błędy interpunkcyjne, ale jeden z nich jest konsekwentnie powtarzany (nadmiarowy przecinek): np. *kompromis pomiędzy wartością błędu estymacji, a wartością aproksymacji* (s. 4), *metody stochastyczne, a metody online optymalizacji wypukłej* (s. 20).
- c) Powoływanie się na rysunki nie jest w pracy jednolite, np. Doktorant stosuje powołanie *rys. 1.1*, ale również pisze *na wykresie 3.1...*

### 3.3. Poprawność redakcyjna rozprawy

Praca zredagowana jest bardzo dobrze, wyjątkowo starannie (porównuję kilka prac doktorskich recenzowanych ostatnio). Formatowanie tekstu jest prawidłowe. Widać, że Doktorant zadał sobie sporo trudu, aby wszystkie wzory, rysunki i tabele były czytelne. Bardzo to pochwalam i doceniam. Nie występuje znany z wielu publikacji naukowych problem zbyt małych rysunków, zbyt małych czcionek na rysunkach lub zbyt cienkich linii, co naprawdę utrudnia recenzentowi ocenę przedstawionych wyników. W recenzowanej pracy wszystko świetnie widać, rysunki i stosowane na nich oznaczenia są bardzo dobrej jakości. Mogę jedynie wymienić następujące drobne uchybienia:

- a) Oprócz listy użytych symboli matematycznych, przydałaby się również krótka lista skrótów stosowanych w pracy.
- b) W rozprawie zastosowano anglosaski styl systemu  $\text{\LaTeX}$ , co prowadzi do formatowania, które nie jest zgodne ze stosowanymi w Polsce normami i zwyczajami dotyczącego składu tekstu. Spodziewałbym się użycia np. świetnego stylu `mwbk` z klasy `mwc1s`.
- c) Niektóre wzory matematyczne nie są numerowane. Rozumiem, że do tych wzorów nie ma odwołań w tekście. Bardziej korzystne dla recenzenta i innych czytelników by jednak było konsekwentne numerowanie wszystkich wzorów.
- d) W niektórych wzorach matematycznych niedostosowano wielkość nawiasów, np. wzór (2.6), trzeci wzór na s. 53, pierwszy wzór na s. 71, wzór (4.27), pierwszy wzór na s. 83.

- e) W kilku pozycjach bibliograficznych nie podano wymaganych szczegółów:
- artykuły [9, 106] – nie podano nazwy czasopisma, tomu i numerów stron,
  - praca [44] – nie podano żadnych szczegółów poza autorem i tytułem,
  - książki [70, 89, 102, 117] – brak wydawnictwa i miejsca wydania,
  - artykuł [90] – brak nazwy czasopisma.

Podkreślam, że wymienione drobne mankamenty nie wpływają na bardzo dobrą ogólną ocenę redakcji rozprawy.

#### 4. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta

Baza Scopus podaje, że w dorobku Doktoranta znajdują się cztery prace (dostęp 29.6.2021):

- a) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie *European Journal of Control* (obecny współczynnik wpływu IF=1,540, 140 pkt. na liście MEiN), praca ma trzech autorów,
- b) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie *Applied Stochastic Models in Business and Industry* (obecny współczynnik wpływu IF=1,175, 40 pkt. na liście MEiN),
- c) jedna praca konferencyjna (*IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 2018*) zamieszczona w *IFAC-PapersOnLine* (20 pkt. na liście MEiN),
- d) jedna praca konferencyjna zamieszczona w materiałach konferencji *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*.

Doktorant jest pierwszym autorem pierwszej i czwartej z wymienionych publikacji.

Reasumując, Doktorant ma w swoim dorobku jedną pracę opublikowaną w bardzo dobrym czasopiśmie, jedną w dobrym oraz dwie prace konferencyjne. Uwzględniając krótki okres działalności naukowej i publikacyjnej Doktoranta, jego dorobek należy uznać za jakościowo bardzo dobry.

#### 5. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Omówiony w recenzowanej rozprawie doktorskiej algorytm może być wykorzystany do efektywnego modelowania systemów nieliniowych. Co ważne, nie jest konieczna znajomość struktury rozważanego systemu, natomiast szybkość zbieżności algorytmu zależy w niewielkim stopniu od stopnia złożoności modelu. Wyznaczone modele mogą być następnie zastosowane w automatyce, np. do bieżącej predykcji w algorytmach regulacji predykcyjnej. Dlatego stwierdzam, że przedstawione wyniki są istotne dla dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

#### 6. Do której z następujących kategorii recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) spełniająca wymagania,
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- e) **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.**

## 7. Podsumowanie

Pan mgr inż. Szymon Łagosz w pełni zrealizował podane na wstępie cele rozprawy, a także wykazał słuszność sformułowanej tezy. Wykazał się przy tym wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów technicznych. Dlatego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt. „Modelowanie systemów nieliniowych o nieznanej strukturze” spełnia wymagania ustawowe, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, art. 186 (Dz. U. 2018 poz. 1668). Wnioskuje o jej przyjęcie, a także dopuszczenie do publicznej obrony.

## 8. Wniosek o wyróżnienie

Z przyjemnością wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szymona Łagosza. Na poparcie swojego wniosku podaję następujące argumenty:

- a) Tematyka prowadzonych badań jest bardzo ważna z praktycznego punktu widzenia. Doktorant opracował efektywny algorytm służący do modelowania systemów nieliniowych o nieznanej strukturze. Uważam, że modele wyznaczone przez algorytm będą mogły być z powodzeniem wykorzystane w automatyce, np. w algorytmach regulacji predykcyjnej lub w algorytmach detekcji uszkodzeń.
- b) Rozprawa doktorska jest świetnie, w pełni profesjonalnie, napisana.
- c) Doktorant jest współautorem czterech publikacji, z czego jedna z nich ukazała się w bardzo dobrym czasopiśmie (*European Journal of Control*), które jest jednym z czasopism reprezentatywnych dla dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Uwzględniając powyższe argumenty, wnioskuję jak na wstępie.

*Marek Zarycki*