

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

5.7.2022

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEE

13. 07. 2022

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Drapały pt. „Niestandardowe metody identyfikacji i obserwacji stanu ciągłych modeli liniowych i rozszerzenie ich funkcjonalności dla celów wielowymiarowego sterowania adaptacyjnego procesem kondycjonowania szkła”

wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

1. Ogólna charakterystyka, zakres, cel i teza rozprawy

Praca doktorska mgr. inż. Michała Drapały powstała pod opieką prof. dr. hab. inż. Witolda Byrskiego na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej (Katedra Automatyki i Robotyki) Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Doktorant ubiega się o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika. Praca dotyczy identyfikacji modeli matematycznych oraz algorytmów regulacji predykcyjnej złożonego procesu kondycjonowania szkła. Proces ten wymaga zagwarantowania odpowiedniego profilu temperatury roztopionego szkła, znajdującego się wewnątrz długiego zasilacza. Stosowane jednopętłowe regulatory PID nie zawsze umożliwiają osiągnięcie wystarczającej jakości regulacji, co było główną motywacją do podjęcia prac.

Dwie tezy pracy (s. 23) są następujące:

- a) *Opracowana adaptacyjna metody identyfikacji dla ciągłych liniowych układów MISO, bazująca na metodzie funkcji modulujących i wykorzystująca całkowite obserwatory stanu, pozwala na dokładne odwzorowanie dynamiki nieliniowego procesu kondycjonowania szkła.*
- b) *Stworzone adaptacyjne wersje algorytmów sterowania predykcyjnego, wykorzystujące zidentyfikowane modele z czasem ciągłym, pozwalają na efektywne sterowanie procesem kondycjonowania szkła.*

2. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 185 stron, zawiera 9 rozdziałów. Na początku rozprawy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim, listę użytych symboli matematycznych oraz listę skrótów. Na końcu rozprawy znajdują się cztery załączniki, w których podano wartości parametrów wyznaczonych modeli. Spis literatury zawiera 116 pozycji bibliograficznych.

W pierwszym rozdziale pracy podano wprowadzenie, motywację i cele pracy, sformułowano tezy pracy, a także krótko opisano jej organizację.

W drugim rozdziale omówiono algorytmy identyfikacji parametrów modeli procesów dynamicznych z czasem ciągłym, a mianowicie metody bazujące na wielokrotnej filtracji sygnałów, metody wykorzystujące spektralną charakterystykę sygnałów oraz metodę funkcji modulujących. Omówiono również koncepcję powtórnej identyfikacji.

W trzecim rozdziale opisano obserwatory stanu procesów dynamicznych, w tym obserwatory asymptotyczne oraz dokładne.

Czwarty rozdział rozprawy omawia proces kondycjonowania szkła. Omówiono również znane z literatury modele matematyczne tego procesu w postaci równań różniczkowych cząstkowych, a także możliwości użycia tych modeli w algorytmach sterowania.

W piątym rozdziale omówiono dokładnie dwa modele symulacyjne stref zasilacza oraz procedurę identyfikacji parametrów modeli. Przedstawiono wyniki weryfikacji wyznaczonych modeli.

W szóstym rozdziale opisano opracowany algorytm identyfikacji liniowych modeli procesu o parametrach skupionych. Omówiono wyniki weryfikacji wyznaczonych modeli.

W siódmym rozdziale przedstawiono algorytmy regulacji predykcyjnej bazujące na liniowych modelach w przestrzeni stanu w wersji ciągłej oraz dyskretnej (wykorzystano sformułowania z prac prof. Liuping Wang). Omówiono kwestię ograniczeń sygnałów sterujących oraz możliwość uwzględnienia w algorytmie regulacji pomiaru zakłóceń.

W ósmym rozdziale przedstawiono autorskie modyfikacje algorytmów sterowania, omówiono kwestię optymalizacji punktu pracy procesu, a także omówiono wyniki przeprowadzonych symulacji.

W dziewiątym rozdziale opisano implementację omówionych w rozprawie algorytmów identyfikacji modelu oraz regulacji w systemie czasu rzeczywistego typu QNX oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów.

W dziesiątym rozdziale podsumowano całą rozprawę oraz krótko omówiono możliwe kierunki dalszych prac.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ocena merytoryczna rozprawy

Dokonania Doktoranta są następujące:

1. Zaprojektowanie adaptacyjnego algorytmu identyfikacji, wykorzystującego metodę funkcji modulujących i dokładne obserwatory stanu.
2. Modyfikacja i implementacja algorytmu regulacji predykcyjnej z czasem ciągłym, w którym wykorzystano funkcje Laguerre'a. Modyfikacje zaproponowane przez Doktoranta polegały na uwzględnieniu w algorytmie mierzonych zakłóceń procesu oraz użycie filtru Kalmana do wyznaczenia wartości zmiennych stanu między kolejnymi chwilami próbkowania. Porównano działanie takiego podejścia z algorytmem regulacji predykcyjnej bazującym na modelach dyskretnych.
3. Wykorzystanie zidentyfikowanych modeli liniowych procesu do optymalizacji punktu pracy (wartości zadanej temperatury).

4. Opracowanie środowiska symulacyjnego, w którym możliwe jest przetestowanie działania rozważanych w rozprawie algorytmów identyfikacji modeli oraz regulacji.
5. Implementacja niektórych algorytmów identyfikacji oraz regulacji w systemie czasu rzeczywistego typu QNX.

Uważam, że Doktorant bardzo dobrze zrealizował cele pracy oraz wykazał słuszność sformułowanych na wstępie tez. Po pierwsze, zaproponowana metoda identyfikacji umożliwia wyznaczenie modeli o dobrej dokładności. Po drugie, użycie otrzymanych modeli w omówionych algorytmach regulacji umożliwia osiągnięcie dobrej jakości regulacji.

Z przyjemnością mogę stwierdzić, że nie dostrzegam żadnych uchybień merytorycznych w recenzowanej rozprawie. Mogę jedynie zasugerować Doktorantowi, aby zastosował nieco inne podejście do regulacji predykcyjnej bazującej na liniowych modelach w przestrzeni stanu. Doktorant wykorzystuje sformułowania rozważanych algorytmów z prac prof. Liuping Wang, które umożliwiają osiągnięcie zerowego uchybu ustalonego. Istnieje alternatywne sformułowanie zaproponowane przez prof. Piotra Tatjewskiego, które jest znacznie prostsze i daje lepsze rezultaty pod względem jakości regulacji. Dla liniowych modeli dyskretnych w przestrzeni stanu omówione ono zostało w pracach:

- *Disturbance modeling and state estimation for offset-free predictive control with state-space models, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 24(2), 313-323, 2014,*
- *Offset-free nonlinear Model Predictive Control with state-space process models, Archives of Control Sciences, 27(4), 595-615, 2017.*

Wspomniane przeze mnie alternatywne podejście może być użyte w przyszłych pracach Doktoranta.

3.2. Poprawność językowa rozprawy

Rozprawa napisana jest dobrym językiem technicznym. W odróżnieniu od bardzo wielu prac, również rozpraw doktorskich, Doktorant nie używa żargonu, ani nie nadużywa skrótów, nie stosuje anglicyzmów. W pracy opisano wiele zagadnień, z czego najważniejsze to: proces kondycjonowania szkła, różne wersje modeli matematycznych procesu, algorytmy identyfikacji modeli, algorytmy regulacji. Doktorant postarał się aby w pracy znalazły się odpowiednie wstępy do poszczególnych zagadnień. Bardzo podoba mi się, że treści wstępne nie są długie, ale całkowicie wystarczają do zrozumienia opisywanych zagadnień. W trakcie lektury znalazłem bardzo nieliczne sformułowania, dla których, moim zdaniem, istnieją znacznie lepsze konstrukcje językowe. Są one następujące:

1. Zastosowanie w tytule rozprawy sformułowania *dla celów wielowymiarowego sterowania* nie jest dobre. Znacznie lepsza jest forma *w celu wielowymiarowego sterowania* lub po prostu *do wielowymiarowego sterowania*.
2. Doktorant ma tendencję do nadużywania słowa *tworzyć* oraz jego form pochodnych. Uczymy studentów i młodych adeptów nauki aby w tekstach technicznych raczej używali słów *opracować*, *zaprojektować*, *zaproponować*, *wyprowadzić* oraz pochodnych.
3. Sformułowanie *ograniczenia na sygnały sterujące* (podr. 7.5) jest kalką z języka angielskiego (*constraints on manipulated variables*, choć znacznie lepszą formą jest określenie *constraints imposed/put on manipulated variables*). W języku polskim mówimy po prostu

o ograniczeniach sygnałów sterujących. Uwzględniając rodzaje ograniczeń rozważane w rozprawie, należy posługiwać się terminami: ograniczenia wartości sygnałów sterujących oraz ograniczenia szybkości zmian sygnałów sterujących.

4. Sformułowanie *kompensacja mierzalnych zakłóceń* (podr. 7.6) nie jest poprawne, ponieważ celem algorytmu regulacji nie jest sprawienie aby zakłóceń nie było albo nie działały one na proces (co jest niemożliwe). Przeciwnie, jesteśmy świadomi, że zakłócenia (wejścia niesterowane) istotnie wpływają na pracę procesu, ale sygnały te można zmierzyć i wykorzystać w algorytmie regulacji. Poprawne określenie takiego podejścia to kompensacja wpływu mierzalnych (mierzonych) zakłóceń.

3.3. Poprawność redakcyjna rozprawy

Doceniam, że Doktorant stara się stosować zasady składu tekstów obowiązujące w Polsce. Na przykład, konsekwentnie stosuje przecinek jako separator dziesiętny, a nie kropkę dziesiętną, którą należy stosować w tekstach anglojęzycznych. Jedynym wyjątkiem jest wzór (5.4), prawdopodobnie „przeklejoną” z tekstu napisanego po angielsku. Formatowanie tekstu, tytułów rozdziałów, akapitów, w tym wcięć akapitowych, jest bez wyjątków prawidłowe (zapewne dzięki zastosowaniu odpowiedniej klasy pakietu \LaTeX). Jako recenzent, bardzo to doceniam. Podczas lektury rozprawy zauważyłem następujące uchybienia:

1. Wszystkie pozycje w spisie literatury wymieniono w kolejności cytowania. Dla recenzenta, który chce sprawdzić czy Doktorant odwołuje się do klasycznych pozycji z zakresu opisywanych zagadnień, jest to spore utrudnienie. Kolejność alfabetyczna (według nazwiska pierwszego autora) jest według mnie znacznie wygodniejsza.
2. Wszystkie liczby podane w notacji wykładniczej mają postać $\dots \times 10^{\dots}$, która jest stosowana w tekstach anglojęzycznych. W tekstach pisanych w języku polskim obowiązuje konwencja $\dots \cdot 10^{\dots}$.
3. Niestety, doktorant konsekwentnie, ale nieprawidłowo stosuje czcionkę pochyłą w symbolach matematycznych. Przypomnijmy, że stałe i zmienne (skalarne, wektorowe lub macierzowe) oznaczamy czcionką pochyłą, np. x , y , Z (choć niektóre wydawnictwa wymagają zastosowania czcionki zwykłej do oznaczenia macierzy). Wszystkie indeksy (górne lub dolne), które przyjmują wartości liczbowe, też zapisane są czcionką pochyłą, np. x_i , gdzie $i = 1, \dots, 10$. Jeżeli natomiast w symbolu zmiennej lub stałej występuje dodatkowe oznaczenie, które nie przyjmuje wartości liczbowej, należy podać je stosując czcionkę zwykłą. A więc powinno być: y_{sim} , a nie y_{sim} (wzór (2.62)), ponieważ s , i oraz m nie przyjmują wartości liczbowej. Analogicznie, powinno być: J_{obs} , a nie J_{obs} (wzór (3.4)), powinno być k_{min} oraz $iter_{max}$, a nie k_{min} oraz $iter_{max}$ (s. 46 i 47). Niestety, Doktorant stosuje nieprawidłowy zapis konsekwentnie w całej rozprawie, poprawne symbole nie są stosowane. Inne przykłady nieprawidłowych symboli są następujące: transpozycja oznaczona jest symbolem \dots^T , powinna być oznaczona przez \dots^T , w całkowaniu użyto symboli dt oraz $d\tau$, powinny być użyte symbole dt oraz $d\tau$, w różniczkowaniu użyto sformułowania $\frac{dy}{dx}$, podczas gdy powinno być $\frac{dy}{dx}$, funkcja sinus oznaczona jest symbolem sin , powinien być użyty symbol \sin , ograniczenia w algorytmach regulacji predykcyjnej są oznaczone symbolami u_{min} , u_{max} , du_{min} , du_{max} , choć powinny być użyte symbole u_{min} , u_{max} , du_{min} , du_{max} (rozdział 7). Przypomnijmy również, że symbole pierwiastków i substancji chemicznych zapisujemy bez pochyleń, czyli, przykładowo, powinno być SiO_2 , a nie SiO_2 (rozdział 4).

4. W równaniach różniczkowych cząstkowych (np. wzory (4.6), (5.1), (5.2), (5.3) oraz w tekście dotyczącym modeli matematycznych procesu kondycjonowania szkła) Doktorant używa nieprawidłowego oznaczenia pochodnych cząstkowych $\frac{dT(x,t)}{dt}$, $\frac{dT(x,t)}{dx}$ i $\frac{d^2T(x,t)}{dx^2}$, podczas gdy powinny być użyte symbole $\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$, $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ i $\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$.
5. Wszystkie symbole matematyczne są odpowiedniej wielkości, analogicznie dane przedstawione w tabelach. Wiele spośród zamieszczonych rysunków jest prawidłowej wielkości, wszystkie oznaczenia i szczegóły są świetnie widoczne. Niestety, niektóre rysunki są, moim zdaniem, niepotrzebnie pomniejszone, np. rys. 5.1-5.9. Użycie bardzo cienkiej linii też nie ułatwia zadania czytelnikowi. Kluczowe rysunki zamieszczone w rozdziałach 6 i 8, pokazujące skuteczność opracowanych przez doktoranta metod, mogłyby mieć nieco większą wysokość, co na pewno ułatwiłoby lekturę (większość rysunków w tych rozdziałach zamieszczono na oddzielnych stronach, które w górnej i dolnej części są puste).
6. Doktorant konsekwentnie kończy jednozdaniowe podpisy pod rysunkami oraz tytuły tabel kropkami, co jest błędem.

Podsumowując, pomimo podanych przez mnie powyżej drobnych uchybień językowych i redakcyjnych, moja ocena merytoryczna rozprawy jest bardzo pozytywna. Doktorant bardzo dobrze zrealizował postawione zadanie i dobrze opisał szczegóły zastosowanych rozwiązań oraz otrzymane wyniki. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że praca stoi na bardzo wysokim poziomie naukowym. Dodatkowo podkreślam, że recenzowana rozprawa ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Niestety, cechy tej nie ma znaczna część bronionych obecnie prac doktorskich.

Uważam, że Doktorant dysponuje świetnym materiałem, który, po ewentualnym rozszerzeniu (ponieważ niektóre z omówionych w rozprawie wyników już zostały opublikowane), może być opublikowany w najlepszych czasopismach światowych z dziedziny automatyki np. *ISA Transactions*, *Journal of Process Control*, *Control Engineering Practice* lub *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Zaproponowane metody identyfikacji modeli oraz regulacji są w znacznym stopniu uniwersalne i mogą być wykorzystane nie tylko w przypadku rozważanego w pracy procesu kondycjonowania szkła.

4. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta

Według bazy Scopus (dostęp 5.7.2022), w dorobku Doktoranta znajdują się następujące prace:

- a) jedna praca opublikowana w czasopiśmie *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* (obecny współczynnik wpływu IF=2,157, 100 pkt. na liście MEiN, kwartył Q3 w kategorii Automation & Control Systems),
- b) dwie prace konferencyjne opublikowane jako rozdziały w książkach wydanych przez wydawnictwo Springer (*Advances in Intelligent Systems and Computing* oraz *Lecture Notes in Computer Science*),
- c) dwie prace opublikowane w materiałach konferencji *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*.

Trzy z powyższych prac mają dwóch autorów (Doktoranta oraz prof. Byrskiego), natomiast dwie prace mają trzech autorów. Doktorant występuje na pierwszym miejscu publikacji jedynie w jednej pracy konferencyjnej (MMAR 2021).

Uwzględniając krótki okres działalności naukowej, dorobek publikacyjny Doktoranta jest całkowicie wystarczający. Pozytywnie oceniam fakt prezentacji wyników na konferencjach o zasięgu międzynarodowym oraz autorstwo artykułu, który ukazał się w czasopiśmie, posiadającym wskaźnik IF.

5. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Badania prowadzone przez mgr. inż. Michała Drapałę mają bardzo duże znaczenie praktyczne. Opracowane metody identyfikacji i regulacji predykcyjnej mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce do rozważanego w rozprawie procesu kondycjonowania szkła, a także innych procesów. 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.

Pomimo tego, że prace wykonane przez Doktoranta reprezentują wysoki poziom naukowy, pod względem merytorycznym rozprawa jest bardzo dobrze napisana i ma bardzo duże znaczenie praktyczne, ze względów formalnych nie mogę wnioskować o wyróżnienie rozprawy mgr. inż. Michała Drapały. Niestety, nie są spełnione kryteria ustalone przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w dniu 5 grudnia 2019 roku, które dotyczą publikacji, a mianowicie: autorstwo (współautorstwo) dwóch publikacji opublikowanych w czasopiśmie z listy JCR lub autorstwo (współautorstwo) jednej publikacji w czasopiśmie, które znajduje się w kwartylu Q1 rozważanej dyscypliny naukowej. Nic mi również nie wiadomo, aby Doktorant był autorem (współautorem) patentu lub wdrożenia przemysłowego. Jeżeli do czasu obrony podane kryteria zostaną spełnione, np. Doktorant opublikuje drugą pracę w czasopiśmie z listy JCR, z przyjemnością będę wnioskował o wyróżnienie.

7. Podsumowanie

Mgr inż. Michał Drapała w pełni zrealizował podane na wstępie cele rozprawy, a także wykazał słuszność sformułowanych tez. Wykazał się przy tym wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów technicznych. Dlatego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt. „Niestandardowe metody identyfikacji i obserwacji stanu ciągłych modeli liniowych i rozszerzenie ich funkcjonalności dla celów wielowymiarowego sterowania adaptacyjnego procesem kondycjonowania szkła” 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.

6 Maciej Zawojtowski