

Prof. Andrzej Bartoszewicz  
Instytut Automatyki  
Politechniki Łódzkiej

Łódź, 22 sierpnia 2019 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

magistra inżyniera Vincent Meganck

pod tytułem „Spiking Signal Processing: Modeling and Application  
in Control System of Electric Drive”

promotor rozprawy Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak

Recenzowana praca dotyczy ciekawego zagadnienia polegającego na wykorzystaniu sygnałów impulsowych do modelowania i sterowania obiektów dynamicznych. Autor proponuje wykorzystanie sygnałów podobnych do tych, które występują w komórkach neuronowych do próbkowania sygnałów ciągłych oraz do sterowania obiektami dynamicznymi opisanymi (zwyczajnymi) równaniami różniczkowymi. Przeprowadzona analiza bazuje na analogiach ze znanymi elementami teorii sterowania, takimi jak impuls Diraca czy próbkowanie dyskretne. Celem rozprawy jest przybliżenie bazujących na obserwacjach natury metod częściowo stosowanych w obszarze sztucznej inteligencji do zastosowań, w których standardowo stosowano do tej pory metody teorii sterowania. Aby zrealizować ten cel Doktorant stworzył teoretyczne podstawy sterowania układami ciągłymi z wykorzystaniem serii impulsów przypominających sygnały nerwowe, a skuteczność zaproponowanych rozwiązań potwierdził za pomocą symulacji komputerowych i eksperymentów dotyczących automatyki napędu elektrycznego. Wybór metod badawczych zastosowanych przez Doktoranta należy uznać za właściwy, a rezultaty za zadowalające. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest aktualna, nowatorska i dotyczy całego wachlarza zagadnień począwszy od elektrofizjologii, poprzez przetwarzanie sygnałów i teorię sterowania, aż po automatykę napędu elektrycznego. Trzeba jednak jednoznacznie stwierdzić, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Vincent Meganck bez wątpienia mieści się w zakresie dyscypliny *automatyka i robotyka*.

Rozprawa ma standardową objętość i liczy 99 stron. W jej skład wchodzi siedem zasadniczych rozdziałów, krótkie podsumowanie oraz spis literatury. Rozprawę uzupełnia sześć dodatków zawierających wykorzystane przez Autora modele opracowane w programie Simulink, równania



opisujące dynamikę rozważanego silnika oraz napisany w języku C kod programu mikrokontrolera używany w badaniach eksperymentalnych.

Pierwszy rozdział stanowi krótki wstęp do rozprawy. Doktorant przedstawia w nim budowę neuronu oraz opisuje impulsy nerwowe występujące w tej komórce. Autor przedstawia, z odpowiednimi odwołaniami do literatury, różne modele za pomocą których interpretowane są sygnały elektryczne w komórkach neuronowych, takie jak model Hodgkina-Huxleya czy model  $I_{Na,p} + I_K$ . Dla drugiego z tych modeli, w którym neuron opisany jest jako nieliniowy układ drugiego rzędu, Autor analizuje stabilność układu oraz pokazuje jego portrety fazowe.

Bibliografia zawarta w pracy składa się z 58 pozycji, co jest wystarczającą, chociaż stosunkowo niewielką liczbą jak na rozprawę doktorską w dyscyplinie *automatyka i robotyka*. Ponadto, wiele z tych pozycji jest cytowane jedynie zbiorczo (na przykład: [10] – [22] na stronie 11, [10] – [46] na stronie 23 lub [10] – [21] na stronie 93), co nie daje czytelnikowi pełnego tła historycznego rozważanego zagadnienia. Przedstawiony wstęp oraz wybór literatury dotyczącej fizjologii neuronu jest – jak się wydaje – właściwy, jednak w rozprawie nieco brakuje podobnego wstępu do rozważanych w niej zagadnień teorii sterowania. Doktorant uwzględnia w bibliografii jedynie kilka pozycji związanych z tą tematyką i cytuje je łącznie na początku drugiego rozdziału. Bibliografia uwzględnia odwołania do czterech publikacji Doktoranta, z których trzy są pracami konferencyjnymi. Należy jednak podkreślić, że czwarta z tych prac została opublikowana w bardzo renomowanym międzynarodowym czasopiśmie *Elsevier Neurocomputing Journal*, co zdecydowanie dobrze świadczy o uznaniu dla osiągnięć Doktoranta i jego Promotora w międzynarodowym gronie specjalistów.

Celem drugiego rozdziału rozprawy jest pokazanie analogii pomiędzy klasyczną teorią sterowania układami impulsowymi (układami, w których sygnały są próbkowane), a zjawiskami występującymi w komórce neuronowej. Doktorant rozpoczyna analizę od porównania impulsu nerwowego do bardzo ważnego i często wykorzystywanego w teorii sterowania impulsu Diraca. Pokazuje on następnie, że impulsy nerwowe o ustalonej amplitudzie mogą być wykorzystane do próbkowania sygnałów ciągłych. W szczególności, informacja o wartości sygnału ciągłego w danej chwili zostaje wyrażona jako „odległość” pomiędzy dwoma sąsiednimi impulsami. Zaproponowane podejście zasadniczo różni się od konwencjonalnej aproksymacji sygnałów ciągłych wykorzystującej na przykład ekstrapolator zerowego rzędu, gdzie sygnały dyskretne mają zmienną wartość, ale czas próbkowania jest stały. Podczas gdy dokładność aproksymacji za pomocą takiego ekstrapolatora zwiększa się dla małych okresów próbkowania, w zaproponowanej przez Autora metodzie dokładność ta zależy od stałego parametru zwanego czułością neuronu. Ponieważ rozważane impulsy przyjmują

z natury jedynie wartości dodatnie, Doktorant podkreśla że poprzez analogię do mięśni antagonistycznych człowieka dodatnie i ujemne sygnały ciągłe mogą być próbkowane za pomocą pary przeciwnych do siebie impulsów. W tym samym rozdziale Doktorant przedstawia niewątpliwie nowatorskie rozwiązanie łączące właściwości impulsów nerwowych z elementami teorii sterowania, a jednocześnie ciekawą alternatywę do stosowanych powszechnie metod dyskretyzacji sygnałów ciągłych.

W trzecim rozdziale rozprawy trzy typowe sygnały ciągłe zostały analitycznie wyrażone za pomocą szeregu impulsów o ustalonej amplitudzie. Doktorant pokazał, że przekształcenie funkcji stałej oraz wykładniczej w szereg impulsów ma podobne właściwości do stosowanej powszechnie transformaty Laplace'a. Zaprezentowane zostało również przekształcenie funkcji liniowej, dla której częstotliwość impulsów uzależniona jest od złotej liczby. Zaprezentowane w tym rozdziale przekształcenia są istotne, gdyż typowo spotykane sygnały można często wyrazić jako kombinację trzech podstawowych typów sygnałów rozpatrzonych przez Doktoranta.


Czwarty rozdział rozprawy opisuje zastosowanie rozważanych przez Doktoranta impulsów neuronowych do modelowania układów dynamicznych. Na przykładzie układu liniowego pokazane zostało, że sygnał wyjściowy układu może być wyrażony jako suma odpowiedzi na jednostkowe impulsy, przy czym dokładność tego odwzorowania zwiększa się dla impulsów o większej częstotliwości a mniejszej amplitudzie. Autor wprowadza pojęcie „transformacji impulsowej” i pokazuje, że umożliwia ona uzyskanie podobnej zależności pomiędzy wejściem a wyjściem układu do zależności otrzymanej za pomocą transformacji Laplace'a. W dalszej części rozdziału Doktorant rozważa możliwość identyfikacji układu nieliniowego za pomocą serii impulsów. Zaproponowana metoda polega na otrzymaniu liniowej reprezentacji rozważanego układu wokół ustalonych punktów pracy powiązanych z kolejnymi impulsami. Jak jednak widać z zaprezentowanych wykresów, odczytane parametry układu chwilami znacznie odbiegają od ich rzeczywistych wartości, przyjmując zdecydowanie zbyt dużą wartość lub zero. W związku z tym proszę Doktoranta o nieco dokładniejsze niż zawarte w rozprawie omówienie w trakcie obrony źródła tych błędów oraz możliwych sposobów ich uniknięcia.

W piątym rozdziale opisana została możliwość wykorzystania impulsów nerwowych w układach sterowania. Poprzez analogię z układem ruchowym człowieka, Autor proponuje metodę sterowania napędem prądu stałego wykorzystującą dwie przeciwstawne serie impulsów z ustalonymi opóźnieniami oraz dodatkowe sprzężenie inspirowane drżeniem ludzkich mięśni. Serie impulsów generują pożądaną w danej chwili wartość sygnału prądowego, która jest następnie przesyłana do regulatora

proporcjonalno-całkowego. Zaproponowana metoda pozwoliła uzyskać stabilną odpowiedź układu, przy czym jakość sterowania wyraźnie poprawia się przy zwiększeniu czułości neuronu i uwzględnieniu zjawiska drżenia. Doktorant zaproponował dodatkowo zastosowanie filtra dolnoprzepustowego, który podobnie do ludzkiego mięśnia, skutecznie przekształca wysokiej częstotliwości oscylacje impulsów w ciągły ruch układu.

Szósty rozdział rozprawy przedstawia wyniki eksperymentu, w którym zaproponowana metoda bazująca na impulsach nerwowych została wykorzystana do sterowania trójfazowym silnikiem indukcyjnym. Mimo że Doktorant zastosował pewne uproszczenia związane z ograniczoną mocą obliczeniową mikrokontrolera, udało mu się zapewnić pożądane właściwości obiektu z jakością sterowania podobną do uzyskiwanej przy użyciu klasycznego regulatora proporcjonalno-całkowego, co należy uznać za istotne osiągnięcie. Można jedynie zaznaczyć, że w rozprawie brakuje numerycznego porównania jakości sterowania pomiędzy nową strategią a regulatorem proporcjonalno-całkowym, wykorzystującego na przykład takie kryteria jak całka z wartości bezwzględnej uchybu czy też całka z kwadratu uchybu. Oczywiście tego rodzaju analiza nie jest niezbędna, ale dobrze zilustrowałaby skuteczność zaproponowanej metody w porównaniu do innych istniejących rozwiązań. Uwaga ta dotyczy zarówno symulacji zaprezentowanych pod koniec rozdziału piątego, jak i wyników eksperymentalnych w rozdziale szóstym. Proponuję aby podczas obrony rozprawy Doktorant zaprezentował takie porównanie, na przykład dla wyników eksperymentów pokazanych na rysunkach 6.6 – 6.13.


W rozdziale siódmym zasygnalizowana została możliwość zastosowania sieci neuronowych do przetwarzania rozważanej serii impulsów. Jak Autor zauważył, jest to intuicyjne rozwiązanie, ponieważ przybliży sposób przetwarzania rozważanych w pracy sygnałów do ich biologicznego odpowiednika. Przedyskutowane zostały podstawowe operacje algebraiczne na seriach sygnałów wyrażonych w takiej sieci oraz możliwość modelowania dynamiki układów liniowych tą metodą. Autor wspomniał także ciekawe potencjalne obszary przyszłych badań, takie jak zastosowanie sieci analogowych czy uczących się w układach sterowania bazujących na impulsach nerwowych. Trzeba jednak dostrzec, że ten rozdział rozprawy może sprawiać wrażenie tekstu napisanego nieco pośpiesznie. Świadczą o tym zarówno odwołania do nieodpowiednich rysunków na stronie 91 oraz liczne drobne uchybienia gramatyczne, jak również bardzo zwięzła prezentacja omawianych zagadnień (na każdy z dwóch ostatnich podrozdziałów tej części rozprawy oznaczonych jako podrozdziały 7.5 i 7.6 składają się zaledwie cztery zdania). Rozdział ósmy jest krótkim podsumowaniem, które podkreśla ponownie główne osiągnięcia zawarte w rozprawie.



Przechodząc do oceny rozprawy należy stwierdzić, że rozpatrywane w niej zagadnienie jest nietrywialne, a zaproponowane przez Doktoranta podejście nowatorskie. Przy przygotowaniu pracy Autor wykazał się wiedzą z zakresu przetwarzania sygnałów, teorii sterowania, automatyki napędu elektrycznego i podstaw neurobiologii. Oryginalność osiągnięć Doktoranta nie budzi wątpliwości. Rozprawa zawiera wprawdzie pewne uchybienia gramatyczne (Autor ma problemy z zapewnieniem zgodności form rzeczownika i związanego z nim czasownika – zdarza się, że rzeczownikowi w liczbie mnogiej towarzyszy czasownik z końcówką –s, a rzeczownikowi w trzeciej osobie liczby pojedynczej towarzyszy czasownik bez tej końcówki), ale napisana jest konsekwentnie i zrozumiale, a przeprowadzona w niej analiza jest poprawna. Istotną wartość mają zaprezentowane w rozprawie wyniki eksperymentalne pokazujące potencjalną praktyczną użyteczność nowej, niekonwencjonalnej metody sterowania zaproponowanej przez Doktoranta. Podczas czytania rozprawy nasunęły mi się jednak pewne krytyczne uwagi, z których większość jest nieistotna, lecz kilka wymaga wyjaśnienia ze strony Doktoranta.

Pewną słabością rozprawy niewątpliwie jest zaprezentowany przegląd literatury, w którym Doktorant zawarł 58 pozycji (uwzględniających cztery autocytowania i pięć linków do definicji w Wikipedii) i cytował je bardzo oszczędnie we wstępie do swojej pracy. Rozprawa z pewnością zyskałaby na wartości, gdyby posiadała obszerniejszy wstęp z bardziej szczegółowym opisem dotychczasowych dokonań związanych z tematyką rozprawy. Proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do tej kwestii.

Proszę także o wyjaśnienie podczas obrony dwóch zagadnień, które zostały już poruszone we wcześniejszej części recenzji. Po pierwsze, podczas identyfikacji układu nieliniowego przedstawionej w rozdziale czwartym, wartości parametrów alfa i beta na wykresie 4.8 tymczasowo przyjmowały nieodpowiednie wartości (zerowe lub zdecydowanie zbyt duże). Proszę o dokładniejsze wytłumaczenie z czego wynikają te błędy i czy można ich uniknąć na przykład stosując inną czułość neuronu. Po drugie, proszę o dokładniejsze porównanie strategii sterowania zaproponowanej w rozdziałach piątym i szóstym rozprawy do stosowanych powszechnie metod, na przykład przy użyciu typowych kryteriów jakości regulacji takich jak całka z wartości bezwzględnej uchybu (IAE) i/lub całka z kwadratu uchybu (ISE).

Moje dodatkowe pytanie dotyczy możliwości reprezentacji sygnałów ciągłych za pomocą serii impulsów. Jak zostało wyjaśnione w rozdziale trzecim, kluczowe znaczenie w rozważanym procesie próbkowania ma „odległość” pomiędzy dwoma sąsiednimi impulsami. Zgodnie z przeprowadzoną analizą oraz pokazanymi przykładami, odległości te maleją przy próbkowaniu sygnałów o dużej 

wartości. Naturalne wydaje się jednak stwierdzenie, że odległość pomiędzy dwoma wygenerowanymi impulsami nie może być dowolnie mała. W związku z tym proszę Doktoranta o wyjaśnienie czy istnieją rzeczywiste ograniczenia podczas generowania serii impulsów, które utrudniałyby reprezentację sygnałów ciągłych o bardzo dużej wartości za pomocą takiej serii.

Autorzy rozpraw doktorskich na ogół (choć nie zawsze) jawnie formułują na wstępie główne tezy, które następnie dowodzą. Ma to na celu przedstawienie czytelnikom założeń rozprawy oraz podkreślenie jej najważniejszych osiągnięć. Proszę Doktoranta o podjęcie próby sformułowania najważniejszej tezy lub dwóch/trzech najważniejszych tez swojej dysertacji.

Oprócz tego w rozprawie można się doszukać licznych drobnych niedociągnięć. Kilka z nich przytaczam poniżej.

- Wcięcia w akapitach (lub ich brak) nie są stosowane konsekwentnie w całej rozprawie.
- Rozprawa zawiera na ogół drobne błędy edycyjne. Na przykład na stronie 13 znajdujemy „centrum” zamiast „center” lub „centre” (w zależności od wyboru brytyjskiej lub amerykańskiej pisowni). W wielu miejscach liczba mnoga jest zastosowana zamiast pojedynczej lub odwrotnie, na przykład „group of neuron” zamiast „group of neurons” na stronie 35. Doktorant stosuje też niekiedy błędne formy gramatyczne, jak na przykład „follow” zamiast „follows” na stronie 87. Również na stronie 87 można znaleźć „made off” zamiast „made of”.

Wymienione powyżej uwagi nie mają jednak wpływu na moją jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy, która nie wymaga korekt ani uzupełnień. Wyniki zaprezentowane w rozprawie niewątpliwie stanowią oryginalne osiągnięcie Doktoranta oraz potwierdzają jego erudycję w zakresie dyscypliny *automatyka i robotyka*. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Vincent Meganck rozprawa spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.



## Conclusion

In my opinion the doctoral thesis of Vincent Meganck, MSc entitled *Spiking Signal Processing: Modeling and Application in Control System of Electric Drive* is original and contains significant novel contribution to the body of knowledge related to the discipline of automatic control and robotics. Therefore, I conclude that the doctoral thesis meets the requirements specified in Article 13, Paragraph 1 of the Act on Academic Degrees and Title and Degrees and Title in the Arts and I propose the thesis to be publicly defended.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive letter 'G' with a long horizontal stroke extending to the left.