

*Prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz*

rtad@agh.edu.pl; www.tadeusiewicz.pl; 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30  
Kierownik Katedry Automatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH;  
Doktor Honoris Causa dwunastu uczelni krajowych i zagranicznych  
Członek CK, Członek Panelu Ekspertów ST7 Narodowego Centrum Nauki,  
Członek Polskiej Akademii Umiejętności; Prezes Krakowskiego Oddziału PAN  
Członek Akademii Inżynierskiej, член Российской Академии Естественных Наук  
Participle Pleno Jure Academiae Europensis Scientiarum Artium Litterarumque  
Fellow of World Academy of Art and Science; Euro-engineer FEANI  
Senior Member of IEEE; professional member of ACM; member of SPIE

Kraków, 31.12.2013

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Krukowicza (pracownika Centralnego Instytutu Ochrony Pracy - PIB), zatytułowana „*Modele neuronowe w systemach aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem do przodu i nieliniową pierwotną ścieżką sygnału*”. Promotorem rozprawy był Świątej Pamięci prof. dr hab. inż. Zbigniew Engel, a promotorem pomocniczym dr inż. Leszek Morzyński. Podstawą do sporządzenia recenzji było pismo Sekretarza Rady Naukowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – PIB, dra inż. Dariusza Plebana nr TP/935/5342/13 z dnia 19.11.2013 .

### **Uwagi ogólne**

Opiniowana rozprawa jest niezbyt obszerna (81 stron), a jej treść podzielona jest na 8 rozdziałów. Dwa z nich mają charakter raczej porządkowy (**Wstęp** oraz **Podsumowanie i wnioski**) natomiast sześć pozostałych stanowi zasadniczą treść rozprawy, na bazie której przedstawiono niniejszą opinię. Treść pracy uzupełnia szczegółowy spis oznaczeń (umieszczony wygodnie na początku rozprawy) oraz obszerna **Bibliografia** (zawierająca 96 pozycji).

### **Ocena celu, zakresu oraz tezy rozprawy**

Cel i zakres rozprawy podany jest dosyć daleko (dopiero w trzecim rozdziale pracy), ale ze względu na to, że rozdziały 1 i 2 mają wyłącznie charakter wprowadzający nie jest to żadnym mankamentem. Zresztą tytuł rozprawy informuje dość dokładnie o jej treści, jak również dość wyraźnie zapowiada cele pracy ładnie opracowany **Wstęp**, dlatego czytelnik (a zwłaszcza opiniodawca) pracy otrzymuje zaraz na początku bardzo czytelne wskazówki, które wątki pracy są jej zasadniczym motywem, a które stanowią jedynie szeroko zarysowane tło. Ostateczna definicja rozwiązywanego zagadnienia naukowego związanego z własnym, oryginalnym wkładem Autora do uprawianej przez Niego dyscypliny naukowej znajduje się na stronie 16 w postaci konkretnie wyrażonego celu rozprawy. Dodam z przyjemnością, że sposobowi

przedstawienia tego celu nie mogę nic zarzucić, bowiem jest on zdefiniowany jasno, konkretnie i zrozumiale. Z zapisu na wskazanej wyżej stronie dowiadujemy się, że celem jest

*„Ocena możliwości zastosowania neuronowych modeli w systemach aktywnej redukcji hałasu z uwzględnieniem zjawisk nieliniowych w pierwotnej ścieżce sygnału.”*

Z tego postawienia celu wynika wyraźnie, co jest przedmiotem badań, jaki jest ich zamierzony efekt oraz jaki obszar techniki jest potencjalnym odbiorcą dla przewidywanych wyników. Wskazany cel pracy skonkretyzowano następnie podając na stronie 16 dwie tezy pracy, w następującym brzmieniu:

***Teza 1. Zastosowanie neuronowego modelu układów dynamicznych NARMAX w systemach aktywnej redukcji hałasu z nieliniową ścieżką pierwotną umożliwi kompensację wyższych harmonicznych sygnału kompensowanego.***

***Teza 2. Zastosowanie metody Lapunowa badania stabilności układów w systemach aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem do przodu poprawia ich skuteczność dla hałasów o charakterze procesów stochastycznych.***

Tezy ta zdecydowanie mi się podobają, a zadanie naukowe związane z wykazaniem prawdziwości tych tez swoim zakresem, stopniem trudności, a także znaczeniem naukowym i praktycznym **w pełni odpowiada ustawowym i zwyczajowym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim**, w związku z czym w pełni aprobuję wybór podanego celu i sformułowanych tez jako koncepcyjnej „osi” opiniowanej rozprawy.

### ***Ocena sposobu realizacji postawionego celu w treści rozprawy***

Scharakteryzowany wyżej problem badawczy został przez mgr inż. Tomasza Krukowicza bardzo dobrze rozwinięty w kolejnych rozdziałach opiniowanej rozprawy. Generalnie mogę stwierdzić, że w pracy tej wykorzystano sztuczne sieci neuronowe do stworzenia modelu układów dynamicznych określonych w pracy skrótem NARMAX, a następnie zastosowano ten model w systemach aktywnej redukcji hałasu, oznaczanych w opiniowanej pracy symbolem ARH. Autor słusznie zauważył przy tym, że bezpośrednie zastosowanie modelu NARMAX w systemach aktywnej redukcji hałasu nie jest możliwe z uwagi na wzajemną kompensację sygnału zakłócenia i sygnału kompensowanego. Wyciągnął z tego stwierdzenia trafny wniosek, że zastosowanie modelu NARMAX jako kontrolera systemu ARH wymaga estymacji sygnału kompensowanego tj. sygnału wyjściowego pierwotnej ścieżki sygnału oraz uwzględnienia wpływu wtórnej ścieżki

sygnału na proces uczenia sieci neuronowej. Idąc dalej tym tropem mgr Krukowicz zaproponował własny algorytm aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem do przodu wykorzystujący neuronowy model NARMAX (rozdział 4. rozprawy) – co oceniam jako znaczące osiągnięcie naukowe, wzbogacające zarówno wiedzę na temat metod aktywnej redukcji hałasu, jak i poszerzające znacząco obszar zastosowań sieci neuronowych traktowanych jako modele systemów dynamicznych. Tworząc wspomniany algorytm Doktorant wykonał znaczący krok w kierunku udowodnienia pierwszej tezy zarysowanej na początku rozprawy, nie był to jednak w tej sprawie krok końcowy.

W dalszej części opiniowanej rozprawy (w rozdziale 5) Doktorant zajął się problemem badania stabilności w systemach aktywnej redukcji hałasu wykorzystując metodę Lapunowa. W szczególności bardzo ciekawie i oryginalnie powiązał metodę Lapunowa z problemem uczenia sieci neuronowych radialnych. Wysoko cenię to osiągnięcie, ponieważ w obszarze uczenia sieci klasy RBF w literaturze jest o wiele mniej dobrych teoretycznych opisów w porównaniu do „konkurencyjnych” sieci MLP.

Podczas rozważań teoretycznych Doktorant przystąpił do symulacji numerycznych (w rozdziale 6) w wyniku których na początku dokładnie przebadano kontroler z neuronowym modelem NARMAX. Przytoczone wyniki symulacji pokazały, że symulowany system ARH działał zadowalająco. Dodatkowo udało się wykazać, że kontroler z neuronowym modelem NARMAX działał wyraźnie lepiej od systemu ARH z algorytmem FXBPNN, co jest wnioskiem o dużym znaczeniu z punktu widzenia potrzeb praktyki.

Następnie analogiczne badania przeprowadzono dla kontrolera z siecią neuronową radialną, przy czym badano porównawczo skuteczność algorytmu z metodą Lapunowa oraz zmodyfikowanego algorytmu z metodą Lapunowa, w którym ograniczono współczynnik wzmocnienia odpowiadający za szybkość przyrostu wag. Wskazana modyfikacja była potrzebna gdyż oryginalny algorytm z metodą Lapunowa generował niepożądane wysokoczęstotliwościowe oscylacje. Pomysłowość Doktoranta, który wymyślił tę modyfikację w odpowiedzi na nieoczekiwany problem, który się pojawił po wprowadzeniu numerycznego zabezpieczenia przed możliwymi w algorytmie przypadkami dzielenia przez zero – wystawia Mu bardzo dobre świadectwo jako Osobie kreatywnej i mającej „ofensywny stosunek” do napotykaných problemów utrudniających osiągnięcie zamierzonych celów naukowych lub technicznych. Cenię takie podejście oraz ludzi, których na to stać!

W następstwie zbadania kontrolera z siecią neuronową radialną mgr Krukowicz stwierdził, że szybkość zbiegania była w tym przypadku znacznie mniejsza niż w przypadku algorytmu ze wsteczną propagacją błędów. Nie jest to stwierdzenie zbyt odkrywcze, bo wolna zbieżność *backpropagation* jest ogólnie znana i była wielokrotnie dowiedziona, ale empiryczne potwierdzenie tego faktu w ocenianej rozprawie doktorskiej zdecydowanie stanowi jakiś pozytywny naukowy przyczynek. Natomiast generalnie większych zalet sieci RBF nie wykryto, za to potwierdzono znany z literatury problem opóźnień pojawiających się w adaptacyjnych układach sterowania z wykorzystaniem metody Lapunowa, więc globalny wniosek z całego badania symulacyjnego opisanego w rozdziale 6 wskazuje raczej na celowość użycia systemu z neuronowym modelem NARMAX.

Badanie symulacyjne ma swoje zalety, ale pełnowartościowy wynik naukowy może być uzyskany wyłącznie w następstwie odpowiednich badań laboratoryjnych. Mgr Krukowicz jest tego świadomy i nie szczędząc wysiłku zbudował stanowisko laboratoryjne do badań rozważanych systemów ARH. Stanowisko to zostało opisane (z godną pochwałą szczegółowością) w rozdziale 7 rozprawy, gdzie dodatkowo najpierw opisano schemat zaplanowanych badań, a potem przedstawiono i omówiono ich wyniki. Badania te wykazały, że algorytm z kontrolerem w postaci sieci neuronowej realizującej model NARMAX pozwolił na kompensację zarówno składowej podstawowej wynikającej z pobudzenia jak dodatkowych harmonicznych powstałych w wyniku zjawisk nieliniowych. W ten sposób dowiedziono pierwsze tezy postawionej na początku rozprawy. We wcześniejszych badaniach symulacyjnych Doktorant dowiódł drugiej tezy założonej na początku rozprawy, mówiącej, że zastosowanie metody Lapunowa badania stabilności układów w systemach aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem do przodu poprawia ich skuteczność dla hałasów o charakterze procesów stochastycznych. W ten sposób mogą stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty.

Rekapitulując tę część recenzji stwierdzam, że problem sformułowany w opiniowanej rozprawie został **prawidłowo zdefiniowany i poprawnie rozwiązany**. Dodatkowo stwierdzam, że jest to problem ważny naukowo i interesujący z punktu widzenia potrzeb praktyki, a także potwierdzam, że problem ten w pełni odpowiada oczekiwaniom, jakie wiąże się ustawowo i zwyczajowo z zagadnieniami naukowymi będącymi podstawą do nadawania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.



## **Główne zalety rozprawy**

Według mojej oceny **merytorycznej** zawartości rozprawy nie można postawić żadnego istotnego zarzutu. Merytorycznie (choć może nie konieczne kompozycyjnie, o czym piszę w dalszej części recenzji) **opiniowana praca jest więc bez zarzutu** i bezwarunkowo **spełnia** wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

W szczególności stwierdzam, że mgr Krukowicz w kolejnych rozdziałach swojej pracy udowodnił, że:

- Posiada obszerną i nowoczesną wiedzę w obszarze rozwiązywanych problemów naukowych
- Potrafi poprawnie formułować zadania naukowe oraz umie te zadania sprawnie rozwiązywać przy użyciu różnych narzędzi
- Wykazuje kreatywność i chwalebłą dociekliwość, przejawiającą się między innymi w tym, że nie poprzestał na uzyskaniu ciekawych wyników symulacyjnych dowodzących celowości zastosowania sieci neuronowych do aktywnej redukcji hałasu, ale zbudował model fizyczny przy użyciu którego wyniki te dodatkowo potwierdził.
- Potrafi niebanalnie wzbogacać znane z literatury algorytmy tworząc własne metody rozwiązywania podejmowanych problemów (tutaj wskazałbym między innymi na zaproponowane przez Doktoranta modyfikacje algorytmu z metodą Lapunowa, dostosowane do specyfiki rozwiązywanego zadania).
- Umie wnikliwie badać i krytycznie oceniać swoje własne osiągnięcia naukowe odnosząc je w sposób właściwy do dokonań innych badaczy oraz potrafi formułować i uzasadniać wartościowe naukowo wnioski.

Wymienione wyżej atuty, jakich doszukałem się studiując przedłożoną mi do opinii rozprawę zdecydowanie przemawiają za tym, by ocenianą dysertację uznać za **bardzo dobrą** pracę doktorską, a Pana mgr Tomasza Krukowicza zarekomendować Komisji oraz Radzie Centralnego Instytutu Ochrony Pracy - PIB jako doskonałego kandydata do stopnia naukowego doktora.

## **Uwagi dyskusyjne**

Żadna praca nie jest tak dobra, żeby nie można było sformułować w stosunku do niej kilku (przynajmniej) uwag polemicznych, dlatego chciałbym teraz odnotować takie uwagi polemiczne odnoszące do opiniowanej w tej recenzji rozprawy. Robię to raczej z obowiązku recenzenta, który

powinien nie tylko chwalić rozprawę, ale i wskazać jej słabe punkty, chociaż tych słabych punktów jest w opiniowanej pracy mgr Krukowicza naprawdę niewiele i są one mało znaczące.

Pierwsza uwaga dyskusyjna, jaka się mi nasunęła podczas studiowania przedłożonej rozprawy dotyczyła nazwy NARMAX. W opiniowanej pracy termin ten pojawia się bardzo wcześnie (pierwszy raz na stronie 14, a potem w tezie pracy i wielokrotnie w omówieniu zakresu pracy na stronach od 16 do 18) – i przez cały czas nie wiadomo w istocie, co ten termin oznacza. Dopiero na stronie 19 czytelnik znajduje wyjaśnienie tego skrótu, co jest (moim zdaniem) zdecydowanie za późno, bo na kilku wcześniejszych stronicach termin ten „straszył” i sprawiał wrażenie, że chodzi o jakiś bardzo szczególny typ modelu, podczas gdy rzeczywista treść ukryta pod tym skrótem jest dosyć prosta: NARMAX to *Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Input* i gdyby to od razu na początku wyjaśniono, to czytanie pracy byłoby znacznie mniej uciążliwe i stresujące.

Druga uwaga dyskusyjna związana jest z faktem, że mam wątpliwość co do sposobu rozumienia dwóch spośród czterech funkcji radialnych wymienionych w podrozdziale 5.2 (str. 33) rozprawy. O ile naturalne jest w tym miejscu zastosowanie funkcji Gaussa, a zrozumiałe matematycznie (choć nie do końca intuicyjne w sensie skutków działania w sieci RBF) jest zdefiniowanie funkcji „cienka płyta”, to zupełnie nie interpretowalne dla mnie jest dla mnie znaczenie tak zwanej *funkcji wielokwadratowej*, występującej zaraz potem także (z oczywistą modyfikacją) pod nazwą *odwrotnej funkcji wielokwadratowej*. W podanych przez Doktoranta wzorach nie znajduję uzasadnienia dla nazwy „funkcja **wielokwadratowa**” a wszelkie próby interpretowania tego, co by się miało dziać w radialnej funkcji neuronowej z takimi właśnie funkcjami wbudowanymi w neurony w przeprowadzonych przeze mnie (pospiesznych i powierzchniowych) badaniach kontrolnych prowadziły do niepowodzenia. Będę prosił Doktoranta o wyjaśnienie tej kwestii w ramach obrony, bo według mojej oceny tylko zastosowanie funkcji Gaussa w sieci RBF daje pozytywne wyniki (co zresztą opiniowany doktorat potwierdza, jako że mgr Krukowicz właśnie funkcji Gaussa w swoich badaniach używał!), zaś pozostałe postacie funkcji radialnych wymienione w podrozdziale 5.2 być może mają sens w jakichś szczególnych metodach interpolacji (przy których też bywają wymieniane), natomiast **jak się wydaje** absolutnie sensu nie mają w kontekście sieci neuronowych klasy RBF.

Wadą redakcyjną opiniowanej pracy jest też pewien brak umiaru, jaki wykazuje Autor przy przytaczaniu wyników szczegółowych badań. Jeśli spojrzeć na rysunki od 6.16 do 6.39 (w podrozdziale 6.2) to trudno się oprzeć wrażeniu, że jest ich zdecydowanie za wiele i że wszystkie

one mogły być zastąpione dwoma- trzema rysunkami ilustrującymi problem i odpowiednim zbiorczym omówieniem wyników. To samo, chociaż na mniejszą skalę, można odnotować w kontekście rysunków od 7.9 do 7.15.

### **Podsumowanie i wniosek końcowy**

Zasygnalizowane wyżej drobne wady kompozycyjne rozprawy nie umniejszają oczywiście w najmniejszym stopniu zdecydowanie **pozytywnej oceny** oryginalnych i wartościowych dokonań naukowych doktoranta, w związku z czym na zakończenie tej recenzji z całym przekonaniem stwierdzam, że przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Krukowicza zatytułowana „*Modele neuronowe w systemach aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem do przodu i nieliniową pierwotną ścieżką sygnału*” **spełnia** wymagania stosownej Ustawy. W piśmie zlecającym mi wykonanie tej recenzji wskazano jednoznacznie, na jakiej podstawie prawnej powinienem się opierać (*Ustawa o stopniach naukowych i o tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595*), przeto stwierdzam jednoznacznie, że oceniana rozprawa **spełnia wymagania sformułowane w tej Ustawie**. Na tej podstawie wnoszę do Rady Naukowej CIOP-PIB, prowadzącej ten przewód doktorski, o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony opiniowanej rozprawy.

