



Prof. dr hab. Daniel Krzysztof Wójcik

Warszawa, 30.11.2022

Pracownia Neuroinformatyki

Instytut Biologii Doświadczalnej

im. Marcelego Nenckiego PAN

02-093 Warszawa, ul. Pasteura 3

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Przyczyny pt.:
„Memrystywne układy neuromimetyczne i rezerwuarowe”

Rozprawa mgr. Dawida Przyczyny to zbiór sześciu prac, jednej przeglądowej i pięciu oryginalnych. Artykuły poprzedzone są abstraktami polskim i angielskim, krótkim wprowadzeniem na 8 stron, oraz streszczeniami przedstawionych publikacji. Cały tekst wprowadzający, namiastka autoreferatu, pisany jest bezosobowo: „pokazano, zrobiono, itd.” niezależnie od tego, czy kandydat pisze o pracy, którą sam wykonał, o wynikach uzyskanych w swoim zespole, czy o wynikach z literatury. W przypadku rozprawy doktorskiej stanowiącej osobny tekst jest to dla mnie akceptowalne, bo mogę przyjąć, że kandydat na doktora prezentuje wyłącznie swoje wyniki, ale nawet w takiej sytuacji znacznie łatwiej jest mi dokonać oceny, kiedy autor w warstwie językowej daje mi sygnały, że coś zrobił sam, pisząc np. „analizując dane X pokazałem, że .. [tu odnośnik do pracy wieloautorskiej]”. Pisząc „Pokazaliśmy, że beton może służyć do obliczeń” autor sygnalizuje, że omawiana praca jest dziełem zespołu, w którym uczestniczył, zaś „jak wiadomo od lat [odnośniki]” jednoznacznie wskazuje na wyniki z literatury.

Z punktu widzenia zadania recenzenta, wprowadzenie przygotowane przez kandydata, ma zasadnicze braki, poza wspomnianymi usterkami językowymi. Przedstawia ono pokrótce kontekst prowadzonych badań oraz skrótowo omawia tematykę przedstawionych prac. Rozprawa ma określony tytuł, ale nie ma zdefiniowanych żadnych celów. Wiadomo, co autor zrobił – wskazują na to załączone prace oraz załączone dokumenty. Ale nie wiadomo, jaki był cel lub cele autora. W związku z tym trudno ocenić, czy były one sensowne, czy autor je osiągnął oraz w jakim zakresie. Brakuje podsumowania, które pokazałoby spójną myśl czy linię rozumowania, która prowadziła autora do otrzymanych wyników. Jedyne, co możemy stwierdzić, to że autor brał udział w kilku projektach powiązanych tematycznie, które zakończyły się publikacją.

Kandydat dołączył 80 stron tekstu do swoich publikacji, a w zasadzie w żaden sposób to nie pomogło mi w ocenie jego wyników. Wystarczyłoby w zupełności 20-30 stron spójnego autoreferatu, który 1) przedstawiałby kontekst dziedzinowy, 2) wskazując wyzwania na tle rozwoju dziedziny w czytelny sposób określałby cele, które postawił sobie kandydat w swojej pracy, 3) skrótowo omawiał wyniki uzyskane przez autora, wskazując co zrobił sam, a co uzyskał we współpracy, 4) pokazywał, w jakim zakresie udało mu się osiągnąć postawione cele i jak zmienia to stan dziedziny. Obecnie jedynie pierwszy element jest obecny w sposób czytelny. Element trzeci, czyli prezentacja własnych wyników, ze względu na przyjętą manierę językową, nie jest jednoznaczny. Omówienie wyników to głównie skrótowe tłumaczenia poszczególnych artykułów, bez żadnych elementów integracji, z załączonymi niepotrzebnie wieloma rycinami z artykułów stanowiących rozprawę. Nawet one nie mogą być wykorzystane do oceny samodzielnej pracy autora, gdyż jak pisze w swoim omówieniu, wybrał je z publikacji ze względu na spójność tematyczną a nie ze względu na swój wkład. Np. na s. 39 kandydat pisze: „W ramach tego streszczenia przedstawiono jedynie zagadnienia związane tematycznie z pozostałymi pracami zawartymi w tej rozprawie.”

Z braku precyzyjnych wskazówek językowych w rozprawie mgr. Przyczyny zdecydowałem się dokonać oceny rozprawy na podstawie zgłoszonych artykułów oraz załączonych dokumentów, wskazujących na indywidualny wkład kandydata do poszczególnych publikacji oraz wkład pozostałych autorów.

Zgodnie z ustawą ocena rozprawy doktorskiej powinna zawierać trzy elementy:

- 1) ocenę, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata;
- 2) ocenę, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez kandydata;
- 3) ocenę, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Poniżej odniosę się szczegółowo do tych kwestii.

W pierwszym punkcie nie mam najmniejszej wątpliwości. Pierwszy artykuł przedstawiony przez kandydata to artykuł przeglądowy, w którym autor odpowiadał za opis teorii oraz przegląd literaturowy obliczania rezerwurowego. Przedstawił tam najnowsze osiągnięcia dziedziny związane z tematyką swojej pracy doktorskiej. Znalazło to odzwierciedlenie we wprowadzeniu dołączonym do rozprawy.

Ze względu na brak postawionych ogólnych celów rozprawy nie mogę ich wykorzystać jako ram mojej recenzji. Dlatego omówię pokrótce pozostałe pięć artykułów (D2 do D6) z naciskiem na wkład kandydata a następnie sumarycznie odniosę się do kwestii oryginalności rozwiązania problemu naukowego oraz samodzielności kandydata.

Artykuł D2. Dawid Przyczyna, Maria Lis, Kacper Pilarczyk, Konrad Szaciłowski „Hardware realization of the pattern recognition with an artificial neuromorphic device exhibiting a short-term memory”, *Molecules* 2019, 24, 2738

W artykule D2 autorzy wykorzystali element fotoelektryczny siarczku kadmu do klasyfikacji cyfr pisanych ręcznie z zestawu danych MNIST. Autorzy pokazali, że taki element ma pewne własności odpowiadające krótkoczasowej plastyczności synaptycznej obserwowanej w układzie nerwowym. Układ został wykorzystany do wstępnego przetwarzania obrazów w celu poprawy jakości klasyfikacji. W mojej ocenie wiązanie proponowanego modelu przetwarzania informacji z plastycznością synaptyczną idzie za daleko. Istotnym elementem wykorzystania plastyczności w komórce jest szumiące wejście, które istotnie próbkuje szeroki rozkład czasów między kolejnymi impulsami wejściowymi. W pracy D2 kolejne piksele są podawane ze stałą częstością próbkowania, w konsekwencji wzmocnienie krótkoczasowe jest próbkowane tylko w kilku punktach. Zauważmy też, że to wzmocnienie jest znacznie słabsze (ok. 1.45 max) w porównaniu z synapsą biologiczną (ok. 3.75 max). Nota bene, nie znalazłem w publikacji z jaką częstością kolejne piksele były podawane na wejściu. Zabrakło mi też zbadania otrzymanych wyników (indeksów separacji) jako funkcji dla okresu próbkowania. Nie ma też żadnych mechanizmów plastyczności długofalowej, w tym sensie, że wstępna analiza wcześniejszych przykładów nie wpływa na analizę przykładów kolejnych. Dlatego proponowany analizator siarczku kadmu dla mnie działa raczej jak nieliniowy filtr niż synapsa plastyczna. Uważam też, że stwierdzenie autorów, że „we present an extremely simplified, robust circuit made of only one photoelectrochemical element, the operation of which is similar to a simple classification system.” znowu idzie za daleko. Sam element działa jak filtr a klasyfikacja jest zaimplementowana przez dodatkowe przetwarzanie sygnałów (zliczanie pikseli, itd.).

W pracy D2 kandydat brał udział w pomiarach fotoelektrochemicznych. Przedstawił rozkład rozmiarów krystalitów na podstawie zdjęć SEM. Brał też udział w analizie wyników i pisaniu manuskryptu. Wykonanie tych elementów oceniam pozytywnie, chociaż zupełnie nie jest dla mnie jasna rola rozdziału 2.1 – charakterystyka materiału – w kontekście całej pracy D2. Poza rozdziałem 2.1 nigdzie w pracy nie pojawia się wzmianka o znaczeniu wyznaczonej optycznej przerwy energetycznej i rozkładu faz oraz ich roli dla badanego problemu.

Artykuł D3. Dawid Przyczyna, Maciej Suchecki, Andrew Adamatzky, Konrad Szaciłowski „Towards Embedded Computation with Building Materials”, *Materials* 2021, 14, 1724

We wstępie do pracy D3 autorzy piszą, że ich celem jest pokazanie, że beton można wykorzystać jako narzędzie do obliczeń. Pomysł sam w sobie nieoczekiwany i dowcipny. Nadaje nowy wymiar pojęciu inteligentnych budynków. Niemniej mam wątpliwości, czy autorzy osiągnęli postawiony cel. W pracy przygotowano beton czysty oraz domieszkowany półprzewodnikami lub opiłkami metalicznymi, w przygotowanych próbkach umieszczono 9 srebrnych drutów. Korzystając z woltamperometrii cyklicznej wykazano efekty histeretyczne, po czym szerzej zbadano własności materiałowe przygotowanych próbek. Następnie poprzez dwa druty podawano różne sygnały okresowe a na innych wybranych kontaktach rejestrowano zmieszane sygnały, które interpretowano jako wynik obliczeń wykonanych przez próbkę. Nie wiadomo, dlaczego na wejściu podawano takie a nie inne sygnały, dlaczego np. wybrano częstości ok. 300 Hz, a nie rząd wielkości mniejsze lub większe, itd. Wybór sygnałów wydaje się arbitralny.

Wykonano szereg złożonych analiz nieliniowych stosując zarówno metody zanurzeniowe, licząc wiodący wykładnik Liapunowa, różne wymiary fraktalne, entropie, itd. **Samą analizę, wykonaną głównie przez kandydata, oceniam pozytywnie**, natomiast zabrakło mi dyskusji, po co została przeprowadzona. Metody nieliniowe takie jak tu wykonano są bardzo wrażliwe na jakość danych i wymagające obliczeniowo. Przy tak przeprowadzonym doświadczeniu – sygnały podawane na wejścia układu złożonego, po czym intensywna obliczeniowo analiza sygnału wejściowego zakończona wykorzystaniem wybranych parametrów nieliniowych typu wymiary fraktalne i entropie do klasyfikacji sygnałów wejściowych – trudno mi się zgodzić z interpretacją, że mamy tu do czynienia z wykonaniem obliczeń przez betonową próbkę. Ponieważ nie zdefiniowano dobrze problemu – na czym ma polegać zadanie obliczeniowe? – nie można stwierdzić, jakie podejście byłoby optymalne. Czy wykonano prostsze analizy liniowe? Analizę widmową albo falkową sygnałów wyjściowych? Jestem przekonany, że gdybyśmy postawili za zadanie „rozpoznać jakie sygnały podano na wejściu” można by znaleźć markery znacznie prostsze, stabilniejsze i wymagające mniej danych, niż wykorzystane metody nieliniowe. Takiej próby nie podjęto, a jeżeli podjęto, nie ma o tym informacji w załączonej publikacji. Nie wiemy też, czy zaproponowana klasyfikacja w jakikolwiek sposób się generalizuje. Jak możemy wykorzystać zaproponowaną klasyfikację do nowych sygnałów. Nie wiadomo ile danych potrzeba do wiarygodnego oszacowania zaproponowanych miar oraz jaki jest czas obliczeń tych wszystkich miar (zanurzania, wyznaczania wymiaru zanurzeniowego i poszczególnych parametrów, itd.). Także dyskusja jest dla mnie nieprzekonująca. Autorzy wskazują rozpoznawanie mowy jako przykład zadania,

które mogłyby być wykonane przez podobny system w czasie rzeczywistym. Czy zdaniem autorów ich system działa w czasie rzeczywistym? Wykładniki Liapunowa, wymiary fraktalne itd. to są wielkości zdefiniowane asymptotycznie dla sygnałów stacjonarnych, nota bene stacjonarność sygnałów autorzy zbadali. Mowa jest zdecydowanie sygnałem niestacjonarnym. Nie widzę tu próby pogodzenia tych dwóch kwestii. Jeżeli zgodzimy się, że tutaj beton wykonuje obliczenia, to w tym sensie każdy układ fizyczny wykonuje obliczenia. Np. piasek wysypany na membranę głośnika czy płytę metalową wykonuje obliczenia, a mianowicie układa się w różne wzory w zależności od częstości tonu podawanego na głośnik, a zatem dokonuje klasyfikacji częstości.

Powiązanie starzejącego się betonu z rozwojem mózgu moim zdaniem idzie za daleko i jest nieuzasadnione. Mózg np. się z wiekiem uczy pewnych rzeczy, a przynajmniej taką mamy nadzieję; mniejszą w przypadku betonu. Autorzy w podsumowaniu wskazują, że pokazali klasyfikację kształtów sygnałów w układzie in materio. Wykładniki Liapunowa nie klasyfikują kształty sygnału ale mówią coś o układzie dynamicznym. Klasyfikacja była wykonana na podstawie obliczeń parametrów sygnałów sprzężonych fizycznie w próbce. Ponieważ wybrano miary asymptotyczne nie można ich wykorzystać do monitorowania własności betonu w czasie rzeczywistym. Trzeba by zbadać własności miar krótkookresowych. Autorzy piszą „Classification of waveforms in concrete can be performed only with the support of time-series processing algorithms operating at classical computers.” Autorzy tego nie pokazali. Pokazali, że ich procedura pozwala na pewną klasyfikację, ale nie pokazali, że nie można tego zrobić inaczej lub prościej.

Artykuł D4. Dawid Przyczyna, Sebastien Pecqueur, Dominique Vuillaume, Konrad Szaciłowski „Reservoir computing for sensing: an experimental approach”, *Int. J. Unconv. Comput.*, 2019, 14, 267.

W tej pracy autorzy dyskutują zastosowania obliczeń rezerwuarowych do detekcji chemicznej. Ponad połowa artykułu ma charakter przeglądowy, gdzie omówiono podstawowe typy obliczeń rezerwuarowych jak i niedawne modyfikacje, w tym proponowane wykorzystanie takich obliczeń w chemodetekcji w celu zmniejszenia interakcji czujnika ze środowiskiem. W rozdziale 4 tej pracy autorzy przedstawiają dwie przykładowe realizacje doświadczalne, wykrywanie zmian impedancji i detekcję jonów potasu. Opis tych doświadczeń jest powierzchowny i bezosobowy – dopiero po kilku akapitach zorientowałem się, że autorzy prezentują swoje nowe wyniki. Zamiast pisać, cytuję „A first crude experimental verification of the reservoir computing for sensing approach was demonstrated to detect monolayers of lipoic acid on gold surfaces” można było napisać, np. „To demonstrate practical applicability of these concepts we first show a simple method to detect monolayers of lipoic acid on

gold surfaces”, poprawiłoby to zrozumienie czytelnika. Samo doświadczenie jest opisane tak skrótowo, że nie rozumiałem, co jest wykrywane, o co tu chodzi. Czy chodzi o binarną obecność tych monowarstw? Czy też o pomiar ich ilości? Jak to było zwalidowane z użyciem innych metod? Czy zbadano precyzję pomiarów / detekcji?

Podobnie w drugim doświadczeniu trudno zrozumieć szczegóły osiągnięcia autorów. Autorzy piszą „Signal analysis was performed with Fourier transform to overcome noise present in the system.” Co to znaczy? Czy chodzi o użycie filtrowania niskoprzepustowego? Autorzy piszą o wykreślaniu szczytów transformaty Fouriera w funkcji czasu i dopasowywaniu do nich krzywych wykładniczych. Brakuje podstawowych informacji, np. w jakich oknach liczono transformatę, jaką metodą, itp. Nie wiadomo jak walidowano jakość zaproponowanej metody. Rozumiem, że rysunek 8.d poniekąd to pokazuje. Nie jest dla mnie jasne skąd biorą się te wykrywane jony potasu i w jakich warunkach sensor miałby działać. Nie jest też dla mnie jasne na jakiej podstawie autorzy stwierdzili, że zaproponowane przez nich metody stanowią przykład realizacji algorytmu SWEET.

Zgodnie z raportami współautorów wkład kandydata do powstania artykułu był dominujący. Część przeglądowa artykułu D4 potwierdza znajomość tematyki przez kandydata, zaś część doświadczalna wskazuje na jego umiejętności techniczne oraz umiejętność wykorzystania obliczania rezerwurowego w praktyce.

Artykuł D5. Dawid Przyczyna, Maria Szaciłowska, Marek Przybylski, Marcin Strzelecki, Konrad Szaciłowski „Recognition of Musical Dissonance and Consonance in a Simple Neuromorphic Computing System”, *Int. J. Unconv. Comput.* 2022, 17, 81

W artykule 5 autorzy wykorzystują symulowane układy oparte o memrystory do analizy interwałów muzycznych w celu identyfikacji dysonansów i konsonansów. Artykuł ma dobrze przygotowaną część przeglądową, zaproponowane przetwarzanie sygnałów jest ciekawe a metody i wyniki opisane właściwie. Chyba najciekawszym wynikiem całej rozprawy jest dla mnie rysunek 9 w tej pracy, gdzie mgr Przyczyna pokazał podobieństwo odwrotności liczby szczytów widmowych obserwowanych w przetworzonym sygnale oraz symulowanej krzywej konsonansu zmysłowego.

W pracy D5 nie jest dla mnie jasne, dlaczego opracowany system SNESM dla czystej fali sinusoidalnej generuje wyłącznie harmoniki. Być może jest to oczywiste z równań układu, ale nie widzę tego. Sama metoda analizy pokazana na rysunkach 10 i 11 znowu wydaje mi się przerostem formy nad treścią. Jak kandydat pokazał na rysunku 9 i o czym pisze w tekście, do identyfikacji konsonansów wystarcza zliczenie liczby szczytów widmowych. Sama stabilność zaproponowanej metody

reprezentacji widm nie została sprawdzona. Myślę, że konkretna reprezentacja będzie zależała od jakości wykrywania szczytów widmowych, co w praktyce będzie miało znaczenie głównie dla dysonansów, ale drugorzędne, w tym sensie, że dysonanse zawsze będą miały więcej punktów niż konsonanse. Co ponownie wskazuje, że liczba szczytów widmowych jest tu kluczowym parametrem.

Ponownie w pracy zabrakło mi dyskusji, co z tego wynika, np. dla zrozumienia percepcji konsonansu i dysonansu, o czym autorzy piszą we wprowadzeniu. Autorzy piszą w podsumowaniu: „Even such an abstract task as clustering of musical intervals according to their harmonic quality can be performed in a simple circuit without prior training or engaging any element of the theory of harmony into the algorithm.” Trudno mi się z tym zgodzić: klastrowanie nie jest realizowane przez symulowany system, ale w analizie post-hoc. Nie przekonuje mnie stwierdzenie, że „the results are very similar to the evaluation of sound samples by human subjects”, nie pokazano tego. Nie widzę też w jaki sposób wyniki przedstawionej pracy prowadzą do końcowych spekulacji autorów „that neural processes involved in perception of music may be related to the RC principles.”

Artykuł D6. Dawid Przychyna, Grzegorz Hess, Konrad Szaciłowski „KNOWM Memristors in a Bridge Synapse delay-based Reservoir Computing system for detection of epileptic seizures”, Int. J. Parallel Dist. Syst. 2022, 10.1080/17445760.2022.2088751

W ostatnim artykule rozprawy autorzy zajmują się wykorzystaniem układów opartych o memrystory do detekcji napadów padaczkowych. Wykorzystują do tego komercyjnie dostępny memrystor firmy KNOWM Inc. Po wstępnej części przeglądowej omawiającej obliczenia rezerwurowe, memrystory i kilka zagadnień dotyczących padaczki, autorzy omawiają memrystor KNOWM. W rozdziale drugim kandydat scharakteryzował użyty memrystor, zbadał całkowite zniekształcenie harmoniczne i jego charakterystykę szumową, oraz przetwarzanie typowych sygnałów przez memrystor KNOWM w układzie SNESM. W rozdziale 2.5 kandydat sprawdził działanie układów mostkowych opartych o memrystor KNOWM, zbliżonych do tych symulowanych w pracy D5, do detekcji napadów padaczkowych, analizując uprzednio zebrane otwarte dane. Podobnie jak we wcześniejszych pracach kandydat zajmował się charakterystyką i klasyfikacją poszczególnych przypadków na podstawie wyznaczonych licznych miar charakteryzujących złożoność sygnału przetworzonego przez układ SNESM. Ponownie trudno ocenić zasadność i optymalność wybranego podejścia ponieważ nie ma bezpośredniego porównania z innymi metodami, np. bezpośrednią charakterystyką zebranych danych. Oczywiście rysunek 9 pokazuje porównanie analizy surowych i przetworzonych sygnałów tymi samymi metodami, nie jestem jednak przekonany, czy prostsza charakterystyka oparta o metody widmowe czy

falkowe oryginalnego sygnału nie dałaby porównywalnych wyników klasyfikacji. Tym niemniej analizę tę oceniam pozytywnie, chociaż zabrakło mi dyskusji potencjalnego wykorzystania opracowanej metodologii do wykrywania napadów padaczkowych w nowych danych, czy np. podziału badanych zestawów na zbiór treningowy i testowy w celu sprawdzenia jakości identyfikacji przy optymalnych parametrach.

Podsumowując, uważam, że badania, które autor przedstawił w swojej rozprawie są ciekawe, chociaż w mojej ocenie ich interpretacja idzie często za daleko a niektóre wnioski są nieuprawnione. Nie mam jednak wątpliwości, że autor wykazał się umiejętnościami technicznymi, oczekiwanymi na tym etapie od kandydata do stopnia doktora. Pomimo moich licznych zastrzeżeń zarówno co do przedstawionych publikacji jak i towarzyszącego im wprowadzenia, moja ogólna ocena pracy mgr. Dawida Przyczyny jest pozytywna. Zwłaszcza ostatnie dwie prace, D5 i D6, wskazują na jego samodzielność i oryginalność analizy problemów naukowych. Gdyby zamiast pięciu pilotażowych badań wybrał jeden lub dwa tematy, np. z prac D5 i D6, i je pogłębił, gdyby oparł na tym jednolitą rozprawę wskazując jednoznacznie swoje cele, osiągnięcia, wyciągając wnioski ze swoich badań, to mogłaby być bardzo dobra rozprawa. Tym niemniej uważam, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr Dawida Przyczyny **spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668)**, dlatego zwracam się do Wysokiej Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. Dawida Przyczyny do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab. Daniel K. Wójcik