



ZAKŁAD FIZYKI BIOMEDYCZNEJ
INSTYTUT FIZYKI DOŚWIADCZALNEJ
WYDZIAŁU FIZYKI
UNIwersYTETU WARSZAWSKIEGO

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa, telefon: +48 22 5532870

dr hab. Jarosław Żygierewicz, prof. ucz.
Zakład Fizyki Biomedycznej
Wydział Fizyki UW

Warszawa 18.11.2022

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa mgr inż. Dawida Przyczyny, zatytułowana:
„Memrystywne układy neuromimetyczne i rezerwuarowe”.

Recenzję opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Ogólna ocena koncepcji i układu pracy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Przyczyny oparta jest na cyklu 6 publikacji w recenzowanych czasopismach. Dotyczy ona badania materiałów i układów umożliwiających obliczenia rezerwuarowe i możliwości wykorzystania ich w inżynierii neuromorficznej. Jest to nowa i rozwijająca się dopiero dziedzina, w ramach której podejmowane są próby wykorzystania właściwości pewnych materiałów do przetwarzania sygnałów i wykorzystania owych przetworzeń jako wyników nieliniowych obliczeń. Przedstawiony cykl prac wpisuje się w nurt demonstracji, że takie obliczenia są możliwe. Jednak na to czy znajdą one praktyczne zastosowania trzeba jeszcze poczekać.

Dysertacja składa się ze *Streszczenia*, *Wprowadzenia*, gdzie autor zarysowuje kontekst swoich badań i układ pracy, po czym następują *Streszczenia poszczególnych prac* wchodzących w cykl. Rozprawa zawiera też kopie publikacji stanowiących wspomniany cykl. Całość uzupełniona jest o zestaw oświadczeń współautorów co do ich roli w poszczególnych publikacjach.

Wprowadzenie oraz streszczenia poszczególnych prac można postrzegać jako swego rodzaju autoreferat, aczkolwiek taka forma prezentacji nie jest w mojej opinii najlepsza. Mankamentem jest to, że z jednej strony streszczenia zawierają względem siebie pewną redundancję informacji wstępnych, z drugiej nie tworzą spójnego obrazu dokonań Doktoranta a z trzeciej nie dają wprost informacji o osobistym wkładzie Doktoranta do poszczególnych prac. Pod względem pełnienia roli autoreferatu nieco lepiej wypada *Streszczenie* przedstawione na samym początku rozprawy, które w swej drugiej połowie – paragrafy na stronach 12-14 – nakreśla zarówno zawartość jak i koncepcję powiązań pomiędzy poszczególnymi pracami w cyklu, tyle, że prezentacja treści jest tu bardzo skrócona.

Przegląd streszczeń i artykułów źródłowych, ocena udziału Doktoranta.

Praca D1: „*Towards synthetic neural networks: can artificial electrochemical neurons be coupled with artificial memristive synapses?*” opublikowana została w *Japanese Journal of Applied Physics* (IF 1.491). Muszę odnotować, że nie znalazłem formalnych oświadczeń 3 spośród 4 współautorów tej pracy, zamieszczone jest jedynie oświadczenie prof. Szaciłowskiego, zaś Doktorant nie jest wymieniany w pracy jako autor korespondujący. Zartem w przypadku tej pracy skupię się na ocenie jej Streszczenia, które bez wątpienia jest autorskim dziełem pana Dawida Przyczyny.

Streszczenie tej pracy skupia się na dość ogólnym wprowadzeniu do koncepcji obliczeń za pomocą materiałów wykazujących właściwości memfraktorów – pasywnych elementów obwodów elektrycznych wykazujących zależność od historii przepływu ładunku elektrycznego przez nie. Przypomniane są też niektóre elementarne modele neuronów jako jednostek przetwarzających informację. Zabrakło mi w tym opisie rozróżnienia na to co jest używane aktualnie do obliczeń wykonywanych na komputerach z CPU i GPU w celu przetwarzania informacji a tym, że modele generujące iglice służą obecnie głównie do modelowania własności układów biologicznych pomagając zrozumieć działanie mózgu. Być może prace nad obliczeniami w materiałach memfraktorowych doprowadzą kiedyś do upowszechnienia obliczeń za pomocą przetwarzania różnego typu kodowania, ale nie jest to jeszcze praktyka powszechna i warto było to zaznaczyć, zresztą jest o tym mowa w źródłowym art. D1.

Opis matematyczny obliczeń rezerwuarowych jest przejrzysty, Autor informuje, że jest on zaczerpnięty od Zorana Konkoli, ale zabrakło mi odniesienia się do konkretnych prac Zorana Konkoli – żeby się tego dowiedzieć trzeba sięgnąć do źródłowej pracy D1. Podobnie w ostatnim akapicie tego streszczenia pojawiają się odwołania do prac Doktoranta wg tytułów, ale oprócz tego przydatne by było przywołanie symboli (D1-D6) używanych przez Autora do identyfikacji prac, na których bazuje rozprawa.

Z obowiązku recenzenta, muszę jeszcze zwrócić uwagę na szczegół, że w równaniu 2 pojawia się symbol T , który, choć łatwo się domyśleć czym jest jednak formalnie nie został opisany.

Praca D2: „*Hardware realization of the pattern recognition with an artificial neuromorphic device exhibiting a short-term memory*” ukazała się w *Molecules* (IF 4.927). Udział poszczególnych współautorów jest opisany w samej pracy. Wg tego opisu wkład Doktoranta jest szczególnie istotny w eksperymentach fotoelektrochemicznych zaś w analizie danych na równi z pozostałymi 3 autorami.

W artykule opisane jest działanie układu fotoelektrochemicznego wykazującego krótko czasowe wzmocnienie odpowiedzi dla bodźców świetlnych przychodzących w pewnym zakresie czasów. Działanie to, jak słusznie zauważa Autor, można postrzegać jako analogiczne do działania biologicznych synaps wykazujących zjawisko krótko czasowego wzmocnienia. Wg deklaracji można wnioskować, że to właśnie eksperymenty z tym układem są istotnym wkładem Doktoranta do tej pracy. Ta część jest dobrze wytłumaczona i zilustrowana. Fakt, że głównym wkładem pana Przyczyny była część eksperymentalna może częściowo tłumaczyć, że w streszczeniu nie została podkreślona interpretacja i sens wykorzystanej w pracy D2 parametryzacji obrazów przed i po zastosowaniu transformacji za pomocą badanego urządzenia – w pracy D2 pojawia się taka interpretacja – zgrubne szacowanie wielkości znaku i jego symetrii.

Generalnie praca D2 może stanowić „proof of concept”, szczególnie w zakresie działania układu fotoelektrochemicznego jako nieliniowego przetwornika sygnałów, niemniej

propozycja wykorzystania go do transformacji liter ze zbioru MNIST wraz z bardzo mało efektywnym klasyfikatorem i sposobem jego oceny w mojej opinii jest bardzo „akademickim” przykładem.

Praca D3: „*Towards Embedded Computation with Building Materials*” ukazała się w *Materials* (IF 3.748). Oryginalny artykuł zawiera oświadczenia współautorów dotyczące udziału. Wynika z nich istotny wkład pana Dawida Przyczyny.

Artykuł ma dwa istotne aspekty: badanie własności domieszkowanego betonu pod kątem charakterystyk umożliwiających obliczenia rezerwuarowe oraz próbę pokazania możliwości przetwarzania i klasyfikacji sygnałów przez układ zawierający taki materiał. Autor pokazał na przykładach scharakteryzowanych próbek obecność przecinającej się pętli histerezy. Pytaniem, które mi się tu nasuwa jest na ile powtarzalne są otrzymane charakterystyki? Jak zależą one od np. wilgotności czy temperatury materiału?

Zaproponowany układ klasyfikatora można uznać za „proof of concept” demonstrujący, że nawet tak wydawałoby się powszechne materiały jak beton można wykorzystać w układach przetwarzania informacji. Przy czym raczej uznałbym, że nieliniowe zniekształcenia sygnałów w próbkach betonu to wstępne przetwarzanie danych, a nie klasyfikacja, gdyż do właściwej klasyfikacji okazało się niezbędne wykorzystanie zaawansowanych nieliniowych technik analizy sygnału wyjściowego z badanych próbek. Swoją drogą zastanawia mnie czy porównywalnych, a może nawet lepszych wyników nie dałaby stosunkowo prosta analiza widmowa owych sygnałów.

Mankamentem pracy jest brak zademonstrowania „zysku” z zastosowania przetworzenia sygnału przez badane próbki. Czy potraktowanie podobną baterią technik nieliniowych sygnału zmieszanego w sposób liniowy dawałoby gorsze czy lepsze rozróżnianie mieszanych sygnałów?

Podobnie jak w pracy D2, wydaje mi się, że wybór zadania, na którym autorzy demonstrowali możliwości przekształcania sygnału jest nieco sztuczny i czysto akademicki. Czy nie warto by tu raczej rozważyć np. zmian w przetwarzaniu sygnału pod wpływem naprężeń, wibracji czy innych warunków, którym konstrukcje betonowe są poddawane w praktyce?

Praca D4: „*Reservoir computing for sensing: an experimental approach*” ukazała się w *International Journal of Unconventional Computing* (IF 1.844). Dawid Przyczyna jest pierwszym autorem. Oryginalna praca D4 nie posiada opisu udziału autorów a w zestawie oświadczeń nie ma oświadczeń 2 spośród 3 współautorów. Niemniej sądząc z akcentów położonych w streszczeniu pracy, gdzie Doktorant skupia się na pokazaniu, że układ zawierający elementy o nieliniowej dynamice może być wykorzystany jako swoisty sensor stężenia jonów K⁺ można przypuszczać, że to właśnie był jego główny wkład do badań opisanych w D4. W pracy zabrakło mi odniesienia i porównania do bardziej konwencjonalnych technik dających analogiczne informacje.

Praca D5: „*Recognition of Musical Dissonance and Consonance in a Simple Neuromorphic Computing System*” również ukazała się w *International Journal of Unconventional Computing*. Doktorant jest w tej pracy pierwszym autorem i wg oświadczeń w manuskrypcie wykonał większość analizy danych. W pracy zademonstrowano, że proste układy z memrystorem prowadzą do zniekształceń nieliniowych sygnałów wejściowych, które to zniekształcenia w połączeniu z pętlą opóźnionego sprzężenia zwrotnego tworzą mikser częstotliwości produkujący na wyjściu sumy i różnice częstości wejściowych. Co więcej w

każdej generacji obiegów sygnału ów mikser ma szansę wytworzyć nowe kombinacje liniowe częstości stymulacji. Autorzy zademonstrowali możliwość wykorzystania takiego urządzenia do analizy par sygnałów różniących się częstością i interpretują otrzymane wyniki w kontekście dysonansów i konsonansów interwałów muzycznych. Wyniki w pracy D5 zaprezentowane są w przejrzysty sposób.

Praca D6: „*KNOWM Memristors in a Bridge Synapse delay-based Reservoir Computing system for detection of epileptic seizures*” ukazała się w International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems (IF 1.505). Na podstawie oświadczeń współautorów można uznać wiodącą rolę Doktoranta w opisanych badaniach.

Autorzy zbadali charakterystyki memrystora wykorzystanego do budowy prostego układu obliczeń rezerwurowych. Przeprowadzono analizę zniekształceń wprowadzanych przez układ dla prostych sygnałów, w szczególności różnic w tłumieniu dla przebiegów o różnych kształtach i częstościach. Zademonstrowano klasyfikację czterech klas sygnałów mierzonych przez akcelerometr, w tym klasy odpowiadającej napadowi epileptycznemu.

Dla sygnałów wyliczane były cechy opisujące własności nieliniowe charakteryzujące złożoność sygnałów i te cechy były klasyfikowane przez drzewo decyzyjne. Zatem badany układ spełniał rolę preprocesora sygnału. Wyniki klasyfikacji sygnału przetworzonego przez badany układ odniesiono do referencyjnych wyników dla danych nieprzetworzonych. Zostały udokumentowane zmiany w rozkładach i korelacjach cech sygnału przetworzonego względem surowego.

Podsumowując przegląd dokonań Doktoranta zaprezentowany w Dysertacji widać na przestrzeni zaprezentowanych w cyklu prac jego rozwój, a w szczególności coraz lepsze radzenie sobie z prezentacją i uzasadnianiem stawianych tez. Jeśli chodzi o streszczenia prac to niestety były na tyle pozbawione szczegółów, że aby je zrozumieć konieczne było przeczytanie prac źródłowych.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że opiniowana rozprawa cechuje się istotną wartością naukową. Rozprawa będąca przedmiotem recenzji dowodzi zarówno umiejętności rozwiązywania problemów naukowych, jak również dokonywania syntezy otrzymanych wyników i wyciągania oryginalnych wniosków. Wszystko to sprawia, że **oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą o stopniach i tytule naukowym**. Zatem wnioskuję do Wysockiej Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie jej Autora, mgr inż. **Dawida Przyczyny** do jej publicznej obrony.

Jawostaw Pypiecowski