

Gliwice, 9-12-2025

Prof. dr hab. Tomasz Błachowicz

Politechnika Śląska

Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne

ul. S. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice

tel. 32 237-20-71

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 18.12.2025

Zarejestrowano pod nr 510.7.2025

Podpis *dm*

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Mojsiejuka

Przedłożona do oceny praca doktorska pt. *Macrospin models: scalable simulations of multilayer spintronic devices* stanowi obszerną i ambitną próbę kompleksowego opracowania narzędzi oraz technik modelowania mikromagnetycznego, ukierunkowanych na analizę zjawisk zachodzących w rozbudowanych, współczesnych strukturach spintronicznych.

Dysertacja liczy 153 strony, zawiera liczne dodatki, w tym pełne teksty trzech publikacji, które stanowią integralną część przedstawionych badań. Jest to praca o szerokim spektrum, obejmująca zarówno podstawy teoretyczne - będące podstawą dla wytworzonego oprogramowania - jak również analizę zjawisk eksperymentalnych oraz prezentuje zastosowania metod uczenia maszynowego ze wzmocnieniem w kontekście sterowania i optymalizacji pracy urządzeń spintronicznych.

Autor wykazuje głęboką znajomość współczesnego stanu badań w obszarze spintroniki oraz biegłość w metodach numerycznych i mikromagnetycznych. Już we wprowadzeniu zarysowuje on szeroki kontekst badań dotyczących m.in. pamięci nieulotnych, zjawiska typu spin-orbit torque, dynamikę nano-oscylatorów spintronicznych oraz koncepcję obliczeń neuromorficznych opartych na urządzeniach nano-magnetycznych.

Wprowadzenie, na początku dysertacji, w znacznej części ma charakter przeglądowy a autor potrafi osadzić swoje badania w szerszym obrazie aktualnych kierunków rozwoju technologii

spintronicznych. W tym miejscu należy podkreślić, że część przeglądowa została przygotowana bardzo starannie i świadczy o pełnej orientacji autora w złożonym i szybko rozwijającym się obszarze badań.

Jednocześnie jednak należy odnotować pewien brak, który uwidacznia się już na początku pracy: dysertacja nie zawiera jednoznacznie sformułowanej tezy badawczej ani jasno wytyczonego celu głównego badań. Autor deklaruje krótką listę osiągnięć oraz omawia zakres zastosowań opracowanego pakietu symulacyjnego cmtj, ale nie przedstawia nadrzędnego pytania naukowego ani hipotezy, wokół której koncentrują się wszystkie rozdziały pracy. W przypadku dysertacji o charakterze aplikacyjnym nie jest to wada dyskwalifikująca, jednak ogranicza ona przejrzystość konstrukcji pracy i utrudnia czytelnikowi uchwycenie jej przewodniego sensu. W kolejnych częściach recenzji będę wracał do tego zagadnienia, ponieważ ma ono wpływ na odbiór całej pracy.

Pierwszy rozdział – poświęcony metodom numerycznym – jest nie tylko obszerny, ale również przygotowany na wyjątkowo wysokim poziomie merytorycznym. Autor zaczyna od przedstawienia podstawowych równań opisujących dynamikę magnetyzacji, w szczególności równanie Landaua-Lifschitz-Gilberta-Slonczewskiego (LLGS) w różnych formach, obejmujących różne mechanizmy dynamiki namagnesowania. Prezentowane są szczegółowe wyprowadzenia matematyczne, liczne przekształcenia oraz zestawienie wszystkich składników energii swobodnej, wynikającej z takich zjawisk fizycznych, jak: anizotropia magnetokrystaliczna, pola demagnetyzacyjne, oddziaływania wymienne - w szczególności wymienne między-warstwowe, a także oddziaływanie Dzyaloshinskiego-Moriya, często pomijane w prostszych modelach. Autor przedstawia te elementy w sposób czytelny i konsekwentny, wyjaśniając fizyczne pochodzenie poszczególnych składników.

Dużą wartością tego rozdziału jest omówienie różnych metod numerycznych stosowanych do rozwiązywania równań typu LLGS, zarówno deterministycznych, jak i stochastycznych. Autor nie ogranicza się do przedstawienia metod prostych, jak np. podstawowej metody Rungego-Kutty, lecz szczegółowo opisuje algorytmy adaptacyjne, metody Heuna w wersji stochastycznej a także problemy związane z utrzymaniem normy wektora magnetyzacji oraz poprawnym generowaniem szumu białego i szumu o charakterystyce $1/f$. Rozdział ten stanowi faktyczny fundament działania pakietu cmtj i jest jednym z najbardziej wartościowych fragmentów całej dysertacji. Trzeba przy tym zaznaczyć, że widać tu samodzielność autora w budowie i implementacji oprogramowania symulacyjnego, co z pewnością stanowi jego istotny wkład w rozwój narzędzi używanych w spintronice.

Kolejny rozdział poświęcony jest modelowaniu urządzeń opartych o spinowy efekt Halla, w szczególności w zastosowaniu do analizy metod detekcji napięcia Halla w próbkach

Ta/CoFeB oraz analizie zjawiska asymetrycznego i wielopoziomowego przełączania w strukturach Co/Pt/Co. Autor opiera się tutaj na publikacji, której jest współautorem, oraz na danych pochodzących z eksperymentów rzeczywistych. Korzystając z pakietu cmtj, przedstawia szczegółową analizę składowych harmoniczných napięcia Halla i omawia wpływ poszczególnych wkładów (polowe, tłumiące) na obserwowane przebiegi. W tej części dysertacji szczególnie cenne jest zestawienie wyników symulacji w nawiązaniu do warunków eksperymentalnych – autor potrafi w sposób przekonujący pokazać, że modele mikromagnetyczne, mimo uproszczeń tzw. modelu makrospinowego, pozwalają na zrozumienie mechanizmów obserwowanych w bardziej złożonych sytuacjach.

Trzeci rozdział, poświęcony modelowaniu magnetycznych złącz tunelowych (MTJ) oraz sprzężeń pomiędzy oscylatorami spinowymi, jest rozbudowany i należy również do najbardziej technicznie zaawansowanych części dysertacji. Autor przedstawia analizę sprzężenia elektrycznego między oscylatorami połączonymi szeregowo, omawia warunki synchronizacji oraz przedstawia własną interpretację zjawiska desynchronizacji obserwowanego w eksperymentach. W rozdziale tym przedstawiono również rozległą analizę modeli szumów typu $1/f$ oraz sposób ich generowania i implementacji w ramach symulacji stochastycznych. Jest to obszar badawczo wyjątkowo trudny a autor wykazuje pełne zrozumienie dla zarówno ograniczeń modeli, jak i wymagań numerycznych związanych z ich implementacją. Jednocześnie, wydaje się, że można by było tym miejscu szerzej omówić wpływ temperatury na generowane przebiegi szumowe oraz chociaż zarysować sposób potencjalnej modyfikacji pakietu cmtj tak, aby uwzględnić efekty termiczne w sposób nawiązujący do sytuacji realistycznych, praktycznych.

Ostatni rozdział wprowadza nowatorskie podejście do sterowania urządzeniami spintronicznymi z wykorzystaniem metody uczenia maszynowego ze wzmocnieniem do synchronizacji oscylatorów i do generacji impulsów prądowych prowadzących do określonego starowania przełączaniem magnetyzacji. Autor przygotował środowisko numeryczne, zaimplementował algorytmy uczenia i wykazał ich skuteczność w rozwiązaniu problemu. Jest to fragment o bardzo dużym potencjale a zastosowanie metod uczenia maszynowego w elektronice spinowej jest podejściem świeżym i zgodnym z aktualnymi trendami badawczymi w dziedzinie sterowania adaptacyjnego. Jedyną istotną słabością tej części jest brak szerszego porównania z klasycznymi metodami optymalizacji, które mogłyby stanowić punkt odniesienia dla wykazania przewag metod z wymuszeniem nad innymi metodami. Bez tego trudno jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, czy metody uczenia maszynowego ze wzmocnieniem przynoszą wymierną przewagę numeryczną lub obliczeniową, czy też są jedynie atrakcyjną, lecz niekoniecznie efektywniejszą alternatywą.

Podsumowanie dysertacji, choć poprawne, nie rozwija wniosków w kontekście tezy – czego brakuje w całej pracy – oraz nie przedstawia syntetycznej oceny stopnia realizacji głównego celu badawczego, bo ten jest zbyt ogólnie nakreślony. W obecnej formie, podsumowanie dysertacji, pełni funkcję streszczenia, ale nie przedstawia ujęcia pracy w szerszej perspektywie badawczej. W dysertacji brakuje zatem strukturalnego podsumowania, które jasno wskazywałoby, co zostało osiągnięte i w jakim sensie stanowi to rozwój dziedziny.

Pośród mocnych stron pracy należy wymienić bardzo wysoki poziom merytoryczny, biegłość autora w metodach obliczeniowych, doskonałą znajomość aktualnej literatury, umiejętność powiązania symulacji z eksperymentami oraz opracowanie kompletnego, oryginalnego pakietu symulacyjnego. Autor wykazuje także dużą samodzielność i dojrzałość badawczą. Z drugiej strony, najistotniejszymi słabościami pracy pozostają brak jednoznacznej tezy i przejrzystego sformułowania celu, nieprecyzyjne określenie wkładu własnego oraz pewne niedociągnięcia edycyjne, w szczególności brak numeracji rozdziałów i podrozdziałów. Trzeba również podkreślić, że przy tak szerokim zakresie tematycznym ważne jest szczególnie wyraźne odróżnienie indywidualnych osiągnięć doktoranta na tle wyników pracy grupy badawczej. Uważam, że w wielu miejscach pracy niepotrzebnie jest używana forma „my” zamiast „ja”.

Całościowa analiza treści dysertacji rodzi zatem kilka pytań kierowanych do kandydata na stopień doktora:

- 1) Jak można by sformułować jednoznacznie główny cel pracy oraz podać główną tezę dysertacji, która była przedmiotem badań?
- 2) Jaki był wkład kandydata do wyników badań naukowych dla kolejno omawianych w pracy: struktur wykorzystujących efekt Halla, złącz tunelowych oraz oscylatorów spintronicznych?
- 3) Dlaczego metoda uczenia maszynowego ze wzmocnieniem jest bardziej efektywna na tle bardziej klasycznych, prostszych metod, np. opartych o uczenie nienadzorowane; czy były prowadzone w tym zakresie badania porównawcze?
- 4) Jaki wpływ na wyniki obliczeń szumu typu $1/f^\alpha$ może mieć zastosowanie symulacji mikromagnetycznych prowadzonych dla temperatur wyższych od zera bezwzględnego z wykorzystaniem odpowiednich równań? Jak należałoby wtedy zmodyfikować równania typu LLGS dla $T > 0$?

Pomimo wymienionych wyżej zastrzeżeń przedstawiona dysertacja stanowi wartościowy wkład w rozwój modelowania mikromagnetycznego i jego zastosowań w spintronice. Pan Jakub Mojsiejuk zaprezentował w przedstawionej dysertacji wysoką dojrzałość badawczą, kompetencje i umiejętności, które w pełni uzasadniają pozytywną ocenę pracy. Pracę doktorską oceniam na ocenę bardzo dobrą i stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego w Dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

