

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Steblińskiego pt.:

**„Analiza dynamiki przemagnesowania
ferromagnetycznych struktur nisko wymiarowych
pod kątem zastosowań w układach pamięciowych
i przetwarzania informacji”**

wykonanej na Wydziale Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej.

W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej mgr inż. Paweł Stebliński zaprezentował oryginalne wyniki badań numerycznych cienkowarstwowych struktur ferromagnetycznych pełniących rolę komórki pamięci magnetycznej. Wyniki te otrzymał z wykorzystaniem samodzielnie przygotowanego oprogramowania do modelowania dynamiki procesu przemagnesowania materiałów ferromagnetycznych w temperaturach wyższych od temperatury zera bezwzględnego. I właśnie opracowanie tego oprogramowania Autor określił jako główny cel swojej rozprawy. Dysponując odpowiednim oprogramowaniem, w kolejnym kroku, dokonał analizy zaproponowanego przez siebie modelu pamięci magnetycznej, w którym istotną rolę podczas zapisu informacji pełniły zjawiska cieplne oraz efekty związane z przepływem prądu spolaryzowanego spinowo.

Rozprawa wydrukowana została w tradycyjnej formie książkowej o formacie A4 i liczy 86 stron ponumerowanych, z drukiem znajdującym się po jednej stronie każdej kartki, oraz dodatkowo 11 stron bez numerów, umieszczonych na początku rozprawy i zawierających: stronę tytułową, oświadczenie Autora, streszczenie w języku polskim i angielskim, podziękowania, dedykację i spis treści. Skoro już zahaczyłem o tę statystykę, to muszę już w tym miejscu, na samym wstępie, skrytykować zdumiewający fakt, że na sumaryczną liczbę stron/kartek równą 97, aż 7 kartek (a więc 7.2%, czyli prawie 10%!) jest albo całkowicie pustych (są to kartki umieszczone: po stronie tytułowej, po oświadczeniu Autora i po streszczeniu w języku angielskim), albo zawiera tylko i wyłącznie sam numer strony (są to kartki o numerach 4, 10, 74 i 82). Jest to dosyć nietypowe rozwiązanie, wręcz całkowicie

nowatorskie, którego cel jest nie do końca jasny i które – co gorsza – jest sprzeczne z powszechnie uznawaną za słuszną zasadą oszczędnego gospodarowania zasobami.

Zasadnicza część rozprawy została podzielona przez Autora na siedem rozdziałów. Rozprawę kończy lista tabel, lista rysunków, krótka informacja dotycząca życiorysu i dorobku naukowego Autora, oraz bibliografia licząca 62 pozycje.

Zawartość poszczególnych rozdziałów zasadniczej części rozprawy i moje ewentualne uwagi krytyczne do każdego z rozdziałów przedstawiają się następująco:

W pierwszym rozdziale Autor dokonał ogólnego wprowadzenia w tematykę i po zarysowaniu dziejowej konieczności poszukiwania nowych metod przetwarzania informacji, w związku z wyczerpywaniem się możliwości rozwojowych oferowanych przez technologię półprzewodnikową, sformułował główne cele rozprawy i naszkicował drogę zmierzającą do stworzenia numerycznego narzędzia odpowiedniego do badania układów spintronicznych, oraz zasygnalizował sposoby wykorzystania tego narzędzia. Sformułował też tezę, którą warto w tym miejscu zacytować:

„w mikromagnetycznych modelach urządzeń nanomagnetycznych, zmienny w czasie i przestrzeni rozkład temperatury i namagnesowania, zadany poprzez użycie odpowiednich równań dla nieustalonych stanów temperaturowych i namagnesowania, w tym poprzez równania Landaua - Lifszycy - Blocha (LLB), umożliwia określenie optymalnych warunków dla pracy urządzeń pamięciowych o jak najkrótszym czasie przetwarzania informacji oraz o jak największej gęstości zapisu.”

W mojej opinii treści zawarte w pierwszym rozdziale przekonująco uzasadniają sens wysiłków podjętych przez Autora. Cele rozprawy zostały sformułowane jasno, a zacytowana powyżej teza, obejmująca – ujmując rzecz skrótowo – dane wejściowe, sposób procedowania tych danych i pożądane dane wyjściowe, została nie tylko udowodniona przez Autora na konkretnym przykładzie w dalszej części rozprawy, ale posiada też walor ogólnego drogowskazu wytyczającego kierunki ewentualnych dalszych badań.

W rozdziale drugim Autor przedstawił zastosowaną w swoim oprogramowaniu metodę elementów skończonych do wyznaczania zmiennego w czasie i przestrzeni rozkładu temperatur, związanego z przepływami ciepła w modelowanym układzie. Rozdział ten zawiera w sumie 29 mniej lub bardziej skomplikowanych równań różniczkowych, całkowych, algebraicznych i macierzowych, wypisanych w formie ścisłej lub odpowiednio uproszczonej

w celu przyspieszenia obliczeń numerycznych. Zestaw tych wzorów wraz z opisami świadczy – moim zdaniem – o solidnym opanowaniu przez Autora teoretycznych podstaw zjawiska przepływu ciepła w materii, a także o biegłości informatycznej, polegającej na znajomości i umiejętności zastosowania wyrafinowanych sztuczek matematycznych w celu optymalizacji działania oprogramowania.

W rozdziale trzecim Autor omówił wielkości fizyczne niezbędne do określenia stanu magnetycznego substancji ferromagnetycznej, takie jak: magnetyzacja, oddziaływanie wymiany, anizotropia magnetyczna, pole materiałowe, oddziaływanie dipolowe, pole Langevina czy oddziaływanie Zeemana, oraz przedstawił równanie opisujące dynamikę namagnesowania w temperaturach większych od zera bezwzględnego, czyli równanie Landaua-Lifshitz-Blocha, wzbogacone o wyraz Słonczewskiego. Rozdział trzeci zawiera łącznie 97 równań, które zostały wypisane – podobnie jak w rozdziale drugim – albo w formie ścisłej albo uproszczonej, ze względu na konieczność dokonania dyskretyzacji. W moim odczuciu cały ten rozdział prezentuje się imponująco i nie pozostaje mi nic innego jak tylko wyrazić głęboki podziw dla pracowitości Autora, który z taką starannością i konsekwencją te wszystkie niezbędne elementy opisu magnetyzacji opanował i zaprezentował. Mam tylko jedną uwagę krytyczną dotyczącą wzoru (30), który opisuje zależności magnetyzacji równowagowej m.in. od temperatury. Otóż Autor nie wyjaśnił, że temperatura ukryta jest w tym wzorze w argumentcie x funkcji Brillouina $B_J(x) = B_J(gJ\mu_B B/(kT))$ i ostatecznie nigdzie nie wypisał jawnej postaci tegoż argumentu. A szkoda, bo to jest bardzo znaczący argument. A żeby jeszcze bardziej zmylić czytelnika, Autor użył w dalszej części tego rozdziału (a także w rozdziale poprzednim) dokładnie takiego samego symbolu x do oznaczenia zwykłej współrzędnej przestrzennej w układzie kartezjańskim.

W rozdziale czwartym Autor opisał cechy opracowanego przez siebie oprogramowania do modelowania mikromagnetycznego, podkreślając zwłaszcza cenną możliwość prowadzenia obliczeń równoległych na wielu węzłach obliczeniowych oraz możliwość wykorzystania licznych dostępnych bibliotek przyspieszających obliczenia. Wyszczególnił także listę najważniejszych etapów rozbudowy bazowego oprogramowania MAGPAR, złożoną z 37 pozycji. Większość pozycji na tej liście zaczyna się od frazy „zaimplementowano równoległy i rozproszony algorytm ...”. Łatwo jest się domyślić, że każda taka fraza stanowi tylko nikły ślad ogromnego wysiłku włożonego w przetłumaczenie skomplikowanych równań z dwóch poprzednich rozdziałów na język zrozumiały dla

komputera. Ponieważ przygotowanie oprogramowania o pewnych szczególnych cechach zostało określone przez Autora jako główny cel rozprawy, to ja – jako recenzent – powinienem w zasadzie przeanalizować cały kod programu aby stwierdzić, czy nie zawiera on jakichś błędów. Jako że nie jestem specjalistą w pisaniu programów, to takie zadanie byłoby – z mego punktu widzenia – koszmarnie trudne i niewykonalne w rozsądnie krótkim czasie. Dlatego postanowiłem obdarzyć Autora kredytem zaufania i założyć, że owo „zaimplementowanie” zostało przez niego zrobione wystarczająco solidnie i samo oprogramowanie ocenić z perspektywy uzyskanych przez Autora wyników modelowana.

W rozdziale piątym Autor przedyskutował w bardzo ogólny sposób wybrane problemy z zakresu spintroniki. Omówił między innymi koncepcję układów pamięciowych opartych na wysepkach magnetycznych jedno- i wielo-bitowych, a także koncepcję nowego typu układu przetwarzającego – procesora hybrydowego. Przykłady modelowania tego typu układów zamieścił w następnym rozdziale. Zasygnalizował także ciekawą ideę budowy komputera neuromorficznego, pracującego w oparciu o elementy posiadające zdolność jednoczesnego przetwarzania i gromadzenia informacji. W pełni zgadzam się z Autorem, że zagadnienia przedstawione w rozdziale piątym są rzeczywiście fascynujące i warte pokazania, natomiast umieszczenie ich w tym miejscu zaburza – moim zdaniem – logiczną strukturę całej rozprawy. Rozdział piąty ma bowiem charakter jakby jeszcze jednego wstępu, wciśniętego pomiędzy dwa logicznie powiązane ze sobą rozdziały, z których jeden (rozdział czwarty) dotyczy przygotowania oprogramowania, a drugi (rozdział szósty) prezentuje efekty pracy tego oprogramowania. Rozprawa z pewnością byłaby zgrabniejsza, gdyby treści zawarte w rozdziale piątym znalazły się w całości w rozdziale pierwszym.

W rozdziale szóstym Autor przedstawił wyniki modelowania wykonane z wykorzystaniem oprogramowania MAGPAR zarówno w wersji samodzielnie przez siebie przystosowanej do modelowania w wysokich temperaturach, jak też w wersji oryginalnej. Na początek, w podrozdziale 6.1, zademonstrował rezultaty testu prawidłowości działania swego oprogramowania. Test polegał na próbie odtworzenia wyników uzyskanych w publikacjach oznaczonych w bibliografii numerami [28] oraz [32] ([28] N. Kazantseva, D. Hinzke, U. Nowak, R. W. Chantrell, U. Atxitia, O. Chubykalo-Fesenko, *Towards multiscale modeling of magnetic materials: Simulations of FePt*, *PHYSICAL REVIEW B* 77, 184428, 2008; [32] Terry W. McDaniel, *Application of Landau-Lifshitz-Bloch dynamics to grain switching in heat-assisted magnetic recording*, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 112, 013914, 2012). Wydaje się, że sam test wypadł całkiem dobrze. Natomiast duże zastrzeżenia

budzi – moim zdaniem – sposób opracowania tej części rozprawy przez Autora. Otóż Autor ograniczył się w podrozdziale 6.1 jedynie do wypisania wartości parametrów stosowanych w obliczeniach i zamieszczenia 6 rysunków (o numerach od 6.1.1 do 6.1.6.) opatrzonych lakonicznymi podpisami w stylu, że są to przebiegi namagnesowania, które należy porównać sobie z takimi to a takimi wykresami w publikacjach [28] lub [32]. I to wszystko. Nie tylko nie opisał modelowanej sytuacji fizycznej, ale nawet nie dokonał w tym podrozdziale oceny zgodności uzyskanych przez siebie wyników z wynikami z prac [28] i [32]. Dopiero po przejrzaniu pracy [28] staje się jasne, że rysunki 6.1.1 i 6.1.2 przedstawiają relaksację wybranych składowych namagnesowania, a rysunek 6.1.3. pokazuje zmianę składowej z namagnesowania (dolna część rysunku) pod wpływem dwóch różnych impulsów termicznych (pokazanych w górnej części rysunku), z których jeden jest większy od temperatury Curie, a drugi mniejszy. Jeszcze bardziej zawile rysunki 6.1.4, 6.1.5. i 6.1.6. stają się zrozumiałe dopiero po zapoznaniu się z informacjami zawartymi w pracy [32], z których wynika, że stosowano w tym przypadku impuls termiczny (o różnym czasie trwania) i zewnętrzne pole magnetyczne (zmieniające się w czasie albo stałe). Dodanie krótkich opisów sytuacyjnych i – co więcej – wkopiowanie wzorcowych rysunków, z pewnością byłoby tu bardzo na miejscu. A wracając do oceny zgodności – to owszem, została przez Autora dokonana, ale pojawiła się dopiero w ostatnim (siódmym) rozdziale na stronie 71, w 11 linijce od góry, w postaci takiego zdania: „Symulacje, które przeprowadzono dla podobnych warunków jak w cytowanych pracach naukowych charakteryzowały się wysoką zgodnością z danymi wzorcowymi”. Można przypuszczać, że ową zgodność Autor zawyrokował tylko na podstawie wzrokowego podobieństwa obrazków, bez żadnych dodatkowych analiz ilościowych. I na koniec chcę tu zasygnalizować jeszcze jeden wyraźnie odczuwalny brak. Otóż jeżeli Autor traktuje dane z publikacji [28] i [32] jako wzorcowe, to – moim zdaniem – powinien przedyskutować metody zastosowane do ich uzyskania oraz wskazać ewentualne podobieństwa i różnice w stosunku do swego podejścia. A niestety tego nie zrobił.

W podrozdziale 6.2 Autor zaprezentował wyniki numerycznych badań modelu oryginalnej jednobitowej komórki pamięci magnetycznej własnego pomysłu. Komórce nadał formę cylindra o promieniu 3.1 nm i całkowitej wysokości 30 nm, złożonego z trzech podcylindrów / pastylek FePt, rozdzielonych dwiema pastylkami Ag o wysokości 4nm. Wysokość środkowej pastylki FePt, stanowiącej obszar aktywny komórki pamięci, ustawił na 10 nm, a wysokości skrajnych pastylek, pełniących rolę polaryzatorów spinowych, na 6 nm. Cały cylinder otoczył ściankami z MgO o grubości ok. 3 nm, zapewniającymi kontakt cieplny z otoczeniem odbierającym ciepło (utworzonym ze srebra lub miedzi), ale jednocześnie

izolującymi cylinder pod względem elektrycznym. Działanie komórki polega na zmianie stanu magnetycznego obszaru aktywnego pod wpływem prądu elektrycznego, przepływającego wzdłuż osi cylindra. Ponieważ FePt charakteryzuje się silną magnetyczną anizotropią jednoosiową, to namagnesowanie w obszarze czynnym i w polaryzatorach jest skierowane wzdłuż osi cylindra i ma zwrot w jedną albo w przeciwną stronę. Elektrony przepływające przez pierwszy napotkany polaryzator ustawiają swoje spiny zgodnie z namagnesowaniem w tym polaryzatorze i następnie oddziałują na stan magnetyczny obszaru aktywnego. Komórka pamięci działa poprawnie wtedy, gdy oba polaryzatory są namagnesowane przeciwnie i gdy impuls prądowy, płynący wzdłuż osi cylindra raz w jedną, a raz w drugą stronę, jest w stanie przemagnesowywać obszar czynny, ale jednocześnie pozostawić bez zmian stan namagnesowania samych polaryzatorów. Istotną rolę w całym procesie zapisu odgrywa zmiana temperatury spowodowana wydzielaniem ciepła podczas przepływu prądu oraz związane z tym zmiany parametrów magnetycznych. Ja widząc, Autor modelował ściśle określoną nanostrukturę, złożoną z konkretnych materiałów, o dobrze określonych parametrach materiałowych. W trakcie obliczeń znalazł najpierw parametry impulsu prądowego formatującego komórkę, czyli ustawiającego namagnesowanie anty-równoległe w obu polaryzatorach. Następnie znalazł (w temperaturze pokojowej) optymalne parametry impulsu prądowego, który przemagnesowywał obszar czynny, ale nie zmieniał stanu polaryzatorów (był to impuls o czasie trwania 170 ps i amplitudzie $54 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$). A na koniec określił, stosując impuls prądowy o takich parametrach, temperaturowy zakres poprawnego działania całej komórki, uzyskując przedział 275÷405 K w przypadku srebrnego otoczenia odbierającego ciepło od komórki oraz 265÷405 K w przypadku otoczenia miedzanego. Muszę przyznać, że podrozdział 6.2 zrobił na mnie ogromne wrażenie. Uważam, że jest to kluczowy dla całej rozprawy fragment, w którym Autor w sposób spektakularny udowodnił możliwość zapisu informacji za pomocą tylko i wyłącznie odpowiednio dobranych impulsów prądowych w zaproponowanym przez siebie modelu komórki pamięci magnetycznej. Poprzez dużą liczbę efektownych wykresów prezentujących czasową ewolucję magnetyzacji w trzech magnetycznych obszarach komórki pamięci, zilustrował złożoność dynamiki procesów wywołanych impulsem prądowym i prowadzących do pożądaných magnetycznych stanów końcowych. Jednocześnie potwierdził, iż udało mu się opracować skuteczne narzędzie do modelowania tych wyrafinowanych efektów.

Patrząc na zaproponowany przez Autora model z perspektywy osiągniętego sukcesu końcowego, nurtuje mnie jedno pytanie: jaka była geneza wyboru takich a nie innych parametrów geometrycznych poszczególnych części składowych zaprezentowanej w

rozprawie komórki pamięci i czy ewentualny inny zestaw tych rozmiarów mógłby skutkować zwiększeniem efektywności działania całego urządzenia?

Podrozdział 6.2 został zredagowany – moim zdaniem – bardzo starannie i nie znalazłem tutaj żadnych większych niedociągnięć, które nadawałyby się do skrytykowania, poza może dwoma drobnostkami dotyczącymi map prawdopodobieństwa pokazanych na rysunkach 6.2.5 i 6.2.6. Otóż – po pierwsze – wybrana przez Autora skala barw na tych mapach (od czarnego do granatowego) wydaje się trochę za mało kontrastowa, a – po drugie – każde trzy diagramy z każdego z obu rysunków dałoby się chyba z powodzeniem przedstawić na pojedynczym fazowym diagramie zbiorczym.

W podrozdziale 6.3 Autor pokazał dodatkowe wyniki obliczeń modelu jednobitowej komórki magnetycznej, wykonane za pomocą dwóch wersji opracowanego przez siebie oprogramowania: (1) z pełną dyskretyzacją oraz (2) z dyskretyzacją uproszczoną. W oparciu o wykresy czasowych ewolucji różnych wielkości fizycznych (nie tylko namagnesowania, ale także temperatury i różnych rodzajów energii), Autor stwierdził, że obydwie wersje oprogramowania dają bardzo podobne wyniki, i że w związku z tym w praktyce lepiej jest używać wersji z uproszczoną dyskretyzacją, gdyż wtedy czas komputerowych obliczeń jest znacząco krótszy. Szczególną uwagę zwróciłem tu na wykresy zmian temperatury, pokazane na rysunku 6.3.8. Można z nich odczytać, że podczas impulsu prądowego (o czasie trwania 170 ps i o maksymalnej gęstości prądu $54 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$) temperatura elementu aktywnego komórki pamięci wzrasta chwilowo od 300 K do 500 K (czyli o 200 K), temperatura polaryzatorów – od 300 K do ok. 460 K (czyli o 160 K), a temperatura całej objętości próbki wraz z otoczeniem – od 300 K do 306 K (czyli o 6 K), przy czym ta ostatnia podwyższona temperatura utrzymuje się przez stosunkowo długi czas po zakończeniu impulsu. Maksymalna gęstość prądu równa $54 \times 10^{12} \text{ A/m}^2$ jest wielkością może trochę abstrakcyjną, ale – jak sobie przeliczyłem – oznacza prąd o maksymalnym natężeniu ok 1.6 mA (taką wartość uzyskałem po przemnożeniu tejże gęstości prądu przez pole przekroju poprzecznego komórki pamięci, czyli pole koła o promieniu 3.1 nm). W związku z tym nasuwa się naturalne pytanie: na ile realistyczna jest ewentualna praktyczna realizacja zamodelowanej przez Autora pamięci? Mam tu na myśli z jednej strony problem odporności materiału na udary termiczne, a z drugiej strony – konkurencyjność zaproponowanego rozwiązania ze względu na zużycie energii niezbędnej do zapisania pojedynczego bitu w stosunku do rozwiązań obecnie powszechnie stosowanych. Brak dyskusji tego problemu jest tu wyraźnie zauważalny, zwłaszcza w kontekście dwóch następnych podrozdziałów, w których tego typu rozważania zostały przeprowadzone.

W podrozdziale 6.3 zauważalne są drobne usterki redakcyjne. W podpisach wszystkich rysunków, od 6.3.1 do 6.3.13, powtarza się błędne odesłanie do „modelu z rozdz. 6.3”, gdyż zamiast tego powinno być oczywiście odesłanie do „modelu z rozdz. 6.2”. Na stronie 55, w 6 linijce od góry, jest błędny, bo dyskryminujący Rys.6.3.2, odsyłacz do rysunków: „... w zakresie ewolucji namagnesowania (Rys. 6.3.3 – 6.3.4), ...”, powinno tu być: „(Rys. 6.3.2 – 6.3.4)”. Na stronie 55, w 7 linijce od góry, przy odsyłaczu do Rys. 6.3.7, jest mowa o „funkcji czi”, podczas gdy w podpisie rysunku 6.3.7 na stronie 58 występuje już fraza „funkcji chi”.

W podrozdziale 6.4 Autor przedyskutował problem przełączania stanu magnetycznego wielo-stanowej kulistej komórki magnetycznej wykonanej z żelaza, cytując swoje publikacje, oznaczone w bibliografii numerami [49] i [56] ([49] P.Steblinski, T.Blachowicz, A.Ehrmann, *Analysis of the energy distribution of iron nano-spheres for bit-patterned media*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 562, 2022; [56] P.Steblinski, T.Blachowicz, *Wielostanowa komórka pamięci magnetycznej - analiza czasowa szybkości zapisu oraz gęstości upakowania komórek*, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej nr 11*). W tym modelowaniu przełączanie dokonywało się za pomocą magnetycznej głowicy mechanicznej, prowadzonej po odpowiedniej trajektorii. Jak Autor sam przyznał, realizacja tego pomysłu może być trudna w realizacji, bowiem aby przełączenie następowało w czasie 1 ps, to maksymalna wartość pola powinna osiągać 16 T. Ponieważ Autor nie umieścił w rozprawie informacji o wielkości badanej kulki żelaza, to dopiero znaleziona w publikacji [56] wartość promienia kulki, wynosząca 2 nm, pozwala zrozumieć, na czym polega wspomniana powyżej trudność. Bo rzeczywiście mechaniczna głowica manewrująca z ogromną precyzją nad takim nano-obiektem wydaje się być czymś wręcz niemożliwym do zrealizowania w rzeczywistości przy obecnych możliwościach technicznych. Pisząc o owych 16 teslach, Autor jednocześnie odwołał się do rysunku 6.4.3, którego legenda wskazuje na maksymalną wartość pola równą 16 MA/m. Dostrzegam tu brak ścisłości naukowej, gdyż pole $H=16 \text{ MA/m}$ wyrażone w teslach wynosi $\mu_0 H \approx 20 \text{ T}$ (gdzie przenikalność magnetyczną próżni $\mu_0 \approx 1.26 \times 10^{-6} \text{ Tm/A}$).

W podrozdziale 6.5 Autor omówił, na bazie publikacji oznaczonej w bibliografii numerem [48] ([48] P.Steblinski, T.Blachowicz, *Conception of magnetic memory switched by time dependant current density and current electron spin polarization*, *IJET*, 65(2) 2019), przełączanie stanu magnetycznego wielo-stanowej kulistej komórki magnetycznej wykonanej z żelaza, ale tym razem czynnikiem przełączającym był prąd spolaryzowany spinowo. Po przeprowadzeniu modelowania stwierdził, że do wymuszenia przejścia pomiędzy każdą parą stanów magnetycznych nanokulki żelaza niezbędna jest specyficzna amplituda impulsu prądowego i specyficzna ewolucja współrzędnych sferycznych określających kierunek polaryzacji

spinowej. Tym razem Autor również przyznał, iż praktyczna realizacja takiego typu pamięci magnetycznej byłaby bardzo kłopotliwa ze względu na konieczność skonstruowania polaryzatora spinowego ulokowanego w pobliżu nanokulek.

W podrozdziale 6.6 Autor zaprezentował model hybrydowego procesora z czteroczęściowym rdzeniem spintronicznym, powołując się na publikację [57] ([57] P.Stebliński, T.Błachowicz, *Koncepcja hybrydowego procesora cyfrowego z rdzeniem spintronicznym*, *Wiadomości Elektrotechniczne* nr 11, 2011). Niestety zrobił to w sposób bardzo ogólnikowy i – moim zdaniem – zupełnie niewystarczający do pełnego wyjaśnienia zasady działania urządzenia. W szczególności pozostawił bez odpowiedzi szereg narzucających się pytań, takich jak np.: (1) jaki jest powód wyboru specyficznego kształtu nano-elementów rdzenia magnetycznego (czworokąt, pięciokąt, sześciokąt i siedmiokąt) i co zadecydowało o ich specyficznym rozlokowaniu w przestrzeni? (bez dodatkowych wyjaśnień osoba niezorientowana w temacie zobaczy w tym zapewne jakąś magię); (2) co oznacza termin „*MOKE M-tego rzędu*” widoczny na rysunku 6.6.3?; (3) o jaką minimalizację chodzi w wyrażeniu „*Funkcja logiczna po minimalizacji*” widocznym w Tabeli 5?

W rozdziale 7 Autor zawarł podsumowanie całej rozprawy i wnioski końcowe. Stwierdził, że zakładane cele pracy zostały przez niego osiągnięte. Jednocześnie zadeklarował, że jest entuzjastą spintroniki.

Przegląd zawartości rozprawy pragnę zakończyć z jednej strony drobną uwagą krytyczną dotyczącą bibliografii, bowiem w pozycjach o numerach: [46], [47], [48], [54] i [56] nie został podany rok wydania, a z drugiej strony – ogólną pochwałą staranności przygotowania rozprawy pod względem formalnym, gdyż sporadycznie zdarzające się błędy literowe, czy też jakieś niesforne przecinki, nie utrudniają zbyt mocno czytania tekstu, który jest napisany językiem jasnym i zrozumiałym.

Podsumowując przegląd rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Steblińskiego, pragnę wyrazić jednoznacznie pozytywną ocenę jej merytorycznej zawartości, pomimo wyartykułowanych powyżej uwag krytycznych. Tematyka podjęta przez Autora jest – moim zdaniem – bardzo ciekawa i aktualna, bowiem strukturyzowane niskowymiarowe układy magnetyczne stanowią obecnie jedno z wiodących zagadnień współczesnej fizyki magnetyzmu. Inspiracją podejmowanych badań są w tym przypadku nie tylko interesujące

właściwości takich układów, ale również ich ogromny potencjał aplikacyjny. I właśnie ten drugi aspekt uwypuklony jest w rozprawie szczególnie mocno, gdyż Autor skupił się na numerycznych testach różnych nowatorskich modeli pamięci magnetycznej. W mojej opinii Autor osiągnął wartościowe wyniki, spośród których za najbardziej cenne uważam zakończone sukcesem przemodelowanie jednobitowej komórki pamięci magnetycznej za pomocą samodzielnie przygotowanego oprogramowania, przy czym kluczowe w działaniu takiej komórki były występujące jednocześnie efekty spintroniczne i termiczne. Stwierdzam, że Autor z powodzeniem pokonał wszystkie etapy specyficznego procesu badawczego nakierowanej na aplikacje fizyki magnetyzmu, jakim jest modelowanie komputerowe, bowiem: (1) skonstruował model ideowy urządzenia, (2) przeanalizował teoretyczne podstawy zjawisk istotnych z punktu widzenia zaproponowanego modelu, (3) zebrał wszystkie konieczne wzory i przepracował je pod względem koniecznej dyskretyzacji, (4) przygotował i uruchomił odpowiednie oprogramowanie, przystosowane do obliczeń na nowoczesnych klastrach komputerowych, (5) wykonał obliczenia dla różnych zestawów parametrów, (6) ustalił optymalne zakresy istotnych parametrów zapewniających poprawne działanie modelowanego urządzenia, (7) skompletował wszystkie niezbędne informacje potrzebne do wykonania prototypu urządzenia. Autor w ten sposób potwierdził, że dysponuje odpowiednią ogólną wiedzą teoretyczną z fizyki magnetyzmu jak też i z matematyki, że potrafi zaprojektować nanostrukturę magnetyczną pod kątem spełniania przez nią założonych funkcjonalności, że dobrze radzi sobie z rozwiązywaniem skomplikowanych problemów informatycznych, i że potrafi skutecznie analizować i interpretować uzyskane wyniki. Jednym słowem – że osiągnął odpowiednią biegłość w samodzielnym prowadzeniu działalności naukowej. Bardzo interesujące są również trzy inne modele przedyskutowane w rozprawie, w tym dwa modele pamięci magnetycznej, bazujące na wielostanowych nano-kulkach ferromagnetycznych, oraz model procesora z rdzeniem spintronicznym. Modele te były badane przez Autora jeszcze przed opracowaniem własnego oprogramowania i stanowią przykłady poszukiwania przez Autora nowatorskich zastosowań elektroniki spinowej w układach zapamiętywania i przetwarzania informacji. O ile te trzy ostatnio wspomniane modele doczekały się już publikacji w takich czasopismach naukowych jak *International Journal of Electronics and Telecommunications* (70 pkt. MEiN), *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej*, czy też *Wiadomości Elektrotechniczne* (20 pkt. MEiN), to istnieje również – moim zdaniem – duża szansa na szybkie opublikowanie wyników związanych z modelowaniem jednobitowej komórki magnetycznej i to z pewnością w znacznie wyżej punktowanych czasopismach.

W tym miejscu chciałbym jeszcze dodać, że mgr inż. Paweł Stebliński może pochwalić się współautorstwem 6 prac z innej tematyki niż ta poruszana w rozprawie, opublikowanych w latach od 2010 do 2022 w takich prestiżowych czasopismach naukowych, jak Journal of Applied Physics (2 prace), Nanomaterials (1 praca) czy Journal of Magnetism and Magnetic Materials (3 prace). Wyniki swych badań prezentował także na kilkunastu konferencjach krajowych i zagranicznych. Wszystko to świadczy jednoznacznie o dużej aktywności i zaangażowaniu mgra inż. Pawła Steblińskiego na polu nauki.

Podsumowując całą recenzję rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Steblińskiego stwierdzam, że rozprawa ta spełnia – w mojej opinii – warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Pawła Steblińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Kisielewski