

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Krzysztofa Lebeckiego pt.
"Mikromagnetyczne modelowanie rozkładu namagnesowania w
kwazijednowymiarowych ferromagnetykach: analiza wpływu
periodycznych warunków brzegowych"**

Wiadomo, że istnienie uporządkowania magnetycznego uwarunkowane jest, w większości materiałów, obecnością oddziaływań wymiennych. Obok tych oddziaływań, uwzględnąć należy cały szereg innych, zazwyczaj słabszych oddziaływań, z których na szczególną uwagę zasługują oddziaływania dipolowe. Oddziaływania te odpowiadają za istnienie struktury domenowej a więc za kształt i właściwości magnetycznej pętli histerezy, co oznacza, że determinują one parametry użytkowe materiału magnetycznego. Są więc podstawą ważnego działu fizyki magnetyków, jakim jest fizyka domen magnetycznych.

Magnetyczne oddziaływania dipolowe (podobnie jak analogiczne oddziaływania elastyczne czy elektryczne) są oddziaływaniami długozasięgowymi, co oznacza konieczność sumowania wyrazów dipolowych po całym kryształ. Wynikają stąd istotne trudności przy analizie właściwości magnetycznych układów nieograniczonych, takich jak np. łańcuchy, druty, cienkie warstwy i inne układy niskowymiarowe. Z natury oddziaływań dipolowych wynika konieczność, w większości przypadków, stosowania przy ich analizie różnorodnych metod numerycznych. Znaczenie tych metod wzrasta wraz z rozwojem możliwości komputerów. Ciągłe poszukiwane są nowe i efektywne algorytmy służące do obliczania sum dipolowych. Recenzowana rozprawa doktorska mgr Krzysztofa Lebeckiego pt. "Mikromagnetyczne modelowanie rozkładu namagnesowania w kwazijednowymiarowych ferromagnetykach: analiza wpływu periodycznych warunków brzegowych" znajduje się w tym właśnie, bardzo aktualnym i ważnym, nurcie badań. Chociaż formalnie recenzowana rozprawa dotyczy problematyki mikromagnetyzmu, to jednak w istocie swojej dotyczy ona przede wszystkim tej jej części, która związana jest z zagadnieniem oddziaływań dipolowych w ośrodkach niskowymiarowych. Promotor recenzowanej rozprawy – prof.dr hab. Jacek Kossut postawił więc przed Doktorantem ambitne i trudne zadanie, gdyż wniesienie nowych elementów do dziedziny z tak bogatą, wiele lat gromadzoną, literaturą jest problemem niebanalnym. Uważam, że mgr Krzysztof Lebecki zrealizował postawione przed nim zadanie. Muszę tu jednak dodać, że rozprawy doktorskie wykorzystujące modelowanie komputerowe w większości przypadków nie dają recenzentowi możliwości sprawdzenia prezentowanych wyników. Tak jest również z omawianą rozprawą. Za oryginalnością i efektywnością zaproponowanej w rozprawie metody modelowania przemawia, oprócz przekonania recenzenta, fakt częściowego opublikowania wyników rozprawy w 3 pracach (jedna wydrukowana, jedna w druku i jedna w recenzji). Przemawia za tym również fakt, że opracowana metoda została włączona do publicznie dostępnego programu OOMMF, za zgodą twórców tego programu.

Najważniejszym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest opracowanie oryginalnej metody uwzględniania periodycznych warunków brzegowych (PBC) przy obliczaniu oddziaływań dipolowych w modelowaniu mikromagnetycznym z uwzględnieniem ich dalekiego zasięgu. Zaproponowana metoda oparta jest na zmianie sposobu obliczania tensora odmagnesowania. Problem warunków brzegowych przy modelowaniu mikromagnetycznym, gdy rozmiar obszaru modelowanego jest dużo mniejszy od rozmiaru próbki jest problemem kluczowym. Mgr Krzysztof Lebecki wybrał periodyczne warunki brzegowe, typu warunków Borna-Karmana i przekonująco uzasadnił swój wybór. Innym istotnym osiągnięciem rozprawy było przeprowadzenie pełnej analizy błędów numerycznych proponowanej metody, dzięki czemu możliwym było narzucenie akceptowalnego poziomu błędu.

Rozprawa składa się z dwu części. Część pierwsza dotyczy bezpośrednio opracowanej metody mikromagnetycznej, natomiast część druga zawiera przykłady zastosowania opracowanej metody do analizy konkretnych układów magnetycznych. Zdecydowanie wyżej cenię wyniki zawarte w części pierwszej. Zostały one przedstawione jasno, logicznie i poprawnie uzasadnione. Podstawowe zastrzeżenie, jakie mam do tej części rozprawy dotyczy niedocenia roli powierzchni i jej wpływu na właściwości magnetyków. Kandydat na str.35 cytuje Borna, który pisze, „jeżeli próbka jest wystarczająco duża”, to rozwiązania „praktycznie nie zależą od kształtu próbki lub konkretnych, narzuconych warunków brzegowych”. Kandydat wyciąga stąd następujący wniosek: „PBC służą zatem do opisu zjawisk zachodzących we wnętrzu, przy zaniedbaniu wpływu powierzchni na te zjawiska”. Jest to poważny wniosek, ograniczający w znacznym stopniu stosowalność proponowanej metody w badaniach pętli histerezy i procesów magnesowania, gdyż zaniedbanie wpływu powierzchni w materiale magnetycznym oznacza *de facto* zaniedbanie obecności struktury domenowej, a w przypadku układów niskowymiarowych- zaniedbanie samoistnych niejednorodności w rozkładzie namagnesowania. Opisać więc można w ramach metody omawianej w pracy doktorskiej jedynie procesy magnesowania jednorodnych próbek jednodomenowych. Kandydat w rozdziale „Warunki stosowania, konsekwencje” sprowadza rolę powierzchni tylko do generacji centrów nukleacji pocieszając się, że można je zastąpić centrami nukleacji istniejącymi wewnątrz próbki. Ale, po pierwsze-fizyka obu rodzajów centrów jest całkowicie różna, a po drugie- w określonych warunkach, w szczególności przy opisie pętli histerezy nazywanej przez mgr Krzysztofa Lebeckiego „gładką”, koniecznym jest uwzględnienie struktury domenowej odpowiedzialnej za małą wartość namagnesowania w pobliżu $H=0$ (przypadek małej remanencji). Jako uzupełnienie warto dodać, że ignorowanie brzegu w przypadku periodycznych warunków brzegowych oznacza *de facto* również ignorowanie istnienia μ^* -efektu oraz istnienia anizotropii powierzchniowej, odgrywających w nanomagnetyzmie istotną rolę.

Inne drobniejsze problemy dyskusyjne dotyczą:

- Na str.17 Autor rozprawy stwierdza, że dla kryształów kubicznych „istnieją trzy wyróżnione osie w kryształach”, co jest tzw. półprawdą. W kryształach tych osiami anizotropii mogą być w niektórych materiałach (np.fcc nikiel) cztery osie typu $\langle 111 \rangle$
- Na str. 18 Autor rozprawy pisze o domenach ferromagnetycznych „efekt ten nie został jednak przewidziany teoretycznie”. Nie jest to stwierdzenie słuszne. Istnienie domen przewidział P.Weiss w roku 1907

Druga część rozprawy zawiera przykłady zastosowania opracowanej metody do analizy konkretnych układów magnetycznych. Niektóre rozpatrywane przykłady mają w literaturze rozwiązania analityczne i Kandydatowi chodziło o sprawdzenie poprawności

opracowanej metody. Do tej grupy problemów należą: analiza nieskończonego drutu o przekroju kołowym z osią łatwą wzdłuż osi i z -zerową anizotropią magnetokrystaliczną; nieskończona rurka o przekroju kołowym bez anizotropii magnetokrystalicznej oraz nieskończona belka o przekroju prostokątnym. We wszystkich tych przypadkach struktura domenowa, ze względów oczywistych, nie istnieje. Porównanie wyników modelowania z rozwiązaniami analitycznymi wskazuje na ich zbieżność i potwierdza przydatność opracowanych algorytmów. Pewne rozbieżności pojawiły się dla cienkościennych rurek, co mgr Krzysztof Lebecki kwituje zdaniem o konieczności „dokładniejszej analizy zjawisk zachodzących w takich strukturach”.

Inna grupa problemów w drugiej części pracy dotyczy interpretacji konkretnych doświadczeń: pętli histerezy nanorurek kobaltowych oraz procesów magnesowania płaskich macierzy trójkątów z permaloju. Pewne zastrzeżenia można mieć do traktowania macierzy trójkątów jako układów jednowymiarowych, nie ulega jednak wątpliwości, że i w tym przypadku zaproponowana metoda potwierdziła swoją efektywność.

Jak wynika z powyższego, z konieczności bardzo pobieżnego, przeglądu osiągnięć naukowych zawartych w recenzowanej rozprawie, uzyskane wyniki wzbogacają naszą wiedzę o możliwościach uwzględnienia oddziaływań dipolowych w mikromagnetycznym modelowaniu niskowymiarowych nanostruktur magnetycznych. Na szczególne podkreślenie zasługuje biegłość mgr Krzysztofa Lebeckiego w posługiwaniu się zaawansowanymi metodami numerycznymi. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa mgr Krzysztofa Lebeckiego spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie go do publicznej obrony pracy.

H Szymek