

dr hab. Aneta Malinowska, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7
05-400 Otwock

**Recenzja rozprawy doktorskiej p. mgr Agnieszki Jardin
zatytułowanej:
*Badanie zachowań chaotycznych plazmy wytwarzanej przez silnik Halla***

Przedstawiona do recenzji praca pani mgr Agnieszki Jardin z Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy pt. *Badanie zachowań chaotycznych plazmy wytwarzanej przez silnik Halla*, wykonana pod kierunkiem dr hab. Piotra Lubińskiego z Uniwersytetu Zielonogórskiego, dotyczy badań strumienia plazmy wytwarzanej przez silnik Halla. W szczególności koncentruje się na badaniach dynamiki zmienności prądu wyładowania i na próbach poszukiwania w nich teorii chaosu, co ostatecznie wpływa na sprawność działania tego typu silnika. Celem badań, była analiza możliwości pracy silnika Halla w zakresie zmian parametru kontrolnego napięcia wyładowania w stosunku do parametrów, takich jak: anodowy wydatek masowy, napięcie keepera czy prądu w cewkach. Uzyskane pomiary prądu wyładowania oraz prądu jonowego, posłużyły do wnikliwej analizy szeregów czasowych, dzięki czemu uzyskano obszary/regiony, w których zauważalnie zmieniała się dynamika przebiegów czasowych wraz ze wzrostem napięcia wyładowania. Realizacja głównych celów dysertacji wymagała zbudowania układu diagnostycznego do rejestracji odpowiednich szeregów czasowych, a wszystko poparte zostało obliczeniami wykonanymi przy życiu odpowiednich kodów numerycznych. Wyniki wstępne jak i te omówione w niniejszej dysertacji, zaprezentowane zostały w artykułach naukowych, do których odpowiednie odnośniki znajdują się w wykazie publikacji.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, liczy 214 stron, składa się ze wstępu, czterech rozdziałów, podsumowania, trzech dodatków oraz bibliografii.

We **Wstępie**, autorka przedstawiła główne cele i zakres pracy doktorskiej, wykaz publikacji, podziękowania oraz nomenklaturę.

W **Rozdziale 1** po krótkim zarysie historycznym, zaprezentowano wprowadzenie do tematyki badań związanej między innymi z głównymi typami silników o napędzie elektrycznym oraz odpowiednim rodzajem paliwa. Scharakteryzowano ich podstawowe parametry oraz bardziej szczegółowo opisano fizyczne działanie silnika Halla. W tym samym rozdziale opisano, specjalnie zaprojektowane do badań, sondy elektryczne. Opisano zarówno zasady ich działania, jak również środowisko w jakich muszą znaleźć swoje zastosowanie.

Rozdział 2 w całości poświęcony jest metodom wykrywania chaosu. Jak w poprzednim rozdziale i ten rozpoczyna się od krótkiego zarysu historycznego. Następnie omówione zostały poszczególne wskaźniki chaosu, które mogą znaleźć zastosowanie w scharakteryzowaniu dynamiki badanego układu. Autorka zastosowała wiele porównań podstawowych zjawisk fizycznych z otaczającym nas środowiskiem w celu nie tylko łatwiejszego zrozumienia podstaw teorii, ale przede wszystkim dla zaprezentowania szerokiego wachlarza ich zastosowań. W podrozdziale 2.3 podsumowano wcześniej opisane zjawiska powstawania chaosu, aby w kolejnym kroku przejść do opisanie sposobów jej kontroli.

W **Rozdziale 3** opisano prototypy silników Halla, które były poddane testom w ramach rozprawy doktorskiej. Omawiane prototypy silnika zostały zaprojektowane w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. Opisano również sondy elektryczne, które posłużyły do zbierania przebiegów prądowych w celu wyznaczenia całkowitego prądu jonowego. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż wszystkie trzy sondy zostały zaprojektowane do konkretnych zastosowań. Precyzyjnie zamontowano układy pomiarowe tak, aby zachować, istotną w tym przypadku, geometrię całego eksperymentu. Zadbano nie tylko o zminimalizowanie zakłóceń rejestrowanych sygnałów, poprzez zastosowanie osłon z materiałów o niskim współczynniku rozpylania, ale również stabilizowano temperaturę cewek magnetycznych po każdym wykonanym pomiarze. W podrozdziale 3.3 opisano procedury pomiarowe, a uzyskane wyniki pomiarów prądu jonowego dla obu prototypów silników Halla zaprezentowano w podrozdziale 3.4.

Rozdział 4 poświęcono na poszukiwaniu zachowania chaotycznego w niestabilnościach plazmy, które ostatecznie powodują oscylacje prądu wyładowania w szerokim zakresie częstotliwości. Dokonano analizy zebranych szeregów czasowych po ich wcześniejszej selekcji ze względu na dużą ilość zebranych danych. Dane przeanalizowano dla jednego typu silnika Halla, a mianowicie dla prototypu KLIMT, ponieważ jak wykazała sama doktorantka, w przypadku HIKHET ze względu na rozszczelnienie dystrybutora gazu, niemożliwym stało się przeprowadzenie rzetelnych badań. Kolejno przeanalizowano uzyskane dane, począwszy od analiz diagramów bifurkacyjnych, wykresów przestrzeni fazowej, rekurencyjnych czy przez symetryzowany wzór kropkowy. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż doktorantka dokonała redukcji szumu rejestrowanych sygnałów, a wyniki tej analizy zaprezentowała w Dodatku B. Aby nie utracić dynamiki przebiegu, zastosowany w tym przypadku Algorytm Sauera został zaprojektowany tak, aby zmniejszyć ilość szumu z dyskretnie próbkowanego sygnału wejściowego, jaki stanowiły zebrane przebiegi prądowe.

Pracę kończy **Podsumowanie**, gdzie zaprezentowano konkluzje dokonanych analiz oraz **Dodatki** prezentujące kolejno: *Tabelę zbiorczą dokonanych pomiarów*, *Metodę redukcji szumów*, *Wyznaczenie wykładnika Lapunowa dla układów referencyjnych*. Bibliografia jest bardzo obszerna i liczy 257 pozycji literaturowych.

Głównym celem niniejszej dysertacji jest zbadanie charakteru zmienności mierzonego prądu jonowego pod kątem teorii chaosu, a w szczególności chaosu deterministycznego. Chodzi tu o przedstawienie częstotliwości występujących amplitud sygnału prądu wyładowania za pomocą diagramów chaosu. Ostatecznie ustalono charakterystyczne obszary pracy silnika, w których wykazywał znaczne zmiany w funkcji rosnącego napięcia wyładowania. Doktorantka szczegółowo zaprezentowała 5 takich regionów. Analizę wykonano z dużą precyzją i mimo na pierwszy rzut oka problemu z zastosowaniem ich do konkretnych przypadków, udało się doktorantce, jak sama pisze w omawianej dysertacji "...wyjść z tego impasu...". Należy tutaj podkreślić, iż próby dopasowania zachowań chaotycznych w zarejestrowanych przebiegach prądowych były możliwe dzięki zastosowaniu różnych dopełniających się metod, na podstawie których wysunięto wnioski o potwierdzeniu występowania niskowymiarowego chaosu deterministycznego. Zebrane wyniki stanowią podstawę do opracowania modeli teoretycznych dotyczących opisu oscylacji plazmy, aby móc je zastosować nie tylko do kolejnych wersji prototypów silników Halla, ale również do innych urządzeń, gdzie wytwarzana jest plazma. Szczególnie w układach z magnetycznym

utrzymaniem plazmy (tokamak, stellarator), gdzie obserwowane jest powszechnie zjawisko turbulencji plazmy brzegowej (zjawisko intermitencji). Wskazuje to na bardzo duży poziom wiedzy doktorantki na temat zrozumienia zachowań plazmy. Istotny wkład w zrozumienie i potwierdzenie zastosowanych przypadków wyznaczania diagramów chaosu odgrywają kody numeryczne, których użyto w omawianej pracy. Cała zawarta w przedłożonej dysertacji analiza wydajności silnika, została wykonana przez doktorantkę samodzielnie. Wyjątek stanowił zastosowany program ANSYS, który został użyty do zobrazowania rozkładu linii sił pola magnetycznego. Ponadto, przygotowując oprogramowanie służące do poszukiwań zachowań chaotycznych, przetestowano je dla kilku znanych układów, w tym między innymi dla szumu, sygnału periodycznego, sygnału quasi-periodycznego, układu Lorenza i wzbudzanego układu Lotki-Volterra. Do tworzenia kodów numerycznych oraz skryptów służących ilustrowaniu wyników wykorzystano programy Matlab oraz R-projekt. Zatem wszystkie znajdujące się w omawianej rozprawie doktorskiej wykresy i diagramy, dotyczące nie tylko danych pomiarowych, ale również wymienionych wyżej układów referencyjnych, są samodzielnym wkładem doktorantki. W mojej ocenie na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie kodu numerycznego do zmniejszenia szumu sygnału w celu poprawnej interpretacji zarejestrowanego sygnału przy użyciu programu Matlab. Warto podkreślić, że zastosowane przez doktorantkę w pomiarach sondy zostały wykonane przez nią osobiście. Podjęła ona próbę modyfikacji tzw. kubków Faraday'a, w celu ograniczenia dodatkowego prądu wnoszonego przez elektrony wtórne emitowane z powierzchni w wyniku bombardowania jonami. Wszystko to w celu eksperymentalnego zbadania dynamiki strumienia jonów generowanych przez silnik Halla. W literaturze bardzo ciężko jest znaleźć badania doświadczalne poświęcone badaniom chaosu, zwykle opierają się one na różnych modelach. Tym bardziej, opisane w pracy wyniki mają znaczenie w tego typu zagadnieniach. Ponadto, co również zasługuje na uwagę, doktorantka w pracy bardzo szczegółowo opisuje przeprowadzone badania i procedury pomiarowe. Czytając pracę ma się wrażenie uczestniczenia w badaniach.

Oczywiście w niniejszej rozprawie nie uniknięto błędów interpunkcyjnych oraz drobnych literówek, pominięcia wyrazów czy użycia nieodpowiednich zwrotów, jak np. w Rozdz.4 tabela 4.2 str.137 „informacja informacji” zamiast „informacja wzajemna”. W Rozdziale 2 opisującym teorię chaosu w wielu miejscach można natknąć się na dość ciekawe określenia, takie jak: „niezależnie od maszyny”; „wyrzucane jony”, „badane medium”, te wszystkie sformułowania są wynikiem szukania odpowiedników w języku polskim. W podrozdziale 2.2.3 prezentującym teorię przestrzeni fazowej i rekonstrukcji atraktora zgodnie z sugestią autora z publikacji [202] Heinza Schustera, za kryterium wyznaczania opóźnienia czasowego przyjęto warunek: $C(\tau) \approx \frac{1}{2} C(0)$, choć przeanalizowano również inne wartości parametru, sugerowane przez innych autorów, to jednak ten z pozycji (2.11) posłużył do dalszej analizy. Jest to dość istotny parametr, ponieważ kształt funkcji autokorelacji pozwala rozróżnić proces chaotyczny od innych typów zachowań. Autorka nie wyjaśniła jednak, dlaczego wybrała akurat tę wartość parametru.

Większość przedstawionych przeze mnie uwag krytycznych (literówki, sformułowania, interpunkcja) można uznać za wykazanie, iż faktycznie zrecenzowano niniejszą rozprawę doktorską. Praca jest długa (ponad 200 stron), ale zawiera wszystkie niezbędne informacje do zrozumienia nie zawsze prostych zagadnień, przedstawionych w niemal pedagogiczny sposób, co bardzo pomogło podczas recenzji, ale również może być przydatne dla studentów. Recenzent

zatem stwierdza, że przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają w najmniejszym stopniu wysokiej wartości merytorycznej prezentowanej rozprawy, która zdecydowanie spełnia wszelkie, zwyczajowe i ustawowe, wymagania, stawiane pracom doktorskim i wnosi o **dopuszczenie** pani mgr. Agnieszki Jardin do **dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim**.

Ameta Malinowska