

Dr hab. Marek Scholz, Prof. IFJ PAN  
Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
[marek.scholz@ifj.edu.pl](mailto:marek.scholz@ifj.edu.pl)

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Agnieszki Jardin, pt.:  
"Badanie zachowań chaotycznych plazmy wytwarzanej przez silnik Halla"

## Wstęp

Rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem dr hab. Piotra Lubińskiego prof. Uniwersytetu Zielonogórskiego.

Dotyczy ona badania strumienia plazmy generowanego w silniku Halla na podstawie pomiarów dynamiki prądu jonowego oraz prądu wyładowania i obejmuje analizę zmierzonych przebiegów czasowych prądów jonowego i wyładowania za pomocą narzędzi charakterystycznych dla poszukiwania zjawisk związanych z chaosem.

Praca składa się ze wstępu, 5 rozdziałów, 3 dodatków, spisu literatury, oznaczeń i skrótów. Ponadto, zawiera podziękowania, przesłanie od autorki oraz wykaz jej publikacji. Praca liczy sumarycznie 214 stron.

Rozdział 1 obejmuje zarys tematyki związanej z napędami elektrycznymi (electric propulsion) wykorzystywanymi w technice kosmicznej do wyrzucania cząstek z dużą prędkością. Przedstawiono w tym rozdziale podstawowe parametry charakteryzujące takie napędy z punktu widzenia misji kosmicznych. Przykładem takiego napędu analizowanego dalej szczegółowo w pracy doktorskiej był silnik Halla, w przypadku którego opisano zachodzące w nim podstawowe zjawiska fizyczne. W tym rozdziale zamieszczono również opis sond elektrycznych służących do badania charakterystyk tego silnika. Rozdział ma charakter przeglądu literatury i wprowadza czytelnika w tematykę pracy.

Podobny charakter ma rozdział 2, w którym zaprezentowano przykłady układów dynamicznych, które przejawiają zachowania chaotyczne. Ważny w tej pracy jest podrozdział zawierający opis wskaźników chaosu, które można stosować w celu scharakteryzowania dynamiki danego układu. W tym rozdziale przedstawiono również scenariusze przejścia do chaosu i możliwości jego kontroli.

Rozdział 3 zawiera opis dwóch prototypów silników Halla tj. KLIMT i HIKHET oraz sond elektrycznych wykorzystywanych do zbierania jonów. Zamieszczono tutaj opis procedur pomiarowych podzielonych na etapy oraz analizę osiągnięć uzyskanych przez oba silniki. W tych pomiarach parametrem kontrolnym było napięcie wyładowania, a pomiary prądu jonowego i wyładowania prowadzono dla ustalonych wartości stosunku prądu w cewkach pola magnetycznego. Na końcu tego rozdziału zaprezentowano osiągnięcia testowanych silników, które posłużyły do oceny wpływu na wydajność silnika jego przejścia w stan chaotyczny.

Najistotniejszy z punktu widzenia pracy jest rozdział 4. Tutaj została opisana szczegółowo analiza danych pomiarowych prądu jonowego i prądu wyładowania z wykorzystaniem metod

wykrywania chaosu przedstawionych w rozdziale drugim niniejszej rozprawy. Pozwoliło to autorce rozprawy sformułować wnioski dotyczące możliwości pojawienia zachowań chaotycznych. Ważną częścią tego rozdziału jest wybór reprezentacji danych do analizy przeprowadzonej w dalszej jego części.

Podsumowanie, końcowe wnioski i perspektywy zastosowanej metodologii zostały przedstawione przez Doktorantkę w rozdziale 5.

Praca zawiera spis literatury przedmiotu zawierający 257 pozycji. Doktorantka jest samodzielną autorką jednego artykułu naukowego oraz współautorką siedmiu innych, z tego w czterech artykułach występuje jako pierwszy autor. Artykuły zostały opublikowane w latach 2015-2022 w tym większa część w recenzowanych czasopismach.

## **Teza pracy i jej potwierdzenie**

Pani mgr Agnieszka Jardin (d. Szalecka) sformułowała następującą tezę swojej rozprawy doktorskiej:

***„Poszukiwanie chaosu w zebranych przebiegach prądowych i identyfikacja zakresów warunków pracy silnika Halla, w których chaos znacząco wpływa na jego działanie.”***

Według zamysłów autorki realizacja tak sformułowanej tezy powinna dostarczyć wiarygodnej metody badawczej służącej do analizy wydajności silników Halla. Nowością w tej analizie było poszukiwanie chaosu w danych eksperymentalnych, a nie w modelach numerycznych.

W celu udowodnienia tezy doktorantka przeprowadziła wraz z grupą Akceleratorów Plazmowych w IFPiLM szereg pomiarów dla silników KLIMT i HIKHET, a następnie podsumowała je w rozdziałach 3,4. Uzyskane przez doktorantkę lub przy jej dużym udziale wyniki pomiarów i ich analiz dotyczyły głównie silnika KLIMT co pozwoliło przeprowadzić w rozdziale 4 analizę zachowań chaotycznych dla tego silnika.

Badania eksperymentalne i analizy obejmowały:

1. Pomiarzy za pomocą sondy płaskiej z pierścieniem ochronnym (sondy Faraday'a) oraz kubka Faraday'a prądu wyładowania i prądu jonowego oraz w niektórych przypadkach siły ciągu silnika w zależności od napięcia wyładowania oraz pola magnetycznego scharakteryzowanego przez natężenia prądów w cewce pola magnetycznego zewnętrznej i wewnętrznej. Wykaz wszystkich 230 pomiarów został przedstawiony w tabeli zbiorczej w Dodatku A pracy. Z tych 230 pomiarów 142 dotyczyły silnika KLIMT, a pozostałe silnika HIKHET. Do analiz zachowań chaotycznych wykorzystano pomiary dla silnika KLIMT. Dane dla silnika HIKHET nie były analizowane z powodów, które zostały przedstawione w pracy.
2. Procedury pomiarowe podzielone na poszczególne etapy eksperymentów z użyciem silnika KLIMT i HIKHET, co pozwoliło wyznaczyć optymalne warunki ich działania zarówno pod względem stabilności, jak i wydajności.
3. Analizę uzyskanych osiągnięć tych dwóch typów silnika takich jak moc wyładowania, charakterystyka napięciowo-prądowa, siła ciągu, impuls właściwy, sprawność silnika, moc wiązki czy też całkowitą wartość prądu jonowego w zależności od napięcia wyładowania i prądu w cewkach.
4. Wybór danych pomiarowych do dalszej szczegółowej analizy otrzymanych szeregów czasowych pod kątem stacjonarności badanych procesów, diagramów bifurkcyjnych, widma mocy i badań dotyczących zjawiska intermitencji.
5. Analizę przestrzeni fazowej oraz wykresów rekurencyjnych z uwzględnieniem redukcji szumów za pomocą metody opisanej w dodatku B niniejszej rozprawy.

6. Interpretację wizualną funkcji korelacji w szeregach czasowych za pomocą symetryzowanego wzoru kropkowego oraz analizę tego wzoru pod kątem wyznaczenia entropii Shannona.

Autorka w swojej dysertacji przedstawiła całą złożoność analiz, które doprowadziły ją do wykazania postawionej wcześniej tezy rozprawy. Zastosowana metodyka badań i przeprowadzone analizy wydają się potwierdzać tezę, że w przebiegach prądowych silnika Halla mamy do czynienia z niskowymiarowym chaosem deterministycznym. Potwierdza się też to, że przejście oscylacji w silniku do modu lokalnego, gdzie nie można wyznaczyć wymiaru fraktalnego powoduje skokowy wzrost siły ciągu, czyli chaos ma wpływ na działanie silnika. W ten sposób została wykazana hipoteza rozprawy.

### **Ocena pracy doktorskiej**

Rozprawa doktorska Agnieszki Jardin to zwarta, jednorodna dysertacja prezentująca badania i analizy dla silnika Halla w oparciu o teorię chaosu. Autorka wykazuje, że w tych układach chaos może wpłynąć na działanie silnika. Czyni to nie poprzez analizy modeli numerycznych, a poprzez analizę szeregów czasowych uzyskanych w wyniku pomiarów prądu wyładowania i jonowego w takich silnikach.

Wprowadzenie do problematyki silników plazmowych, ich podstawowych parametrów, eksperymentalnych metod pomiaru prądu jonowego i wyładowania, znajomość zagadnień związanych z teorią chaosu oraz systematyka i jakość analiz przedstawionych w niniejszej dysertacji świadczą o dobrym przygotowaniu autorki rozprawy.

Zalety tej pracy można opisać następująco:

1. Przygotowanie syntetycznego przeglądu metod wykrywania chaosu oraz krótkiego zarysu opisującego podstawy fizyczne działania silników Halla.
2. Szczegółową metodologię prowadzenia testów eksperymentalnych z silnikami Halla. Przedstawienie w sposób systematyczny wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnych prądu wyładowania i prądu jonowego dla różnych napięć wyładowania oraz ich bardzo szczegółowa analiza pod kątem zachowań chaotycznych.
3. Bardzo jasne i klarowne przedstawienie własnego wkładu autorki w przygotowanie zaprezentowanego w dysertacji materiału doświadczalnego oraz analiz pod kątem chaosu w tym metodę redukcji szumu (Dodatek B dysertacji)
4. Dysertacja jest dobrze zorganizowana i bardzo szczegółowa. Świadczy to o dużym nakładzie pracy autorki (opracowanie metod i kodów, szczegółowe testy, walidacja i kompresja itp.) oraz zrozumieniu tematu.

Wady tej pracy można podsumować w następujący sposób:

1. Do analizy danych pomiarowych została wybrana pewna grupa danych pomiarowych stanowiąca reprezentację wszystkich pomiarów. Myślę, że warto byłoby wyjaśnić, jakie było kryterium doboru takich a nie innych danych pomiarowych wykorzystanych w analizach.
2. Wydaje się, że zamieszczenie wyników dotyczących silnika HIKHET, które i tak nie są potem analizowane pod kątem teorii chaosu niepotrzebnie rozwleka dysertację.
3. Wydaje się, że brakuje w pracy przedstawienia i odniesienia do modeli teoretycznych opisujących fizykę działania silników Halla, które służą do modelowania numerycznego takich silników. Obecne w pracy jedynie odnośniki literaturowe, trochę zubożają zawartość tej dysertacji.

Niniejsza rozprawa doktorska została zredagowana czytelnie i przejrzysto, czytelnik bez trudu zapozna się z tezą i wynikami eksperymentalnymi, prześledzi fizyczne podstawy opisanych analiz, otrzymane wyniki i ich analizę. Zdjęcia, rysunki, wykresy są dobrze dopasowane do omawianej problematyki.

Błędy redakcyjne są sporadyczne, i tak:

- Rys.3.9 trudno się zorientować dla jakich położań kątowych sondy ta charakterystyka została otrzymana;
- Str 126 – dla ułatwienia czytelnikowi, przydałoby się odwołanie do strony, na której po raz pierwszy zdefiniowano skrośność i kurtozę;
- Rys.4.20 – brak jest na rysunku opisu wielkości  $k$ ;
- Str 135 – dla ułatwienia czytelnikowi przy odwołaniu się do tabeli 4.1, przydałby się numer strony na której tabela została zamieszczona;
- Str 138 – dla ułatwienia czytelnikowi przy wzmiance o I etapie przydałby się numer strony, gdzie ten etap został zdefiniowany;

### **Podsumowanie**

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską uważam za samodzielny i wartościowy dorobek naukowy Pani Agnieszki Jardin, będący oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego. Cel pracy został osiągnięty, a całość rozprawy jest konsekwentną realizacją postawionej we wstępie tezy.

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska może być dopuszczona do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne, zgodnie ze znowelizowaną ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami, por. Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455, Nr 112, poz. 654, z 2012 r. poz. 1544) o co wnoszę do Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego".

*Marek Sobolewski*

Kraków 27/02/2023