

Prof. dr hab. Inż. Maciej Ogorzałek  
Zakład Technologii Informatycznych  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Jagiellońskiego  
Ul. Prof. S. Łojasiewicza 11  
30-348 Kraków

**RECENZJA**  
**Roprawy doktorskiej**  
**mgra inż. Radosława Basińskiego**  
**pt. "Stabilizacja orbit okresowych w układach podatnych na chaos"**

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej Prof. Dra hab. Inż. Lecha Grzesiaka (Uchwała Rady Wydziału z dnia 26 czerwca 2019, pismo Dziekana z dnia 3 lipca 2019).

### **1. Tematyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy interesującego z punktu widzenia naukowego problemu eliminacji drgań chaotycznych w nieliniowych układach dynamicznych. Bardzo dużo prac dotyczących tej tematyki ukazało się w literaturze światowej w latach 80 i 90tych XX wieku. Opracowano wtedy szereg efektywnych podejść i algorytmów sterowania wykorzystujących szczególne właściwości takich układów. Wiele opracowanych metod znalazło także zastosowania praktyczne. W chwili obecnej badania w tej dziedzinie są kontynuowane, choć przestały należeć do głównego nurtu badawczego w dziedzinie układów nieliniowych. Analizując problematykę badawczą ujętą w pracy należy zwrócić uwagę na istotne aspekty, które w moim przekonaniu mogą stanowić istotną nowość. Są to: 1). Przetestowanie na drodze symulacji komputerowych zmodyfikowanej metody wieloparametrowej i wielopunktowej sterowania układów chaotycznych; 2). Elementy analizy sterowania dla układów chaotycznych o modelach matematycznych w postaci równań różniczkowych ułamkowego rzędu; 3). Próba badania sterowania dla modelu układu energetycznego dużej mocy jakim jest piec łukowy. Podjęcie tematu z dziedziny obwodów i układów nieliniowych należy uznać za ambitne, tematyka ta ze względu na trudności natury matematycznej jest w chwili obecnej stosunkowo rzadko podejmowana. Tematyka punktu 3 wymienionego powyżej jest moim zdaniem najciekawsza, gdyż bardzo niewiele badań dynamiki nieliniowej obiektów tego typu zostało dotąd opisanych i opublikowanych.

### **2. Teza pracy**

Na podstawie analizy literatury przedmiotu Autor sformułował zagadnienie badawcze, które zawarł w następującej tezie pracy:

*Możliwa jest stabilizacja niestabilnych orbit okresowych, zanurzonych w dziwnych atraktorach trajektorii fazowych złożonych układów chaotycznych w obecności zakłóceń i szumów, poprzez niewielkie zmiany wybranych parametrów tych układów.*

Tak sformułowana teza jest niezwykle ogólna – potwierdzenie takiej tezy można wydedukować w oparciu o przegląd literatury (np. stabilizacja jest możliwa przy użyciu metodyki OGY czy OPF i różnych ich wariantów) ... bez prowadzenie jakichkolwiek badań! Aż prosi się o bardziej precyzyjne sformułowania, które pozwoliłyby po przeanalizowaniu zaproponowanej metodyki i wykonaniu badań na modelach symulacyjnych, na stwierdzenie czy teza została udowodniona, czy proponowane podejście jest właściwe i jakie korzystne cechy posiada.

Ta uwaga natury ogólnej nie umniejsza mojej pozytywnej oceny zaproponowanej przez Autora pracy metodyki sterowania, różniącej się od poprzednich, oraz dużego nakładu pracy i wykonanych wszechstronnych badań symulacyjnych dla weryfikacji stosowalności zastosowanego podejścia.

W pracy po nakreśleniu tła rozważań w oparciu o źródła literaturowe Autor w sposób przekonujący uzasadnił tę tezę rozwijając w nowatorski sposób podejścia wcześniej znane, budując oryginalny model oraz jego implementację a w końcu przeprowadzając w oparciu o badania symulacyjne eksperymentalną walidację zaproponowanego przez siebie podejścia.

### **3. Struktura pracy**

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 8 rozdziałów. Rozdział 1 poświęcono wprowadzeniu do tematyki pracy. W rozdziale 2 zostały przedstawione własności trajektorii chaotycznych w systemach deterministycznych oraz zostały omówione podstawowe kryteria pozwalające na zakwalifikowanie danego procesu do klasy zjawisk chaotycznych. W rozdziale 3 omówiono wybrane metody analizy układów chaotycznych. Opisano podejście bazujące na obliczaniu tzw. wykładników Lapunowa, które w sposób jakościowy pozwalają ocenić dynamikę układu. Omówiono koncepcję odwzorowania Poincarégo, które pozwala obniżyć rząd analizowanych równań różniczkowych badanego układu. Opisano także metody poszukiwania niestabilnych orbit okresowych zanurzonych w dziwnych atraktorach trajektorii fazowych danego układu chaotycznego.

Koncepcje sterowania układów chaotycznych omówione zostały w rozdziałach 4 i 5. Autor skoncentrował uwagę na problemie stabilizacji orbit okresowych należących do dziwnego atraktora.

W rozdziale 5 zostały zaprezentowane opracowane przez autora metody wielopunktowe wywodzące się z metody minimum odległości zaprezentowanej przez Zbigniewa Galiasa w 1995 r. Prezentowane metody pozwalają na modyfikację wielu parametrów danego układu. W przypadku układów autonomicznych sterowanie sprowadza się do stabilizacji punktu stałego uogólnionego odwzorowania Poincarégo. W rozdziale tym została również przedstawiona modyfikacja tej metody polegająca na bezpośredniej stabilizacji trajektorii.

Ponadto autor dokonał uogólnienia tych metod na układy ułamkowego rzędu.

W rozdziale 6 zostały przedstawione rezultaty, uzyskane w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych, dotyczące stabilizacji orbit okresowych w układzie Chuy. Zbadano efektywność opracowanych przez autora metod sterowania układami chaotycznymi w obecności zakłóceń i szumów. Ponadto została zbadana możliwość

stabilizacji orbit okresowych przy zastosowaniu sterowania trójpołożeniowego oraz dwupołożeniowego.

W rozdziale 7 zostało omówione zagadnienie stabilizacji pracy stalowniczego pieca łukowego. Ze względu na złożoność procesów oraz brak dostatecznie dokładnych modeli opisujących chaotyczne zachowanie się pieca łukowego, autor przedstawił własny model wyładowania łukowego, bazujący na dynamicznej charakterystyce napięciowo – prądowej łuku elektrycznego. Został zaprezentowany model matematyczny trójfazowego pieca łukowego, pozwalający na badanie zjawisk chaotycznych towarzyszących wytopowi stali w rzeczywistych urządzeniach tego typu. Zbadano negatywny wpływ pieca na system elektroenergetyczny oraz możliwość jego ograniczenia poprzez zastosowanie opracowanych metod stabilizacji orbit okresowych. Stabilizację przeprowadzono w dwóch stadiach pracy stalowniczego urządzenia łukowego. Omówiono potencjalne korzyści płynące ze stabilizacji drgań chaotycznych występujących w układzie. Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy.

Praca zawiera także dość obszerny spis literatury zawierający 199 pozycji – niestety Autor w analizie literatury zatrzymał się na roku 2012!! – brak jest źródeł późniejszych, co jest dość poważnym mankamentem.

Autor przedstawił w pracy analizę źródeł, które dotyczą metod polegających na stabilizacji orbit okresowych – ta analiza jest wystarczająca dla umotywowania propozycji nowych podejść i modyfikacji tychże metod..

Praca zawiera dobrze przygotowany zestaw wykresów i rysunków na każdym etapie prowadzonych rozważań, jest bardzo dobrze opracowana graficznie.

#### **4. Oryginalne osiągnięcia autora rozprawy**

Najważniejsze samodzielne i oryginalne osiągnięcie Doktoranta to:

1. Zaproponowanie nowego podejścia do sterowania układem chaotycznym, opisanym przy pomocy modelu w postaci równania różniczkowego, polegającego na modyfikacji metodyki stabilizacji orbit okresowych zaproponowanej przez Z. Galiasa w pracach z lat 1995.
2. Podejście to opiera się na minimalizacji odległości śladu (punktu przecięcia) obserwowanej trajektorii od wybranej orbity okresowej, na przekrojach uogólnionego odwzorowania Poincarégo w każdej chwili próbkowania, poprzez niewielkie modyfikacje jednego bądź kilku parametrów układu autonomicznego.
3. Opracowanie wielopunktowej metody stabilizacji orbit okresowych, polegającej na bezpośredniej minimalizacji odległości trajektorii fazowej od orbity okresowej układu autonomicznego, we wszystkich kierunkach przestrzeni fazowej, poprzez niewielkie modyfikacje jednego bądź kilku parametrów sterujących.
4. Wyprowadzenie formuł matematycznych potrzebnych do obliczania sygnałów sterujących w oparciu o dane z eksperymentu numerycznego
5. opracowanie wielopunktowej metody stabilizacji orbit okresowych dla układów opisanych równaniami różniczkowymi ułamkowego rzędu, z wykorzystaniem oryginalnej aproksymacji pierwszego rzędu odwzorowania Poincarégo dla tego typu układów;

6. Przetestowanie numeryczne wariantów dwu- i trój-położeniowego sterowania zarówno układów opisanych równaniami różniczkowymi zwyczajnymi oraz ułamkowego rzędu, poprzez małe zmiany jednego bądź kilku parametrów układu.
7. Wprowadzenie nowoczesnego modelu dynamiki pieca łukowego z uwzględnieniem zjawiska nieprzewidywalnej zmiany długości łuku elektrycznego, w wyniku zachowania się plazmy w chaotycznym polu elektromagnetycznym. Zaproponowany model nieliniowy pozwala na badanie i weryfikację istnienia nietypowych zachowań układu związanych z istnieniem chaotycznych trajektorii przy wybranych wartościach parametrów. Pozwala także na przetestowanie na modelu różnych wariantów sterowania/stabilizacji zachowań chaotycznych.

Autor wykonał także liczne eksperymenty numeryczne pozwalające na ocenę efektywności opracowanych metod eliminacji drgań chaotycznych w obecności zakłóceń i szumów w rozpatrywanych układach;

Wykonane badania stanowią istotny przyczynek do głębszego poznania właściwości różnego rodzaju układów, w których mogą występować drgania typu chaotycznego. Praca stanowi także przyczynek teoretyczny do analizy możliwości stabilizacji układów chaotycznych.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W czasie czytania tak obszernej i wielowątkowej rozprawy nasuwa się szereg pytań, które mogą stanowić element dyskusji w trakcie obrony pracy ale nie decydują o pozytywnej ocenie całości opracowania:

1. Dość niezręczne wydaje się sformułowanie użyte w tytule pracy „... w układach podatnych na chaos” (wg. Słownika Języka Polskiego: *podatny* «z łatwością ulegający czemuś») sugerujące bądź samoistne wpadanie w reżim chaotyczny bądź na skutek oddziaływania zewnętrznego. W pracy rozważane są natomiast układy nieliniowe, które w zależności od warunków pracy czy doboru parametrów mogą znajdować się w różnych stanach dynamicznych, w tym także wykazywać własności chaotyczne – nie są podatne ale po prostu znajdują się w jakimś stanie dynamicznym.
2. Teza pracy sformułowana jest tak, że nie wiadomo co w pracy będzie rozważane! Dla specjalisty przedstawiona teza wydaje się oczywista gdyż istnieje wiele metod opracowanych i opisanych w literaturze, które taką tezę potwierdzają – z pewnością można stwierdzić jej prawdziwość bez żadnych badań przeprowadzonych w pracy.
3. Działanie wybranych do analizy metod pokazano na wielu przykładach. Badania ograniczone są jednak wyłącznie do symulacji komputerowych.
4. Zastosowanie wielu przekrojów Poincarego oraz zmiana wartości wielu parametrów do sterowania jest dość łatwe do implementacji w postaci symulacji komputerowej. W praktycznym układzie wykrywanie przecięć hiperpłaszczyzn, pomiar sygnałów w układzie, wygenerowanie sygnałów wymaga budowy bardzo wyspecjalizowanych układów, które będą miały decydujące znaczenie dla możliwości sterowania.

5. Jednoczesna zmiany kilku parametrów układu jest ciekawa z punktu widzenia teorii lecz mało realna w praktyce. Np. o ile zmiana wartości rezystancji jest stosunkowo łatwa w implementacji – zmiana indukcyjności cewki czy pojemności kondensatora jest prawie niemożliwa w układzie rzeczywistym. Autor nie podaje w zasadzie żadnych ograniczeń przy budowaniu swoich procedur sterowania.
6. Metoda, w której proponuje się zmianę parametru sterującego nawet kilka tysięcy razy na okres oscylacji mają wyłącznie znaczenie teoretyczne i nadają się tylko do badań symulacyjnych. Ciekawe jak Autor wyobraża sobie realizację takiego sterowania w jakimkolwiek układzie rzeczywistym?
7. Czy możliwe jest sterowanie w układach wyższych rzędów?
8. Równania układu nie-autonomicznego w prosty sposób można sprowadzić do równań bez wymuszenia. Czym różni się zatem sterowanie w układzie nieautonomicznym od sterowania w układzie autonomicznym?
9. W literaturze można znaleźć wiele rezultatów badań sterowania w układach chaotycznych przy zastosowaniu standardowych metod znanych w teorii sterowania takich jak np. sterowanie adaptacyjne. Czym różni się algorytm zaproponowany przez Autora nazywany wieloparametrowym - wielopunktowym od sterowania adaptacyjnego, czy sterowania predykcyjnego?
10. Brak jest wyników badań laboratoryjnych, choćby dla układu Chuy czy oscylatora Colpittsa np. dla prostych konfiguracji np. dwóch hiperpłaszczyzn przecinających.
11. Jeden z rozważanych przykładów to stalowniczy piec łukowy, urządzenie o stosunkowo dużej mocy. Obserwacja sterowania takim urządzeniem mogłaby być niezwykle ciekawym przyczynkiem do dalszych badań. Jakie parametry rzeczywistego układu są dostępne dla ewentualnego sterowania?
12. Istotnym brakiem w pracy jest brak analizy wpływów zjawisk jakie można napotkać w ewentualnych realizacjach sterowania procesów fizycznych np. wpływu dokładności pomiarów, szybkości działania układów sterujących, opóźnień w pętli sterującej, precyzji obliczeń itp. na możliwości sterowania.
13. Badanie wpływu szumów i zakłóceń to nie to samo! To co nazywane jest zakłóceniami jest wprost zaburzeniem pracy układu a nawet zmianą jego struktury (np. przez wprowadzenie dodatkowego źródła napięciowego o charakterze prawie-okresowym i dużej amplitudzie). W takiej sytuacji próbujemy sterować innym układem niż układ oryginalny!
14. Brak jest w pracy porównania wyników uzyskanych przy pomocy zaproponowanych przez Autora metod z wynikami uzyskanymi przy użyciu znanych wcześniej metod (OPF czy OGY czy też metody Z. Galiasa). Czy metody wielopunktowe i wieloparametrowe sterowania dają lepsze rezultaty? Większą precyzję? Szybkość dojścia do docelowej trajektorii? Czy kosztem komplikacji algorytmu sterującego uzyskujemy istotną poprawę sterowania?
15. Czy proponowane podejścia i algorytmy nadają się do sterowania „w czasie rzeczywistym”? Jaki jest koszt obliczeniowy w porównaniu z wcześniej opisanymi, znacznie prostszymi algorytmami?
16. Fatalne jest tłumaczenie na język angielski streszczenia – Abstract (str. 6). – liczba błędów jest ogromna – czy nie można poprosić o pomoc fachowca?
17. Autor w analizie literatury zatrzymał się na roku 2012!! Badania w wielu laboratoriach w świecie były prowadzone i publikowane także po roku 2012. Spis literatury nie zawiera kilku bardzo istotnych pozycji także z lat wcześniejszych, np.

- a. Chen G, Dong C, : From Chaos to Order. Methodologies, Perspectives and Applications. World Scientific, Series A, vol.24, 1998 (w szczególności Rozdział 3!)
  - b. E. Schoell, H.G. Schuster: Handbook of Chaos Control, Wiley VCH, 2008
  - c. R. Caponetto, G. Dongola, L. Fortuna and I. Petráš: Fractional Order Systems: Modeling and Control Applications, World Scientific Series on Nonlinear Science Series A: Volume 72, 2010
  - d. P. Arena, R. Caponetto, L. Fortuna: Nonlinear Non-integer Order Systems: Theory and Applications, World Scientific Series on Nonlinear Science Series A: Volume 38, 2001
18. Odmiana nazwiska Chua jest niewłaściwa – powinno być w dopełniaczu: Chuy

## Podsumowanie

Oceniając pracę należy podkreślić kilka ciekawych pomysłów teoretycznych zaproponowanych przez doktoranta, które potencjalnie mogą zwiększyć efektywność sterowania -stabilizacji niestabilnych orbit okresowych. Autor dokonał także pogłębionej weryfikacji działania tych nowych podejść na drodze testów symulacyjnych. Ciekawe są także wyniki dotyczące zastosowań w badaniach modeli ułamkowego rzędu oraz przeprowadzone testy numeryczne dla modelu elektrycznego układu dużej mocy jakim jest piec łukowy.

Przedstawione ciekawe rezultaty teoretyczne, nowe koncepcje sterowania oraz wszechstronnie przeprowadzone badania symulacyjne wraz z wnioskami mają dostateczną wartość naukową by być podstawą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie elektrotechnika.

Praca nie jest pozbawiona wad i ograniczeń – w szczególności brak jest badań laboratoryjnych, czy prób oceny stosowalności proponowanych podejść w układach fizycznych, rzeczywistych. Przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne nie decydują jednak o całościowej ocenie wartości pracy, stanowią raczej zaproszenie do głębszej dyskusji nad możliwą kontynuacją prowadzonych badań.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odnośne przepisy. Wnoszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, dnia 28 sierpnia 2019

