

Dr hab. inż. JERZY WOJEWODA
University of Aberdeen,
School of Engineering, Centre for Dynamic Research Applications
Aberdeen, dn. 9.04.2009 r.

RECENZJA

Pracy doktorskiej

Grzegorza Garbarcza

pt.

**„Przetwarzanie danych doświadczalnych z uwzględnieniem ich
chaotycznego charakteru”,**

opracowana na zlecenie:

Rady Naukowej

Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

1. WSTĘP

Analiza zjawisk eksperymentalnych polega na adaptacji rozwiązań teoretycznych do wyników praktycznych, co nie jest zwykle zagadnieniem trywialnym, jako że dane rzeczywiste nie są prostym odpowiednikiem wyników symulacji. Nie każda z metod teoretycznych znajduje bezpośrednie zastosowanie w praktyce, tym bardziej nowe sposoby stworzenia narzędzia eksperymentatora są warte zainteresowania.

Metody wyznaczania podstawowych cech materiałowych, jakimi są granica sprężystości i plastyczności są od lat wyraźnie określone normami, stąd każda próba zmiany sposobu spojrzenia na ich określanie może być skwitowana pytaniem – czy warto? Być może proponowana metoda nie stanie się podejściem normatywnym, ale może być uznana za kolejne zastosowanie nowoczesnego potraktowania problemu klasycznego. Istotne jest również wskazanie na fakt, że praca zawiera mocno zaakcentowane aspekty eksperymentalne, a nie ogranicza się jedynie do teorii, co więcej wykorzystuje teorię w praktyce. Dlatego, zdaniem recenzenta, należy docenić fakt, że Doktorant położył nacisk na wspomniane powyżej zastosowania praktyczne.

2. OCENA PRZEDŁOŻONEJ ROZPRAWY

2.1 TREŚĆ ROZPRAWY

Praca przedstawiona do recenzji została napisana na 79 stronach i zawiera stronę tytułową, wstęp, siedem rozdziałów stanowiących zasadniczą część merytoryczną pracy, wnioski, dodatek z programami komputerowymi, wykaz literatury, spis treści. Spis literatury liczy

łącznie 64 pozycje, w tym 6 prac ogłoszonych w materiałach konferencyjnych, których mgr inż. Grzegorz Garbacz jest współautorem.

Autor podjął temat przeniesienia metod dynamiki nieliniowej w obszar przetwarzania danych doświadczalnych, z których co najmniej jeden – analiza wyników dotyczących określania granicy sprężystości i plastyczności jest podejściem nowym i oryginalnym. Autor traktuje zaburzenia pomiarowe jako nieliniowy układ dynamiczny, który posiada elementy stochastyczne. Opiera się na swoich osiągnięciach prezentowanych wcześniej na kilku konferencjach naukowych, biorąc pod uwagę także na pierwszy rzut oka odległą od wspomnianej wyżej analizy procesy rozciągania dziedzinę obserwacji sejsmicznych. Do celów identyfikacji zachowań użył typowych w dynamice nieliniowej metod, takich jak analiza obrazów trajektorii fazowych uwzględniających opóźnienie, metoda określania korelacji czy wykładników Hursta. Praktycznie wykorzystał obliczone wartości entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinai'a. Stanowi to podstawę zbudowania procedur numerycznych służących wyznaczeniu granicy sprężystości i plastyczności. Wyniki uzyskane dla danych sejsmicznych są według Autora dowodem na ogólność proponowanej metody.

We wstępie zawarte są ogólne rozważania na temat zastosowań matematyki w badaniach zjawisk rzeczywistych i rozwinął je w kierunku powstania teorii chaosu. Podkreślono podstawowe cechy, jakimi może być prosty model zjawiska i złożone zachowanie nim opisane.

W rozdziale 2 Autor pokazał wybrane przykłady zachowań chaotycznych w różnych dziedzinach nauki od ruchów konwekcyjnych, przez koło wodne do wymuszonego ruchu wahadła fizycznego. Zilustrował je wykresami, które niestety pokazują niewielkie wycinki trajektorii czy wykresów czasowych i nie ułatwiają czytelnikowi właściwej oceny sytuacji.

W rozdziale 3 sformułowane są cztery tezy pracy, których brzmienie warto przytoczyć. Pierwsza, że *nieliniowość w układach i procesach fizycznych z dysypacją energii przejawia się zakresami występowania chaosu*. Druga – *podobieństwo geometryczne wykresu fazowego dla stanu ustalonego i zbudowanego z użyciem opóźnienia pozwala na stwierdzenie, że w analizowanym obszarze występuje bifurkacyjne przejście od laminarności do chaosu*. Trzecia – *entropia Kołmogorowa-Sinai'a jest sposobem udoskonalenia przetwarzania danych oraz obiektywizacji wyników*. Czwarta – *efektywność zastosowania tejże entropii do przetwarzania danych zależy od pojawienia się chaosu deterministycznego w nieliniowościach danych*.

Określony został cel pracy – udoskonalenie procesu przetwarzania danych pomiarowych (pojęcie *mechaniczne dane pomiarowe* na stronie 12 brzmi nieco awangardowo) prowadzące do obiektywizacji wyników i usprawnienia ich analizy. Autor wspomina tu także możliwość prognozowania przebiegu analizowanego procesu, jednak nie udało mi się dostrzec takiego miejsca w dalszej części pracy.

W rozdziale 4 krótko omówione zostały niektóre metody statystycznego prognozowania wystąpienia chaosu deterministycznego, jak wykładnik Hursta oraz metoda korelacji danych.

Rozdział 5 zawiera elementy analizy zachowań układów dynamicznych w przestrzeni fazowej (trajektorie, atraktory), wykresy bifurkacyjne, metoda rekonstrukcji przestrzeni fazowej, związek entropii z chaosem deterministycznym.

Rozdział 6 zawiera opis sposobu zbierania danych doświadczalnych i ich strukturę, ze zwróceniem uwagi na wpływ różnych elementów toru pomiarowego na dokładność. Przedstawione zostały normy dotyczące badania granic sprężystości i plastyczności.

Zasadnicza część pracy to rozdział 7. W części pierwszej zaprezentowany został przegląd badanych materiałów, łącznie z wykresami uzyskanymi z maszyny wytrzymałościowej, obejmujący szereg metali do drewna włącznie. Kolejna część nawiązująca w tytule do *identyfikacji chaosu w danych doświadczalnych* zawiera inną niż klasyczna prezentację wyników, polegającą na przetworzeniu danych doświadczalnych eksponując dynamikę wyników eksperymentalnych. Jest pokazany także sposób otrzymywania portretów fazowych z wykorzystaniem współrzędnych z opóźnieniem. Część ostatnia to prezentacja analizy wyników zmian pola grawitacyjnego i indukcji magnetycznej zgromadzonych w pobliżu wulkanu Etna. Przedstawione wcześniej metody zastosowano dla tych zestawów danych uzyskując jakościowo różne wyniki dla okresów braku aktywności sejsmicznej, tuż przed erupcją i po niej.

Równie ważny rozdział 8 szczegółowo opisuje proponowaną metodę wyznaczania modułu sprężystości, opartą na zastosowaniu pojęcia entropii metrycznej Kołmogorowa-Sinai'a. W jego drugiej części pokazano wiele przykładów zastosowań do różnych próbek, porównując otrzymane wyniki z metodą klasyczną. Następnie zaprezentowana jest nowa metoda wyznaczania granicy plastyczności polegająca na wyznaczaniu entropii metrycznej danych pomiarowych. Założeniem jest zmiana jakościowa, jaka jest oczekiwana na granicy plastyczności i sprężystości, którą można odnieść do konkretnego punktu pomiarowego. Badany układ jest traktowany jako taki, w którym zachodzi dyssypacja energii, a związany z tym zjawiskiem chaos deterministyczny w danych powoduje zmienność entropii. Metoda zilustrowana jest wieloma przykładami ilustrującymi sposób posługiwania się nią oraz otrzymywane wyniki. Autor spróbował tu ocenić, jaki powinien być zestaw najkorzystniejszych parametrów dla uzyskania jak najbardziej wiarygodnych wyników. Wniosek, jaki wynika z rozważań stwierdza, że najważniejszy jest właściwy dobór liczebności zbioru pomiarowego i liczby podprzedziałów wykorzystywanych w analizie. Część piąta prezentuje zastosowanie metody wykorzystującej obliczanie entropii metrycznej do analizy zmian aktywności wulkanu Etna.

Rozdział 9 zatytułowany wnioski zawiera najważniejsze konkluzje Autora. Należy do nich zaliczyć przede wszystkim stwierdzenie, że wyraźny spadek wartości entropii Kołmogorowa-Sinai'a na granicy plastyczności spowodowany jest nieliniowościami związanymi ze zmianą struktury danych w obszarze sprężystym i plastycznym. W obszarze plastycznym stwierdza się występowanie zachowań cyklicznych. Zastosowanie obliczania entropii pozwala na obiektywizację i ułatwienie wyznaczania parametrów materiałowych. Autor podkreśla też uniwersalność potencjalnych zastosowań do badania szerokiej klasy układów dynamicznych.

Następuje na koniec dodatek w formie wydruku programu napisanego przez Autora w formie makrodefinicji języka Visual Basic do zastosowania w popularnym arkuszu kalkulacyjnym Excel. Na koniec następuje spis literatury, obejmujący w znaczącej części dosyć świeże pozycje z okresu ostatnich 20 lat.

2.2 UWAGI KRYTYCZNE I Dyskusyjne

Przedstawiona do oceny praca zawiera wszystkie niezbędne elementy pracy naukowej, choć od strony organizacyjnej i wydawniczej nie jest zbyt przejrzysta. Brakuje wyróżnienia notacji matematycznej w formie druku kursywą, sporo jest literówek, które zaznaczyłem w dostarczonym mi egzemplarzu. Opracowanie graficzne wyników w formie jak się wydaje przechwyconych zawartości ekranu przedstawia wiele do życzenia, gdyż obniża jakość wydruku. Nie są to oczywiście uwagi dyskwalifikujące pracę, ale rzucają się czytelnikowi od razu w oczy.

Przechodząc do szczegółów merytorycznych po ogólnym wstępie będącym autorskim spojrzeniem na rozwój teorii chaosu w różnych obszarach nauki, Autor rozwija ogólny opis wybranych zagadnień dynamiki nieliniowej. Temat wahał się ilustrowany jest niezbyt szczęśliwie dobranymi wykresami, które w nazbyt wycinkowy sposób demonstrują różnorodność jego zachowań. Brakuje też kryteriów oceny tychże zachowań. Samo stwierdzenie o jakości ruchu to nieco za mało, mamy spory zestaw narzędzi, które pozwalają to ocenić jednoznacznie. Rysunek 8 na stronie 8 bez dalszej jego dyskusji wydaje się być całkowicie zbędny. Opis zjawisk z dziedziny medycyny i ekonomii dobrze ilustruje interdyscyplinarność zjawisk chaotycznych. Choć autor wspomina o prognozowaniu, to brak przykładów to potwierdzających. Rysunek 9 pokazuje sposób modelowania, ale nie prognozowania.

Bardzo trudno uzyskać jest stan badanego układu, gdzie synergia zmiennych go opisujących nie musiałaby być uwzględniana. Izolacja układu od wpływu niepożądanych czynników jest często wręcz niemożliwa. Toteż próba takiego opracowania danych, gdzie zaburzenia pomiarowe traktuje się jako nieliniowy układ dynamiczny posiadający cechy stochastyczne wydaje się być istotną zaletą ocenianej pracy. Odwołanie się do wcześniejszych prac Autora jest równie ważnym elementem oceny, gdyż całość jest efektem szerszego zakresu jego zainteresowań. Dobór metod analizy danych w postaci analizy portretów fazowych we współrzędnych z opóźnieniem, obliczania wykładników Hursta czy metody analizy danych powstałych w wyniku obliczeń entropii jest kolejnym elementem podnoszącym wartość pracy. Dyskusyjne jest natomiast wykorzystanie geometrycznego podobieństwa atraktorów, o ile idea jest słuszna, to jej realizacja w dalszej części nie wydaje się przekonująca.

Ocena sformułowanych tez pracy. Pierwsza z nich jest nazbyt ogólna i nie wydaje się być udowodniona w dalszych rozważaniach. Druga jest nieco zbyt śmiało postawiona i również nie widać dalej jej wykazania, nie zademonstrowano jasno powstawania i występowania bifurkacji. Można zgodzić się z trzecią tezą, chyba najważniejszą, która bezpośrednio dotyczy metody i jej wykorzystania. Ta wydaje się być sformułowana poprawnie i wykazana w rozdziałach 7 i 8. Teza czwarta również nie wydaje się mieć potwierdzenia w dalszej części pracy. Wydaje się, że ograniczenie się do jednej, szerszej sformułowanej tezy mogłoby być tu całkowicie wystarczające.

Omówienie narzędzi do badania zachowań chaotycznych ograniczone jest do tych, które Autor zastosował i można się z tym zgodzić. Zastrzeżenia budzi temat dziwnych atraktorów, który nie ma odniesienia w dalszej części pracy i dla jej dobra mógłby być pominięty. Tym bardziej, że przedstawienie trajektorii fazowej na Rysunku 10, strona 14 demonstruje, jak się

wydaje, tylko jej fragment wycięty ze znacznie większej całości. Atraktor nazwany autorskim wydaje się być całkowitym nieporozumieniem, gdyż nie przedstawia po pierwsze rzeczywistego obrazu trajektorii, a po drugie można dyskutować czy jest to w ogóle jakiś atraktor, gdyż istnieje ścisłe, analityczne rozwiązanie układu (6), które zależy jedynie od czasu, a żadna z jego zmiennych nie ma wpływu na jakąkolwiek inną. Jest to zamknięta krzywa w przestrzeni fazowej, a przekłamanie na rysunku 11, strona 15 polega na zbyt rzadkim próbkowaniu otrzymanego rozwiązania. Nawiązywanie w otoczeniu tego rysunku do dziwnych atraktorów jest nie na miejscu. Kolejno pokazane wykresy bifurkacyjne równania logistycznego, czy innych odwzorowań nawiązują do zachowań bifurkacyjnych i stanowią ogólne ich omówienie. Nie widać w dalszej części pracy zastosowania tych zagadnień. Ogólne omówienie rekonstrukcji trajektorii fazowej wydaje się być poprawne i znajduje swe uzasadnienie w rozdziale 7, choć dyskusyjne jest uznawanie definitywnego określenia stanu układu na podstawie jedynie kilku odtwarzanych punktów. Oczekiwałbym od Autora uzasadnienia takiego podejścia. Dyskusja entropii w końcowej części rozdziału 5 jest potrzebna w kontekście proponowanej metody.

Omówienie sposobu i jakości zbieranych danych zawiera szeroką, choć ogólną dyskusję różnych czynników mających wpływ na dokładność pomiaru. Brakuje konkretnych danych dotyczących stosowanej przez Autora aparatury.

Równie szeroki przegląd danych eksperymentalnych dotyczących różnych materiałów w rozdziale 7 w swej najciekawszej części zawiera mało czytelne rysunki 48-51. Ich powiększenie pozwoliłoby na lepszą ocenę jakości wyników, gdyż pokazują szczegółowo interesujący Autora obszar zastosowania proponowanej metody. Brakuje również dyskusji kolejnego interesującego wyniku, pokazanego na rysunku 52, str. 38. Zawiera on wynik przetworzenia danych, ważny dla dalszych rozważań. Oczekiwałbym tu, choć paru słów komentarza. Brak wniosków Autora znacznie obniża wartość tego rozdziału. Także brak wspólnej skali analizowanych przypadków nie pomaga w ocenie ich wartości.

Wspomniane tu przez Autora (s. 38) określenie *portretów fazowych atraktora z wykorzystaniem współrzędnych z opóźnieniem* wydaje się w świetle małej ilości pokazanych danych nieco na wyrost, gdyż w procesie tym trudno zaobserwować stan ustalony, a także jest on w analizowanym obszarze nieodwracalny. Pojęcie atraktora w analizie układów dynamicznych wiąże się ze zbiorem w przestrzeni fazowej, do którego w miarę upływu czasu zbiegają trajektorie rozpoczynające się w różnych obszarach przestrzeni fazowej. Opisana jest procedura nazwana przez Autora *procedurą zachowań chaotycznych* oparta o analizę wartości eksperymentalnych i innych, wytworzonych na ich podstawie. Jej wyniki pozwalają Autorowi na określenie stanu badanego procesu jako chaotyczny. Pokazane są także wyniki analizy korelacyjnej w postaci wykresów autokorelacyjnych dla danych pomiarowych, a także wartości wykładników Hursta badanych materiałów. Pokazano również szereg wykresów zbudowanych w oparciu o dane z opóźnieniem i wartości pochodnych liczonych dla tych danych. Ponieważ w przeciwieństwie do wykresów nazwanych przez Autora portretami fazowymi obejmują one znacznie szerszy zakres opracowywanych danych (prawdopodobnie cały zakres obszaru plastyczności), dają one znacznie lepszy pogląd na analizowane procesy.

Kolejnym problemem wymagającym wyjaśnień jest także zestaw rysunków 53 i 54. Autor mówi tu o bifurkacjach, ale nie tłumaczy, na czym polega bifurkacyjna interpretacja układów punktów tam pokazanych.

Na czym polega analogia wykresów na rysunkach 56 i 57 oraz 58 i 59? Dotyczą różnych zagadnień, rozciągania stali i równania logistycznego, między którymi nie została pokazana wzajemna relacja. Komentarza wymaga również stwierdzona tu przez Autora analogia kształtu. Bez komentarza pozostały bardzo interesujące wykresy autokorelacji danych w fazach sprężystej i plastycznej – rysunki 62-71. Ich interpretacja znacząco wzbogaciłaby pracę. Interpretacja tych relacji te mogłaby pomóc Autorowi uzasadnić występowanie lub nie chaosu w badanych danych.

Nie jest przekonująca interpretacja wyników pokazanych na rysunkach 73 i 74. Szczególnie pierwszy z nich nie przedstawia zamkniętej krzywej, a 12 pokazanych punktów nie dają dobrego uzasadnienia wzmiankowanej okresowości. Również przy przedstawieniu rysunków 75 do 80 na stronach 43 i 44, które w zamysle Autora prezentują *charakter nieliniowości związany z maszyną* brakuje choćby jednego zdania interpretacji! Wykresy pokazano w niejednolitej skali, co utrudnia interpretację, ale ich charakter jest dosyć jednoznaczny i czytelnikowi należy się ocena Autora.

Tak samo bez komentarza pozostawiono wszystkie wykresy dotyczące aktywności wulkanu Etna na stronach 45 i 46. Różnice widoczne są gołym okiem, ale gdzie interpretacja? Tym bardziej w kontekście stwierdzenia Autora w rozdziale 3, że *tego typu analiza może stanowić podstawę prognozowania np. erupcji wulkanów i trzęsień ziemi*, powinien on podać choćby wskazówki, jak takie przewidywanie mogłoby zostać zrealizowane. O ile mi wiadomo, najbardziej zaawansowane systemy ostrzegania na uskoku San Andreas są w stanie wygenerować ostrzeżenie liczone w jedynie minutach, opierając się o ciągle dostarczane dane z dokładnego systemu GPS. Czy Autor potrafi oszacować, jakiego rzędu czas można uzyskać stosując jego metodę? Brakuje tu bardzo wniosków Autora, które w dość oczywisty sposób mogą wynikać z ich oceny.

Rozdział 8 – Implementacja. Stwierdzenie Autora na stronie 48 mówi: *Efektywność metody zależy od nieliniowych odchyłek liniowej charakterystyki danych pomiarowych*. Brakuje tu jednoznacznego stwierdzenia, co jest źródłem nieliniowości w analizowanych przypadkach. Wykresy 91 do 95 dość dobrze pokazują ideę metody minimum entropii w odniesieniu do granicy sprężystości. Wartościowe są porównania z metodą klasyczną na rysunkach 96-98 i 100, demonstrując skuteczność metody.

Można dyskutować czy dyssypacja energii w przejściu od sprężystości do plastyczności jest tylko efektem tarcia, gdyż entropia jako obliczana wartość jest elementem wynikającym z wpływu wszystkich czynników, a nie wyłącznie tarcia, na dodatek w trakcie przejścia następuje zrywanie więzi międzycząsteczkowych i radykalna zmiana stanu systemu.

Ciekawym byłoby porównanie danych wygładzonych za pomocą choćby ruchomej średniej z dodanym sztucznie wygenerowanym szumem, nawet o wartościach większych niż fluktuacje pomiaru. Być może entropia wyliczana z tak utworzonego szeregu będzie taka sama/znacząco

inna (?), niż pokazana w pracy. Mogłoby stanowić to przekonujące uzasadnienie wartości metody.

Rysunki 110 do 112 wyraźnie potwierdzają skuteczność metody. Wartościowe są wykresy 113 do 124, na których pokazano wpływ elementów będących parametrami analizy w sensie ilości branych pod uwagę punktów i długości przedziałów, choć i tutaj brak jednoznacznego wniosku, jak dobierać te wartości. Jak wynika ze stwierdzenia na stronie 67, wszystko zależy od intuicji i doświadczenia operatora.

Prezentacja danych sejsmicznych w części 8.5 także nie jest wsparta komentarzem, a jedynie postulatem. I tutaj kilka zdań oceny znakomicie wzbogaciłyby pracę.

Analizując pokazane na koniec Wnioski wydaje się, że przynajmniej część z nich powinna być już pokazana wcześniej w różnych częściach pracy spełniając wcześniejsze postulaty recenzenta. Wątpliwość budzi stwierdzenie *pojawiający się chaos ma charakter bifurkacji* – to zdanie Autor powinien przemyśleć. W świetle wniosku 4, że: *dominująco stwierdza się zachowania cykliczne* brzmi wcześniejsze stwierdzenie tym bardziej zastanawiająco. Brak jednoznacznego potwierdzenia, że: *wyraźny spadek wartości entropii na granicy plastyczności spowodowany jest ... fluktuacjami związanymi z występowaniem chaosu deterministycznego*. Można zgodzić się z wnioskami 6 i 7, które dotyczą bezpośrednio wartości metody. Stwierdzenia 8 i 9 mają wysoki poziom ogólności i niekoniecznie mają pełne potwierdzenie w pracy.

3. KONKLUZJA

Podsumowując – praca ma kilka słabych punktów, które wymienione zostały powyżej. Przy pewnym nakładzie pracy, co najmniej wnioski i komentarze mogłyby znacząco podnieść jej wartość. Proponowana metoda poparta porównaniami z metodą klasyczną wydaje się być krokiem rozwijającym zastosowania rozwiązań teoretycznych w praktyce. Analiza danych wytrzymałościowych jest niespotykanym do tej pory podejściem i wysiłek Autora w tym względzie należy docenić. Gdyby udało się jeszcze wskazać drogę przewidywania zjawisk w sejsmologii wówczas byłoby to krokiem milowym w tej dziedzinie. Pierwszy został wykonany. Oceniając zawartość recenzowanej pracy można sformułować następujący wniosek.

Uważam, że w świetle obowiązującej ustawy spełniająca wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (art. 17 ust. 1 Dz. U. nr 65/03 poz. 595), przedłożona rozprawa stanowi podstawę merytoryczną do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych Wyjaśnienia wątpliwości i pytań sugerowanych wcześniej oczekiwałbym od Autora w formie komentarzy, ocen i propozycji, które zostaną przedyskutowane podczas obrony.

Powyższe względy skłaniają mnie do postawienia wniosku o dopuszczenie magistra inżyniera Grzegorza Garbacza do przeprowadzenia rozprawy doktorskiej.

Grzegorz Garbacz