

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY  
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na  
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
**mgr. inż. Daniela PIĘTAKA**

która odbędzie się w dniu 2 września 2021 roku o godzinie 10.30 w trybie  
zdalnym na platformie MS Teams\*.

Temat rozprawy doktorskiej:

**„ Metoda oceny jakości wyników eksperymentów wzbudzeń kulombowskich z wykorzystaniem algorytmu genetycznego ”**

Promotor : dr hab. inż. Piotr Bilski - Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Jarosław Kurek – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski – Instytut Badań Systemowych PAN w Warszawie

prof. dr hab. Krzysztof Rusek – Uniwersytet Warszawski

\* Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: [t.gambin@ii.pw.edu.pl](mailto:t.gambin@ii.pw.edu.pl) w dniu obrony do godz. 9:30. Transmisja będzie również dostępna poprzez kanał Youtube: <https://youtu.be/DhnL1M4bDps> (łącznie zapasowe, do użycia w warunkach awaryjnych: <https://youtu.be/Ve4CXTj-gGo>).

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelnicy Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej : <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Daniel-Pietak>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej  
**dr hab. inż. Jarosław Arabas**

## **STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ mgr. inż. DANIELA PIĘTAKA**

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiono Metodę AH – nową heurystyczną procedurę szacowania niepewności wartości parametrów, wyznaczanych w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich. Analiza kształtu optymalizowanej funkcji celu wokół znalezionej wartości optymalnej odbywa się jedynie w oparciu o próbkowanie przestrzeni zebrane podczas procesu przeszukiwania algorytmem genetycznym. Do jej wykonania nie są potrzebne żadne dodatkowe wywołania funkcji celu.

Stanowiący część Metody AH, autorski algorytm FLA (ang. Front-Line Algorithm) wskazuje te punkty z repozytorium próbkowania przestrzeni algorytmem genetycznym, które leżą najbliżej miejsca przecięcia powierzchni funkcji celu z płaszczyzną progową, dla której ma być przeprowadzona estymacja niepewności parametrów.

Metoda AH została opracowana do oceny jakości wyników pomiarów wzbudzeń kulombowskich (COULEX) – eksperymentalnej techniki badania elektromagnetycznej struktury jąder atomowych. Może być potencjalnie zastosowana również do innych problemów programowania nieliniowego, w których konieczna jest aproksymacja kształtu funkcji celu wokół znalezionej wartości optimum.

***KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIE DLA RADY  
NAUKOWEJ DISCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ***

**Tytuł rozprawy: Metoda oceny jakości wyników eksperymentów wzbudzeń kulombowskich z wykorzystaniem algorytmu genetycznego.**

**Autor rozprawy: mgr inż. Daniel Andrzej Pięta**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zaproponowanej autorskiej metody heurystycznej szacowania niepewności wartości parametrów, wyznaczanych w eksperymentach wzbudzeń kulombowskich. Praca ma charakter doświadczalny tj. autor rozprawy zaprojektował nową metodę oceny jakości wyników uzyskiwanych w eksperymentach fizyki jądrowej, a następnie ją zaimplementował i przetestował.

Praca liczy 191 stron i składa się z 7 rozdziałów, dwóch dodatków i bibliografii.

Rozdział pierwszy to wstęp, w którym autor rozprawy opisuje co jest przedmiotem niniejszej rozprawy.

W rozdziale drugim autor rozprawy wprowadza do tematyki wzbudzeń kulombowskich, jako techniki badania kształtu jądra atomowego, odwołując się przy tym do aktualnego stanu wiedzy.

W rozdziale trzecim przedstawiono zastosowaną technikę optymalizacji, czyli wyznaczanie wartości elementów macierzowych za pomocą algorytmu genetycznego i programu JACOB, realizujący zadanie optymalizacji.

W rozdziale czwartym znajdują się opis modułu przetwarzania wstępnego oraz modułu analizy próbkowania przestrzeni optymalizacyjnej.

W rozdziale piątym autor rozprawy przedstawia estymację niepewności parametrów dla zadanej płaszczyzny progowej. Dodatkowo został zaprezentowany schemat proponowanego algorytmu.

W rozdziale szóstym znajdują się opis zastosowanej metody AH do wyznaczania niepewności w analizie danych z pomiaru wzbudzenia kulombowskiego.

W ostatnim rozdziale siódmym autor rozprawy podsumowuje zalety i wady proponowanego rozwiązania oraz propozycje przyszłych badań.

Cel i teza pracy zostały jasno sformułowane (dotyczą możliwości oszacowania niepewności wyznaczania wartości elementów macierzowych w analizie danych z pomiarów wzbudzeń kulombowskich w oparciu jedynie o próbkowanie przestrzeni rozwiązań przez algorytm genetyczny). Praca ma znaczenie praktyczne. Podjęte badania stanowią istotny wkład w kierunku zastosowania algorytmów heurystycznych i szeroko pojętej informatyki technicznej we wspomaganiu i przyspieszaniu obliczeń w eksperymentach fizyki jądrowej.

W ramach głównych osiągnięć autora rozprawy można zaliczyć m.in.:

- zastosowanie techniki optymalizacyjnej w postaci algorytmu genetycznego w wyznaczaniu wartości elementów macierzowych w eksperymentach fizyki jądrowej,
  - zastosowanie algorytmu genetycznego do próbkowania przestrzeni optymalizacyjnej,
  - opracowanie i zastosowanie autorskiej heurystycznej metody AH do estymacji niepewności wartości parametrów w eksperymentach fizyki jądrowej.
2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W pracy wykonano dość rzetelny przegląd literatury, świadczący o rozległej wiedzy w ramach podejmowanego zagadnienia, także w odniesieniu do tematów pokrewnych. Literatura zawiera 137 pozycji, generalnie trafnie dobranych i poprawnie cytowanych. Wnioski wysnuwane są w sposób klarowny i przejrzysty. Należy zauważyć, że niniejsza rozprawa jest kontynuacją pracy dyplomowej złożonej na Politechnice Warszawskiej w 2008 roku. Temat pracy dyplomowej to „Implementacja algorytmu genetycznego do analizy danych z pomiarów wzbudzeń kulombowskich” (poz. 87 literatury). Ponadto warto dodać, iż bibliografia zawiera 10 publikacji autora rozprawy, 2 wystąpienia, 5 posterów, 9 publikacji w corocznych raportach, 1 publikacja popularno-naukowa na stronie internetowej, 1 wystąpienie na seminarium, 1 praca dyplomowa. Niestety wadą autora rozprawy jest brak aktywności publikacyjnej w bieżącej dekadzie. Niestety wszystkie publikacyjne aktywności autora rozprawy na arenie krajowej i międzynarodowej pochodzą z lat 2007-2011. Dodatkową wadą jest brak jakiegokolwiek publikacji z dyscypliny (informatyka techniczna i telekomunikacja), w której autor rozprawy próbuje uzyskać stopień doktora.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Podjęte zagadnienia w pracy rozwiązywane są przy wykorzystaniu podejść łączących wiedzę z trzech obszarów: informatyki, fizyki i statystyki matematycznej. Praca generalnie poprawnie wykonana pod kątem metodologicznym. Postawiony cel pracy zostały należycie osiągnięty. Wnioski generalnie zostały poparte przemawiającymi argumentami.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Praca przedstawia oryginalne i unikatowe podejście w postaci zastosowania techniki optymalizacyjnej w formie algorytmu genetycznego w wyznaczaniu wartości elementów macierzowych w eksperymentach fizyki jądrowej, a także zastosowanie algorytmu genetycznego do próbkowania przestrzeni optymalizacyjnej. Natomiast główny samodzielny i oryginalny dorobek autora rozprawy to opracowanie i zastosowanie autorskiej heurystycznej metody AH do estymacji niepewności wartości parametrów w eksperymentach fizyki jądrowej.



5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Generalnie zastosowany aparat badawczy jest adekwatny do poruszanego zagadnienia. Wnioski wysnuwane w pracy są zrozumiałe, poparte odpowiednią analizą. Praca poprawna w zakresie edytorsko – językowym.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Oprócz niewątpliwych zalet sygnalizowanych w pozostałych punktach, praca w moim przekonaniu posiada także wady. W pracy jako benchmark nowej proponowanej metody wykorzystano jedynie oprogramowanie GOSIA. Autor rozprawy nie zweryfikował innych dostępnych pakietów oprogramowania chociażby popularną bibliotekę z CERNu - Minuit do poszukiwania optimum funkcji i analizy błędów. Dodatkowo w pracy brak jest porównania z metodami alternatywnymi chociażby takich jak Markov Chain Monte Carlo (MCMC), sieci neuronowe, czy też popularne obecnie metody uczenia głębokiego w trybie regresji.

Oprócz niewątpliwych zalet sygnalizowanych w pozostałych punktach, praca posiada także fragmenty, co których można by pokusić się o ich dalsze dopracowanie.

Przykładowo:

1. Strona 17: Rysunek 2.2 – schemat stanowiska pomiarowego, nie powinien być umieszczony w tak niskiej jakości, niemal nie da się z niego odczytać opisanych elementów rysunku.
2. Strona 21: Nie podano uzasadnienia zwiększenia minimalnej wartości testu  $\chi$  do 3:  
$$\min(\chi^2(ME)) \in (0, 3)$$
3. Strona 23: jako benchmark wykorzystano narzędzie GOSIA, którego ostatnia aktualizacja była w 11 lat temu (24 czerwiec 2010). Wydaje się rozsądne porównanie wyników z nowszym narzędziem i ciągle utrzymywanym takim jak chociażby MINUIT2 z projektem ROOT z CERN, którego ostatnia aktualizacja była w 2021 roku (2021-04-14).
4. Strona 25: Brak dostatecznej precyzji, program GOSIA powstał ponad 40 lat temu. Pierwsza ręcznie napisana instrukcja do programu GOSIA to 3 listopada 1980 r.
5. Strona 26: Wykorzystanie programu GOSIA jako „czarnej skrzynki” do wyznaczania wartości  $\chi^2$ , bez porównania z innymi programami, które dalej są utrzymywane i których struktura pozwala wydzielenie modułów lub skorzystanie z API i własnego kodu wydaje się niezasadne. Możliwe, że na tym etapie można by było polepszyć wyniki podejmowanych prac.
6. Strona 32: Autor w tabeli 3.1 porównuje 2 podejścia: podejście ewolucyjne i metoda gradientowa. Jednak nie uwzględnił obecnie używanego i testowanego w literaturze podejścia hybrydowego, czyli połączenia tych dwóch metod razem. W literaturze tego typu podejścia wykazują jeszcze lepszą dokładność i wydajność rozwiązania. W najprostszym podejściu metody hybrydowej można by użyć algorytmu genetycznego aby zbliżyć się do optymalnego rozwiązania, poprzez wygenerowanie niewielkiej liczby pokoleń, a następnie użyć rozwiązania zaproponowanego przez algorytm genetyczny jako punktu początkowego dla metody gradientowej aby przeprowadzić dokładniejsze wyszukiwanie lokalne. Dodatkowo warto by było przetestować i porównać metodę obecnie dość popularną: optymalizacja za pomocą roju cząstek (ang. Particle Swarm Optimization), którą traktuje się

*by*

jako alternatywę dla algorytmu genetycznego, a także połączenia hybrydowego z połączenia obu metod.

7. Strona 59: Program Jacob został napisany ponad 10 lat temu jako nakładka graficzna dla biblioteki GeneticAlgorithm.dll. Można domniemywać, że zarówno wspomniana biblioteka jak i sam program nie został od tamtego czasu zmodyfikowany, co niesie za sobą konsekwencje braku wykorzystania lub porównania najnowszych metod optymalizacyjnych wspomnianych w punkcie powyższym. Wydaje się być prawdopodobne, że w ocenianej rozprawie doktorskiej wykorzystano aplikację napisaną dekadę temu, bez uwzględnienia najnowszych metod stosowanych i proponowanych obecnie w literaturze.
8. Strona 64: Autor wspomina, że względu na międzynarodowy charakter użytkowników autorskiej Metody AH, nazwy etapów zostały podane w języku angielskim. Należy zauważyć, że autor nie ma żadnej publikacji w bieżącej dekadzie, a co za tym idzie, wydaje się, że zasadne stwierdzić że zaproponowana Metoda AH może być nawet nieznaną, nierozpowszechnioną w środowisku polskim, gdyż nawet nie została opublikowana lokalnie w Polsce.
9. Strona 131: Autor wspomina, że łączny czas obliczeń wyniósł 128h, ale na jakim sprzęcie /jakie parametry sprzętu ? – brak precyzji
10. Strona 133: Na jakiej podstawie przyjęto minimalną liczbę klastrów  $K=100$ , czy były wykonywane jakieś testy z inną minimalną liczbą klastrów ?

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca przedstawia nowatorskie podejście, pomocne w ocenie jakości wyników z eksperymentów fizyki jądrowej. Ma znaczenie praktyczne. Podjęta tematyka zasługuje na kolejne badania (kontynuacje).

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

~~a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~

~~b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~

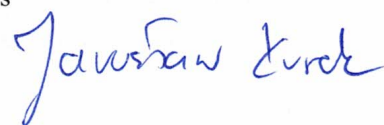
c/ spełniająca wymagania

~~d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem~~

~~e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

Finalnie, konkludując, stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane przez „art. 179 ust.2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669) w związku art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora” na stopień doktora i wnoszę i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

podpis





miejsce pracy: Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów, Uniwersytet Warszawski

***KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIE DLA RADY  
NAUKOWE DISCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ***

**Tytuł rozprawy: Metoda oceny jakości wyników eksperymentów wzbudzeń kulombowskich z wykorzystaniem algorytmu genetycznego**

**Autor rozprawy: mgr inż. Daniel Andrzej Pięta**

**1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Autor podjął się rozwiązania ważnego zagadnienia, związanego z oszacowaniem niepewności wyników pomiarów prowadzonych w dziedzinie fizyka, specjalności fizyka jądrowa, a dotyczących własności elektromagnetycznych jąder atomowych. Praca ma charakter teoretyczny, ale z ważnym aspektem zastosowania w konkretnych badaniach. Do oszacowania niepewności autor posłużył się autorską metodą AH, która w oparciu o wyniki dostarczone przez algorytm genetyczny poszukujący minimum funkcji  $\chi^2$  na dużej przestrzeni możliwych rozwiązań, przy okazji bada przestrzeń rozwiązań zbliżonych do znalezionej minimum i na podstawie przyjętych kryteriów pozwala wyznaczyć niepewności.

Tezy pracy są jasno sformułowane:

1. Możliwe jest oszacowanie niepewności wyznaczenia wartości elementów macierzowych w analizie danych z pomiarów wzbudzeń kulombowskich w oparciu jedynie o próbkowanie przestrzeni rozwiązań przez algorytm genetyczny

2. Dokładność wyznaczenia niepewności przedstawioną metodą AH jest porównywalna z innymi metodami wykorzystującymi do estymacji niepewności wartości parametrów, a czas niezbędny do wykonania obliczeń jest znacząco krótszy.

W fizyce, a w szczególności fizyce jądrowej bezpośredni pomiar danej wielkości fizycznej często nie jest możliwy. Jądro atomowe to układ nukleonów, który może się znajdować w wielu stanach energetycznych, o różnych rozkładach ładunku elektrycznego. Emisja promieniowania gamma z jednego ze stanów jest bezpośrednio mierzona w eksperymencie, ale jej intensywność zależy od wielu innych podobnych przejść, jak też od kształtów rozkładu ładunku tych stanów. Tak więc analiza widma promieniowania gamma emitowanego przez wzbudzone jądro atomowe musi być prowadzona kompleksowo, uwzględniając schemat jego poziomów energetycznych. Taką możliwość dostarcza program GOSIA stworzony przed kilkadziesiąt laty przez dr hab. T. Czosnykę, dr D. Cline i dr Ching-Yen Wu, znajdujący minimum wieloparametrycznej funkcji  $\chi^2$ . Program ten jest używany w wielu laboratoriach na świecie, stąd też podjęcie się jego modernizacji jest w mojej opinii bardzo ważne dla całego międzynarodowego środowiska naukowców badających rozkłady pól elektromagnetycznych jąder atomowych.



**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Autor dogłębnie zapoznał się z czekającym go zadaniem uczestnicząc w pracach grupy fizyków jądrowych prowadzących badania eksperymentalne i wykorzystujących program GOSIA. W spisie publikacji można znaleźć prace poświęcone własnościom elektromagnetycznym jąder atomowych, których pan Pięta jest współautorem. Są wśród nich bardzo ważne pozycje jak np. praca poświęcona izotopowi molibdenu i opublikowana w Physical Review C (nr 32). Spis liczy aż 137 pozycji. Ich dobór świadczy o dobrej orientacji autora we wszystkich zagadnieniach związanych z pracą.

**3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Pan Pięta postawił sobie za cel zbudowanie narzędzia, które pozwoli fizykom zajmującym się badaniami doświadczalnymi własności elektromagnetycznych jąder atomowych na efektywną analizę wyników pomiarów. Pierwszym etapem była jego praca magisterska, w której moduł programu GOSIA poszukujący minimum funkcji  $\chi^2$  (a więc wartości wielkości fizycznych opisujących własności pola elektromagnetycznego badanego izotopu) zastąpił nowoczesnym, bardziej efektywnym modułem wykorzystującym algorytm genetyczny (program JACOB swego autorstwa). Praca doktorska jest drugim etapem modernizacji programu GOSIA, który tym razem został uzupełniony modułem wyznaczającym niepewności pomiarowe wyznaczonych wcześniej wielkości fizycznych (program ScanRep swego autorstwa).

Głównym zagadnieniem do rozwiązania w pracy doktorskiej było stworzenie metody AH a następnie budowa programu ScanRep, szacującym niepewności pomiarowe w oparciu o wyniki uzyskane podczas procesu poszukiwania minimum funkcji  $\chi^2$ . Metoda pozwalająca na oszacowanie niepewności opisana jest w rozdziałach 4 i 5 pracy doktorskiej. Doktorant w przekonujący sposób uzasadnia jej wybór opierając się na informacjach zaczerpniętych z literatury, jak też przedstawia szeroką dyskusję przyjętych w niej założeń.

Metoda AH składa się z ośmiu etapów zgrupowanych w trzech modułach. W module wstępnego przetwarzania wybiera się punkty wokół znalezionych wcześniej minimów, próbując całą przestrzeń algorytmem genetycznym i odcinając punkty o zbyt wysokich wartościach. Następnie dalej ogranicza się ilość punktów definiując maksymalną ich gęstość i dokonuje ich grupowania wokół znalezionych minimów. Pozwala to na wyodrębnienie zbioru punktów leżących wokół głównego minimum. Zbiór ten poddawany jest analizie statystycznej co pozwala na ocenę jego jakości (moduł „analiza próbkowania”). Ostatni z modułów służy do wyznaczenia niepewności korzystając z zadanego poziomu ufności i metody najmniejszych kwadratów.

Działanie metody AH przedstawione jest bardzo poglądowo na przykładzie przypadku testowego, z licznymi ilustracjami wyników cząstkowych, a jej schemat zawiera tabela na stronie 128.

W metodzie AH doktorant wykorzystuje określone techniki rozwiązywania danego problemu, odwołując się do literatury. Z pewnością można te problemy rozwiązywać inaczej, jednak końcowy rezultat potwierdza poprawność wyboru dokonanego przez mgr Pięta.

**4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

W wyniku podjętych prac powstał system efektywnej analizy danych doświadczalnych,



znacznie rozszerzający możliwości programu GOSIA. Korzystając z programu GOSIA wyznaczono dotychczas własności elektromagnetyczne wielu izotopów, publikując wyniki w najbardziej prestiżowych periodykach naukowych, włączając NATURE. Mimo, że GOSIA pozostaje w użytkowaniu w wielu światowych laboratoriach przez ponad 30 lat, nikt dotąd nie dokonał tak radykalnego rozwinięcia tego programu.

Jak wspomniałem wyżej, autor rozprawy doktorskiej stworzył system analizy danych doświadczalnych, w którym program GOSIA jest tylko jednym z elementów. System opiera się na stworzonej przez autora metodzie AH wykorzystującej szereg programów komputerowych napisanych przez doktoranta. Powstało narzędzie do analizy danych bardziej doskonałe niż GOSIA, które bez wątpienia będzie stosowane w wielu laboratoriach fizyki jądrowej na świecie.

### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Rozprawa doktorska liczy prawie 200 stron, na których autor w sposób bardzo przejrzysty, bardzo ładną polszczyzną, przedstawia wyniki swojej pracy. Znalezienie błędu językowego w tej rozprawie nie jest łatwe. Wymienię tylko jeden - na stronie 24 nazwisko prof. Rohozińskiego napisane jest z błędem.

Opisując metodę wzbudzeń kulombowskich stosowaną w eksperymentach fizyki jądrowej mgr Piętań robi to bardzo pogładowo, z znajomością rzeczy, potwierdzając tym samym swój czynny udział w tych badaniach. Szeroką dyskusję nad przyjętymi metodami numerycznymi i nad wynikami ich zastosowania zawsze poprzedza krótki wstęp, co pozwala czytelnikowi o niekoniecznie informatycznym wykształceniu zorientować się w prowadzonych pracach. Autor posługuje się przykładami, by zilustrować wyniki. Tekst uzupełniają liczne rysunki i tabele. Na końcu, oprócz zwięzłego podsumowania, autor przedstawia możliwe kierunki dalszych działań, a także jasno odpowiada na pytanie, czy tezy postawione we wstępie zostały w wyniku podjętych działań zrealizowane. Pracę kończą dodatki zawierające szczegóły stworzonych programów oraz ich wzajemnej komunikacji.

### **6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Zilustrowanie wyników rozprawy przykładami to jej zaleta. Jednak przykład przedstawiony w rozdziale 6, ilustrującym zastosowanie metody AH do analizy rzeczywistych danych doświadczalnych uzyskanych w eksperymencie przeprowadzonym metodą wzbudzeń kulombowskich, pozostawia niedosyt. Mianowicie, zastosowanie stworzonego narzędzia do analizy danych dotyczących izotopu  $^{132}\text{Ba}$  doprowadziło do dwóch równorzędnych rozwiązań, o bardzo zbliżonych wartościach funkcji  $\chi^2$ . Dokładniejsze przyjrzenie się wyznaczonym wartościom wielkości fizycznych pokazuje jednak, że są to wartości czasami bardzo różne. Brakuje mi w tym miejscu komentarza autora, zaznajomionego przecież z eksperymentami z fizyki jądrowej, jak te dwa rezultaty traktować z punktu widzenia fizyka - eksperymentatora.

Brakuje mi w tym miejscu także profesjonalnego potraktowania wielkości fizycznych – doktorant nie podaje jednostek, nie tłumaczy, dlaczego przyjęto przedstawione w tabeli 6.1 takie właśnie zakresy zmienności tych wielkości.

Jeszcze bardziej dokuczliwym jest brak porównania wyników uzyskanych metodą AH z wynikami uzyskanymi programem GOSIA. Takie porównanie byłoby najlepszym potwierdzeniem drugiej tezy pracy doktorskiej. Podczas publicznej obrony chętnie usłyszę od autora dlaczego takiego porównania nie przedstawił.

Jak napisałem, rozprawa jest napisana dobrą polszczyzną, bez nadużywania żargonu typowego dla fizyków czy też informatyków, co jest jej zaletą. Jednak zbudowane przez autora narzędzie znajdzie



także zastosowanie w laboratoriach zagranicznych. Język polski będzie tu więc przeszkodą. Mam nadzieję, że instrukcja użytkownika zbudowanego systemu analizy danych będzie napisana w języku angielskim i w ten sposób ta „wada” zostanie zniwelowana.

#### **7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?**

W wyniku rozprawy powstało narzędzie, które znajdzie zastosowanie w badaniach podstawowych z dziedziny fizyki, specjalności fizyka jądrowa. Narzędzie to program ScanRep, będący rozwinięciem programu GOSIA, znanego i używanego w wielu laboratoriach, stad też będzie miało ono z pewnością szerokie i międzynarodowe zastosowanie. Autor planuje rozwijanie programu ScanRep i uzupełnienie go o graficzny interfejs użytkownika. Program będzie jeszcze jednym polskim wkładem do metody wzbudzeń kulombowskich, powszechnie stosowanej w pomiarach własności elektromagnetycznych jąder atomowych.

#### **8. Do której kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

**a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy**

**b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania**

**c/ spełniająca wymagania**

**d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem**

**e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

Przedmiotem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z uzyskiwaniem wiarygodnych wielkości fizycznych określających rozkłady pola elektromagnetycznego dowolnych izotopów, z eksperymentów wykorzystujących technikę wzbudzeń kulombowskich. Autor pokazał, że można oszacować niepewności wyznaczenia tych wielkości posługując się algorytmem genetycznym. Pokazał też, że czas wykonywania obliczeń jest krótszy niż w przypadku stosowanego dotąd programu GOSIA. W rozprawie nie przedstawił szczegółowego porównania uzyskanych wyników z wynikami programu GOSIA, jednak z seminarium wygłoszonego kilka miesięcy temu na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego przez dr Pawła Napiorkowskiego wiem, że to porównanie wypada korzystnie. Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia z nadmiarem wymagania stawiane w ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku.



**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr. inż. Daniela Andrzeja Piętaka**

**Metoda oceny jakości wyników eksperymentów wzbudzeń kulombowskich z wykorzystaniem algorytmu genetycznego**

**1. Tematyka rozprawy**

Tematyka rozprawy jest związana z wyznaczaniem parametrów modelu systemu na podstawie pomiarów sygnałów zebranych w trakcie jego obserwacji. Pomimo długiej historii, zagadnienie to sprawia nadal sporo kłopotów w wielu praktycznych przypadkach, w których znajomość modelu jest potrzebna na przykład do optymalizacji, sterowania, czy podejmowania decyzji. Estymacja parametrów modeli jest także używana do wyznaczenia wartości parametrów o znaczeniu fizycznym i może być traktowana jako specyficzna metoda pomiarowa, gdy bezpośredni ich pomiar nie jest możliwy, tak jak w problemie rozważanym w rozprawie. Ze względu na liczne zastosowania tematyka ta jest nadal żywa i obecna w prowadzonych badaniach i publikacjach.

Tematem rozprawy jest estymacja parametrów modeli wzbudzeń kulombowskich oraz oszacowania niepewności uzyskanych ocen parametrów. Pomiary wzbudzeń kulombowskich są eksperymentalną techniką badania elektromagnetycznej struktury jąder atomowych. Nie jestem fizykiem i nie jestem w stanie wypowiadać się w sprawach modeli rozpraszania jąder atomowych wiązki bombardującej tarczę w cyklotronie. W rozprawie są podane tylko podstawowe zależności, z których trudno się zorientować, jak wygląda model i jak mają się do niego mierzone zmienne. Doktorant do obliczania wartości modelu skorzystał z programu GOSIA (program kanałów sprzężonych z minimalizacją najmniejszych kwadratów), którego twórcami byli w latach 1980-tych T. Czosnyka, D. Cline i C. Y. Wu. W rozprawie model jest traktowany właściwie jako czarna skrzynka. W programie GOSIA, jak wynika z pełnej nazwy, przeprowadza się estymację parametrów modelu metodą nieliniowych najmniejszych kwadratów (regresji nieliniowej) i szacuje ich niepewności. Jest to narzędzie powszechnie (i jak odnoszę z lektury rozprawy może nawet jedyne?) stosowane do analizy danych z eksperymentów kulombowskich. W programie GOSIA do optymalizacji używa się metody gradientowej, dosyć typowej dla lat 1980-tych. W rozprawie nie wyjaśniono, jak w programie GOSIA szacuje się niepewności ocen parametrów. Natomiast do określenia obszaru niepewności w rozprawie skorzystano z możliwości wyznaczenia tego obszaru przez odcięcie wartości statystyki chi kwadrat przez odpowiednią hiperpłaszczyznę krytyczną, ortogonalną do wektora osi wartości statystyki (i jego rzut na przestrzeń parametrów).

## 2. Cel i zakres rozprawy

W rozprawie zastosowano nowszą metodę optymalizacji niż w programie GOSIA, lepiej radzącą sobie z wielomodalnością optymalizowanej funkcji. Lokalne optima to jedna z częściej spotykanych trudności w stosowaniu nieliniowej metody najmniejszych kwadratów, sygnalizowana już w latach 50-tych, a szerzej w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku. Wprowadzenie metaheurystyk spowodowało duży postęp w efektywnej optymalizacji takich funkcji. Doktorant wybrał jako metodę optymalizacji chyba najwcześniej rozpowszechnioną metaheurystykę – algorytm genetyczny.

Do wyznaczenia przedziałów ufności ocen parametrów uzyskanych w wyniku minimalizacji wskaźnika jakości doktorant zaproponował wykorzystanie repozytorium zbioru punktów uzyskanych w trakcie działania algorytmu genetycznego stosując wspomniany powyżej pomysł oparty na teście chi kwadrat. Jest to metoda nieparametryczna, która bazuje na wyszukaniu punktów najbliższych hiperpowierzchni przecięcia statystyki chi kwadrat przez odpowiednią hiperpowierzchnię.

W literaturze przedstawiano przykłady numerycznego wyznaczania obszarów ufności dla prostych modeli nieliniowych, w których powierzchnie, a raczej na ogół krzywe na płaszczyznach, mają kształty daleko odbiegające od elipsoidy. Długie czasy obliczeń istotnie utrudniają uzyskanie takich wyników dla bardziej skomplikowanych modeli. Opracowanie metody pozwalającej wyznaczyć efektywnie taką hiperpowierzchnię dla skomplikowanych modeli z wieloma parametrami należałoby uznać za istotny wkład w praktyczne rozwiązanie tego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie pomysł umożliwia przeprowadzenie szybkich obliczeń w celu efektywnego wyznaczania hiperpowierzchni ograniczających obszar ufności. Doktorant był bliski wyznaczenia takich obszarów dla prostszego przypadku testowego (patrz rys.5.6 – 5.17), ale w punkcie 5.3 opisującym estymację niepewności parametrów i w przykładzie rzeczywistym ograniczył się do wyznaczania tylko przedziałów ufności ocen parametrów, a więc tylko do kilkunastu punktów hiperpowierzchni. Jest to z pewnością samo w sobie osiągnięcie, które pozwala na szybkie obliczenie przedziałów ufności i do tego nie wymagające obliczania dodatkowych wartości statystyki chi kwadrat. Ten sposób postępowania jest też bardzo łatwo przenieść na przypadek ogólny wyznaczania dowolnych punktów na hiperpłaszczyźnie ograniczającej obszar ufności.

Doktorant przygotował oprogramowanie do wyznaczania przedziałów ufności i policzył jeden przykład symulacyjny ze znanym rozwiązaniem oraz jeden przykład rzeczywisty, w którym są użyte pomiary z eksperymentu wykonanego w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego.

## 3. Oryginalność rozprawy

Oryginalnością rozprawy jest użycie nowej metody do szacowania niepewności estymowanych ocen parametrów modelu w modelach wzbudzeń kulombowskich. Postęp w metodologii, który nastąpił w ciągu ostatnich czterdziestu lat, całkowicie motywuje zastosowanie nowych metod estymacji parametrów tego modelu. Szacowanie niepewności ocen parametrów jest kontynuacją pomysłu użycia tej nowej metody – algorytmu genetycznego. Nie jestem w stanie precyzyjnie ocenić rzeczywistego znaczenia tego aspektu rozprawy dla fizyków, niemniej jednak zadanie to wydaje mi się być istotne dla związanych z tym modelem badań eksperymentalnych.

Pomysł estymacji parametrów został właściwie po raz pierwszy sformułowany w szeroko rozumianych badaniach fizycznych, a mianowicie w pomiarach astronomicznych, w których



duże niepewności pomiarów skłoniły Galileusza w traktacie z 1629 roku do sformułowania doktryny o wyborze takiej wartości poszukiwanej wielkości, która minimalizuje błędy pomiarów. Estymacja parametrów jest nadal ważnym narzędziem fizyki empirycznej. Jednak od mniej więcej wieku teoria budowy modeli matematycznych z użyciem danych empirycznych była chyba bardziej rozwijane w statystyce, ekonometrii, a następnie intensywnie w automatyce pod nazwą identyfikacja systemów. Od pewnego czasu podobne badania wchodzi też w zakres informatyki technicznej jako kierunek w obszarze uczenia maszynowego. Jak widać, badania tego typu, a w szczególności związane z praktycznymi zastosowaniami, mają charakter interdyscyplinarny, a między innymi są związane z dyscypliną „informatyka techniczna i telekomunikacja”, w której otwarty jest przewód. Do wyboru tej dyscypliny skłania też użyte narzędzie optymalizacji – algorytmy genetyczne, które są niewątpliwie głównie kojarzone z informatyką techniczną.

Po wielu latach rozwoju badań związanych z budową modeli matematycznych z użyciem danych empirycznych ustaliły się pewne zasady postępowania. Obejmują one takie zagadnienia jak analiza modelu, projektowanie eksperymentu i badanie jakości danych empirycznych (pod kątem dostatecznego pobudzenia modelu czy niezależności od czynników zewnętrznych), a po estymacji walidację uzyskanego modelu. Tezy rozprawy nie dotyczą całości powyższych zagadnień, a tylko jego fragmentu związanego z walidacją modelu, a dokładniej z szacowaniem niepewności ocen estymowanych parametrów. Niemniej jednak etapy budowy modelu są ze sobą mocno zazębiane, w takim sensie, że wyniki uzyskane w trakcie jednego etapu wpływają na postępowanie w innych etapach. Dlatego w rozprawie przydałoby się przynajmniej krótkie omówienie, co wiadomo o takich analizach i wyciągniętych z nich wnioskach dla rozpatrywanego modelu. Więcej uwag na ten temat umieściłem w następnym punkcie recenzji. Mimo że nie są one bezpośrednio związane z celem rozprawy, to być może takie uwagi od osoby patrzącej na zagadnienie od strony teorii systemów przyczynią się w dalszych badaniach do lepszego zrozumienia procesu budowy modelu i do uzyskania lepszej jakości uzyskiwanych ocen parametrów.

Ważną częścią zaproponowanego postępowania jest narzędzie użyte do optymalizacji, w tym przypadku jest to algorytm genetyczny. Algorytmy genetyczne są dobrze znane i tak szczegółowy ich opis, jak przedstawiony w pracy, nie jest potrzebny. Doktorant stosował to narzędzie już w swojej pracy magisterskiej z 2008 r. i pozostał przy nim w omawianej rozprawie. Tymczasem w tej klasie metod podobnie eksplorujących przestrzeń parametrów znacznie większe możliwości dają algorytmy ewolucyjne, w których opracowano wiele dodatkowych specjalizowanych operatorów w stosunku do algorytmów genetycznych. W szczególności rozwinięto w nich algorytmy wielomodalne, jak algorytmy niszowe czy wyspowe, właśnie przeznaczone do zadań takich, jak rozpatrywane w rozprawie. W rozprawie brakuje dyskusji i analizy wyboru narzędzia najbardziej pasującego do rozpatrywanego zagadnienia. Badania idące w tym kierunku byłyby przydatne w dalszym rozwoju omawianej metody.

Jednak, jak wynika z postawionych w rozprawie tez, za podstawowe osiągnięcie Doktorant uważa metodę szacowania niepewności ocen parametrów. Składa się ona z ośmiu etapów nazwanych literami od A do H i stąd zostało nazwane „metodą AH”. Są to następujące etapy. Etap A: utworzenie repozytorium punktów uzyskanych w trakcie optymalizacji; etap B: usunięcie z repozytorium punktów o zbyt dużych wartościach wskaźnika jakości; etap C: rozrzedzenie obszarów o zbyt gęstych punktach; etap D: klasteryzacja punktów w celu wyodrębnienia obszarów atrakcji (zwanych w rozprawie basenami przyciągania) poszczególnych optimów. Dalsze etapy postępowania są prowadzone osobno dla każdego wyodrębnionego obszaru atrakcji. Etap E: statystyka opisowa punktów w obszarze atrakcji; etap F: tworzenie histogramów; etap G: wyodrębnienie punktów najbliższych płaszczyźnie

progowej, odpowiadającej przyjętemu poziomowi ufności w teście chi kwadrat: etap H: wyznaczenie obszaru ufności oraz oszacowanie jego dokładności. Liczba tych etapów jest nazbyt rozbudowana i mogłaby być z powodzeniem zmniejszona przez połączenie niektórych z nich.

Według mojego rozeznania, pomysł zaprezentowanej metody jest nowy w sensie sposobu rozwiązania zadania. Wyznacza się w niej granice obszaru w sposób nieparametryczny poszukując punktów leżących poniżej, ale jak najbliżej płaszczyzny odcięcia. O znaczeniu tego podejścia wspomniałem w poprzednim punkcie recenzji. Jednak Doktorant w zasadzie nie przedstawił przeglądu i porównania zaproponowanej metody z innymi metodami, jak wyznaczanie punktów przecięcia hiperpłaszczyzny krytycznej z hiperpowierzchnią statystyki chi kwadrat numerycznymi metodami rozwiązywania odpowiednich równań algebraicznych, metody szacowania niepewności ocen parametrów oparte na wyznaczaniu macierzy kowariancji przez aproksymacje optymalizowanej funkcji w pobliżu punktu optymalnego, czy też oparte na gradientach, i nie przedyskutował ich wad i zalet, chociaż wspomina o istnieniu innych metod. Biorąc pod uwagę charakter pracy, szczególnie istotne byłoby porównanie nowej metody z metodą zastosowaną w programie GOSIA pod kątem trudności obliczeniowych oraz uzyskiwanych dokładności. W rezultacie, Czytelnik nie dowiaduje się w sposób bezpośredni z rozprawy, czy opracowana metoda ma zalety w stosunku do innych, typowo stosowanych metod, czy nie.

Warto może też wspomnieć o braku analizy właściwości statystycznych zaproponowanych estymatorów, czy analizy teoretycznej zaproponowanej metody. Zdaję sobie sprawę, że rozważania tego typu wymagają zaawansowanej znajomości teorii prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej, co może być dużym wyzwaniem dla rozprawy doktorskiej typu technicznego. Ale Doktorant nie wspomina o kierunku prac, reprezentowanym na przykład przez znany artykuł prof. J. Arabasa<sup>1</sup>, dotyczących estymacji rozkładu punktów w pobliżu optimum w algorytmach ewolucyjnych, co, jak mi się wydaje, powinno być przynajmniej zauważone w przeglądzie literatury rozprawy z tej tematyki, jeżeli już nie przyjęte jako podstawa głębszej teoretycznej analizy zadania, która mogłaby na przykład pomóc w lepszym wyborze współczynników w algorytmach ewolucyjnych.

Przechodząc do szerszej analizy bibliografii zamieszczonej w rozprawie, to prawie połowa wykazu literatury jest związana z rozdziałem 2 i obejmuje pozycje dotyczące wzbudzeń kulombowskich, a sporo pozycji literaturowych związanych z pozostałymi rozdziałami jest także napisana przez fizyków. Na tym tle literatura dotycząca pozostałych zagadnień jest mniej liczna. Jeżeli chodzi o pozycje związane z procedurą modelowania i walidacji modelu, to są to głównie książki Brandta oraz Boxa i Drapera. Obie te pozycje są dobrze znane i są nadal aktualne, szczególnie po zmianach w późniejszych wydaniach książki Brandta. Nowsza pozycja Tarantoli jest bardziej nastawiona na metody rozwiązywania. Oczywiście literatura w tej tematyce jest obfita, ale ten wybór nie jest zły, pomimo pominięcia pozycji ściśle poświęconych regresji nieliniowej, jak na przykład książki Gallanta<sup>2</sup> czy Sebera i Wilda<sup>3</sup>. Ale Doktorant chyba za mało uwagi poświęcił analizie metod walidacji modeli, a to zagadnienie jest dosyć istotne i bliskie tematowi rozprawy. Także literatura dotycząca ewolucyjnych metod optymalizacji zawiera podstawowe pozycje, ale Doktorant przeoczył tu algorytmy ewolucyjne i specjalizowane metody wielomodalne. A użycie metod wielomodalnych być może pozwoliłoby na zrezygnowanie z uciążliwej klasteryzacji w etapie D zaproponowanej

---

<sup>1</sup> J. Arabas (2012) Approximating the genetic diversity of populations in the quasi-equilibrium state. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 16(5):632-644, DOI: 10.1109/TEVC.2011.2166157

<sup>2</sup> A.R. Gallant (1987) *Nonlinear statistical models*. Wiley, New York.

<sup>3</sup> G.A.F. Seber, C.J. Wild (1989) *Nonlinear regression*. Wiley, New York.

w rozprawie metody. Warto może też ponownie podkreślić sygnalizowany wcześniej brak usystematyzowanych przeglądów niektórych zagadnień istotnych dla tematyki rozprawy.

Ustawa wymaga, aby kandydat na doktora wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w odpowiedniej dyscyplinie naukowej. Sprawdzenie ogólnej wiedzy w dyscyplinie odbywa się w trakcie egzaminu z dyscypliny oraz w czasie publicznej obrony. Ponieważ przypuszczam, że zakres materiału na egzaminie może raczej nie obejmować tematyki związanej z teorią estymacji i algorytmami ewolucyjnymi, to, aby wyjaśnić sygnalizowane w recenzji nie w pełni wyjaśnione kwestie i sformułowania, chciałbym, aby w czasie obrony Doktorant odpowiedział na następujące pytania:

- Co to są obszary ufności estymatorów parametrów modelu oraz jakie metody stosuje się do ich wyznaczania?
- Na jakich pomysłach są oparte wielomodalne algorytmy ewolucyjne?

#### 4. Szczegółowe uwagi krytyczne i dyskusyjne

Praca zawiera sporą liczbę wątpliwych lub nieprecyzyjnych sformułowań. Poniżej przedstawiam ich przykłady oraz inne uwagi dyskusyjne o charakterze bardziej technicznym. Zapis  $a^b$  oznacza stronę  $a$ ,  $b$ -ty wiersz od góry. Analogicznie,  $a_b$  oznacza stronę  $a$ ,  $b$ -ty wiersz od dołu.

**13, rozdział 2** W poprzednim punkcie recenzji wspomniałem o etapach postępowania przy budowie modelu z użyciem danych empirycznych. W rozprawie nie opisano modelu pod kątem takiego postępowania i nie podano, z jakim typem modelu mamy do czynienia: z modelem statycznym, równaniami różniczkowymi zwyczajnymi czy cząstkowymi, równaniami stochastycznymi? Odnoszę wrażenie, że model odpowiada dosyć skomplikowanej teorii fizycznej, więc może jest trudno opisać charakter tego modelu w prosty sposób dostępny dla laika w tej dziedzinie. Jednak informacja o typie modelu pozwala na pewną jakościową ocenę charakteru zadania estymacji. W rozprawie wspomina się o trudnościach występujących przy estymacji parametrów tego modelu: ‘uciążliwych parametrach’ i lokalnych minimach. Wydaje mi się, że warto wobec tego może wspomnieć o tym, jak wygląda to od strony teorii tworzenia modeli z udziałem danych eksperymentalnych. Zdaję sobie sprawę, że badania związane z modelowaniem eksperymentów wzbudzeń kulombowskich mają długą historię i związana z tym wiedza jest już na pewno duża. Mam jednak nieśmiałą nadzieję, że przedstawione niżej uwagi mogą nieco pomóc w zrozumieniu możliwych przyczyn występujących w nich trudności.

Zacznę od ‘uciążliwych parametrów’. Są to prawdopodobnie te parametry, które w teorii estymacji nazywa się statystycznie nieistotnymi. Chociaż w rozprawie nie przeprowadzono analizy istotności parametrów, to z oszacowań niepewności ocen parametrów w załączonym przykładzie estymacji z rzeczywistymi pomiarami widać, że niektóre parametry mają bardzo duże przedziały ufności, tak że ich oceny statystyczne są bardzo niepewne. W tradycyjnym podejściu regresji liniowej przyjmuje się, że nieistotne parametry są zerowe, co właściwie oznacza, że związana z nimi zmienne pomiarowe zbyt słabo wpływają na sygnał wyjściowy modelu i mogą być pominięte. Jednak w modelu fizycznym przyjęcie parametru za zerowy może nie być fizycznie uzasadnione, o czym pisze też Doktorant na stronie 106. Jednak z drugiej strony nieistotność parametrów jest wskazówką, że coś w procesie budowy modelu może nie być prawidłowe. Przyczyną nieistotności parametrów jest często to, że model jest nieidentyfikowalny parametrycznie przy zbieranych pomiarach. Nieidentyfikowalność parametryczna modelu oznacza, że nie da się wyznaczyć jednoznacznie (na ogół niektórych) jego parametrów nawet przy bezbłędnych sygnałach pomiarowych. Może to być związane z tym, że niektóre parametry są związane jakąś zależnością funkcyjną, która pojawia się

w modelu jako czynnik wspólny w oddziaływaniu na sygnał wyjściowy, na przykład wyjście modelu zależy od iloczynu dwóch parametrów. Zmiana jednego z nich może wtedy być skompensowana odpowiednią zmianą drugiego, tak aby iloczyn pozostał stały. W rezultacie w przestrzeni parametrów pojawi się podprzestrzeń, w tym przypadku płaszczyzna hiperboliczna, każdy punkt której jednakowo wpływa na wyjście modelu. Takich parametrów nie da się jednoznacznie wyznaczyć z pomiarów sygnałów wyjściowych. Tego typu fatalny przypadek nieidentyfikowalności będzie się objawiał nieistotnością estymowanych parametrów. Można się jej pozbyć jedynie przez przeformułowanie modelu, na przykład przez dołączenie nowych sygnałów pomiarowych, albo przez włączenie dodatkowej wiedzy o parametrach, na przykład ustalając w modelu wartości przynajmniej niektórych nieidentyfikowalnych parametrów korzystając z dostępnej wiedzy o ich wartościach. Usunięcie nieistotnych parametrów ze zbioru parametrów estymowanych z reguły poprawia właściwości optymalizowanej funkcji i zmniejsza, często nawet znacznie, szacowaną niepewność pozostałych parametrów, więc wysiłek włożony w rozwiązanie tego problemu może się opłacać. Oczywiście analizę modelu i danych eksperymentalnych oraz ewentualne założenia o wartościach nieistotnych parametrów musi przeprowadzić fizyk, ale wyniki i wnioski z walidacji modelu może i powinna sformułować osoba, która prowadzi estymację parametrów modelu.

Zagadnienie lokalnych, czy nawet kilku globalnych minimów wskaźnika jakości też może mieć przyczynę w samym modelu, chociaż tutaj sytuacja jest często bardziej skomplikowana. Na przykład, liniowe równanie różniczkowe zwyczajne drugiego rzędu o stałych współczynnikach może mieć rozwiązanie  $y(t) = a_1 e^{b_1 t} + a_2 e^{b_2 t}$ . Ze względu na symetrię, czy inaczej mówiąc dowolność ustawienia składników powyższej sumy, w idealnych warunkach i bez błędów pomiarowych wskaźnik jakości estymacji będzie miał w tym przypadku dwa optima globalne w przestrzeni parametrów, tzn.  $(a_1, a_2, b_1, b_2)$  i  $(a_2, a_1, b_2, b_1)$ . Także wtedy model nie jest globalnie identyfikowalny parametrycznie, ale w tym przypadku jest on jednak identyfikowalny lokalnie, to znaczy istnieją obszary w przestrzeni parametrów, w którym jest tylko jedno optimum globalne. W powyższym przypadku może to być na przykład obszar ograniczony nierównością  $b_1 < b_2$ . Należy się wtedy liczyć z tym, że podobne zbliżone optima globalne pojawiają się też w przypadku błędów w pomiarach. Taka lokalna identyfikowalność na ogół pozwala uzyskać satysfakcjonujące rozwiązanie, chociaż przy wzroście skomplikowania modelu może to nie być takie łatwe. Wielomodalność wskaźnika jakości powoduje też pojawianie się punktów stacjonarnych funkcji, a wśród nich minimów lokalnych. Przykłady mnożących się punktów stacjonarnych ze wzrostem liczby parametrów były przytaczane już na początku lat 1980-tych.

Być może model rozpatrywany w rozprawie jest zbyt skomplikowany, aby można było analitycznie przebadать jego właściwości, ale sporo można sprawdzić numerycznie. Jak wynika z powyższych uwag, właściwości modelu mogą mocno wpływać na kształt optymalizowanego wskaźnika jakości i szersza informacja, co wiadomo na ten temat, byłaby przydatna dla lepszego zrozumienia trudności występujących w estymacji parametrów.

Warto też jeszcze wspomnieć o możliwości przeprowadzenia dodatkowych badań modelu. Przykładowo, w zadaniu z rzeczywistymi pomiarami Doktorant miał dane z kilkunastu powtarzanych eksperymentów. Pozwala to na testowanie powtarzalności eksperymentu oraz, po jej potwierdzeniu, na wykonanie oszacowań dokładności opracowanych modeli, na przykład za pomocą walidacji krzyżowej (one-leave-out). Interesujące byłoby też przetestowanie normalności reszt, gdyż założono rozkład normalny zakłóceń i można by było sprawdzić, czy takie założenie jest uzasadnione. Jest to o tyle ważne, że przy tym



założeniu estymatory najmniejszych kwadratów mają atrakcyjne właściwości asymptotyczne estymatorów największej wiarygodności.

- 20<sup>4-6</sup> „Z punktu widzenia informatyki jest to zestaw parametrów (liczb rzeczywistych), których poszukiwanie (sub)optimalnych wartości stanowi zadanie optymalizacyjne” – Teoria optymalizacji i zadania optymalizacyjne z pewnością nie powstały w ramach badań informatycznych; jeżeli już jest potrzebne odniesienie, to chyba trzeba by się było powołać raczej na matematykę.
- 2.2.2b Doktorant miesza tu (i wielokrotnie dalej) pojęcia testu chi kwadrat i kwadratowego wskaźnika jakości identyfikacji. Minimalizowane wyrażenie (2.5) jest wskaźnikiem jakości (funkcją celu), którą minimalizuje się w celu uzyskania ocen parametrów. W takim zadaniu niczego się nie testuje, więc trudno tę funkcję nazywać testem. Tak się jednak składa, że przy pewnych założeniach, dla prawdziwych wartości parametrów statystyka (2.5) ma rozkład chi kwadrat, co pozwala na testowanie pewnych hipotez statystycznych. Jednak są to dwa zupełnie różne zadania.
- 21<sup>8-10</sup> „W tradycyjnym teście  $\chi^2$ , określoną we wzorze (2.5) statystykę najmniejszych kwadratów normalizuje się względem liczby stopni swobody (czyli do liczby danych pomniejszoną o liczbę parametrów)” – W tradycyjnym teście chi kwadrat statystyka ma postać sumy kwadratów, która przy odpowiednich założeniach ma rozkład chi kwadrat z odpowiednimi stopniami swobody. Po podzieleniu przez liczbę stopni swobody dostajemy rozkład chi kwadrat z jednym stopniem swobody, ale nie jest to ‘tradycyjne’ postępowanie.
- 29<sub>6.5</sub> Nie rozumiem, dlaczego ważne jest, aby korzystać tylko z punktów zebranych w czasie obliczeń za pomocą algorytmu genetycznego. Stosując algorytm genetyczny, musimy się liczyć z dosyć masowymi obliczeniami wartości funkcji. Czy w takim razie doliczenie jeszcze pewnej liczby wartości jest problemem, szczególnie gdyby się okazało, że w ten sposób można by było znacznie poprawić dokładność szacowania niepewności? Jeżeli z kolei czas obliczeń modelu w programie GOSIA jest na tyle znaczny, że każde jego obliczenie waży, to czy nie lepiej by było użyć innych metod optymalizacji, np. MADS<sup>4</sup>?
- 33, tabl. 3.1, kolumna 2, 4 wiersz „W granicy liczby wywołań automatycznie odnajduje wszystkie minima, w tym globalne” – Czy rzeczywiście tak jest? Wyobraźmy sobie funkcję dwóch zmiennych równą 0 w pewnym punkcie i równą 1 poza tym punktem. Algorytm genetyczny z prawdopodobieństwem 1 nie znajdzie tego minimum, nawet jeżeli liczba wywołań algorytmu będzie dążyć do nieskończoności.
- 36, tabl. 3.2 Podział całego zakresu na równe osiem przedziałów i zakodowanie ich środków powoduje zmniejszenie przedziałów o 25%, a tym samym zwiększenie dokładności.
- 42<sup>8-9</sup> „Poszukiwania heurystyczne podejmuje się, gdy znalezienie rozwiązania dokładnego nie jest możliwe – z powodu zbyt długiego czasu obliczeń, zmian zachodzących w środowisku bądź niejednoznaczności funkcji oceny” – Mogę się domyślać, co Doktorant ma na myśli pisząc o zmianach zachodzących w środowisku czy o niejednoznaczności funkcji oceny. I wydaje mi się, że w obu przypadkach można zastosować inne metody optymalizacyjne po odpowiednim sformułowaniu zadania.
- 42<sub>3-1</sub> „Do tworzenia poszczególnych osobników w pokoleniu używana jest informacja ze wszystkich rozwiązań z poprzedniego pokolenia. Pozwala to skutecznie unikać przedwczesnej zbieżności algorytmu – problemu lokalnych ekstremów.” – Głównym operatorem związanym z unikaniem zbieżności do lokalnych ekstremów jest operator mutacji, który akurat właśnie nie korzysta z informacji znajdujących się w rozwiązaniach z poprzedniego pokolenia.

---

<sup>4</sup> C. Audet, J.E. Dennis Jr. (2006) Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 17(1):188–217, DOI: 10.1137/040603371.

49<sub>2-1</sub> „W ruletkowym wyborze na rodzica, im słabszy osobnik tym mniejszy kąt wycinka kołowego, czyli mniejsza szansa zostania rodzicem. Tak zdefiniowane „koło ruletki” jest tożsamy z dystrybuantą prawdopodobieństwa zostania rodzicem” – To nie jest odpowiednik dystrybuanty, ale dyskretnego rozkładu prawdopodobieństwa (funkcji masy prawdopodobieństwa).

66<sub>13</sub> „Z punktu widzenia Metody AH, algorytm genetyczny jest formą sztucznej inteligencji” - ???

67, **ostatni akapit** W symulowanym przykładzie Doktorant porównuje wyniki zastosowania swojej metody szacowania niepewności ocen parametrów dla punktów „pomiarowych” generowanych w podanej deterministycznej siatce w przestrzeni parametrów, generowanych przez algorytm genetyczny i generowanych metodą Monte Carlo – niezależnie dla każdego parametru w ostatnim przypadku. Jednak to porównanie nie jest zbyt sprawiedliwe. We wszystkich sposobach generacji przyjęto mniej więcej tyle samo punktów, ale tylko dla algorytmów genetycznych gromadzą się one głównie w pobliżu optimów i ich gęstość w tych obszarach jest z konieczności większa. W pozostałych są one rozmieszczone równomiernie w całej przestrzeni.

82<sub>8</sub> Wymieniono wszystkich autorów z ich imionami, ale nie podano pozycji literatury.

92<sup>6-8</sup> „Wynika to z faktu, że wartości parametrów cechy elementów populacji są z prawdopodobieństwem 1 zbieżne do ich charakterystyk teoretycznych (Prawa Wielkich Liczb)” – Prawa wielkich liczb mówią o zbieżności rozkładów do rozkładu normalnego, przy pewnych założeniach. Jak się to ma do zbieżności do charakterystyk teoretycznych? I co to znaczy, że wartości parametrów populacji są zbieżne z prawdopodobieństwem 1 do ich charakterystyk teoretycznych? Wydawałoby się, że jedno i drugie pojęcie oznacza to samo. Może raczej chodzi o zbieżność estymatorów parametrów ze wzrostem liczności próby, dążącej do nieskończoności? A to jest właśnie właściwość estymatorów największej wiarygodności.

92<sup>9-10</sup> Rozkłady dla metod ewolucyjnych są właśnie tematem wspomnianego artykułu Arabasa.

92<sub>5</sub> „wartość przeciętna dla i-tego wymiaru informuje, gdzie koncentruje się próbkowanie” – Jeżeli zmienna przyjmuje wartości 0 i 1 z jednakowym prawdopodobieństwem, to jej wartość przeciętna jest równa  $\frac{1}{2}$ . Czy tu wartości próbkowane koncentrują się przy wartości przeciętnej?

93<sup>1-2</sup> „znormalizowane względem zakresu próbkowania odchylenie standardowe dla i-tego wymiaru umożliwia porównanie jego bezwzględnej wartości między wymiarami” – Odchylenie standardowe jest zawsze dodatnie, więc po co liczyć jego wartość bezwzględną?

94<sub>3</sub> **i dalej** Do sprawdzenia równości rozkładów lepiej byłoby zastosować odpowiednie testy statystyczne.

103, **wzór (5.2)** Brakuje założenia o nieskorelowaniu zmiennych epsilon.

104<sup>6</sup> „Ponieważ  $y_j$  są zmiennymi niezależnymi” – Skąd wiadomo, że są one niezależne? Nie założono przecież, że błędy pomiarowe  $\epsilon_j$  są niezależne. Do tego zdanie to jest niezręcznie sformułowane.

105<sub>1</sub> Co to są „zależności liniowe”?

106<sup>6-13</sup> Uzasadnienie niemożliwości wyznaczenia macierzy kowariancji jest mocno dyskusyjne. Po pierwsze, można przyjąć, że da się zlinearyzować model w pobliżu punktu optymalnego i użyć wzorów dla modelu liniowego, tak jak jest opisane w cytowanej w rozprawie książce Tarantoli. Można też wyznaczyć drugie pochodne znając w tym punkcie gradienty, co jest też dobrze znanym rozwiązaniem.

Natomiast jeżeli chodzi o argument o ‘uciążliwych parametrach’, które powodują trudności w obliczaniu macierzy kowariancji w modelu zlinearyzowanym spowodowane koniecznością odwracania źle warunkowanej macierzy, to w regresji liniowej są znane dobrze sprawdzone metody radzenia sobie z tymi trudnościami, na przykład w tzw. regresji

grzbietowej (ridge regression), gdzie stosuje się regularyzację. Zresztą obliczeniowo podobne rozwiązanie jest zastosowane w znanej metodzie Levenberga-Marquardta powszechnie stosowanej do optymalizacji w regresji nieliniowej, gdzie są też wyznaczone macierze kowariancji.

Tak więc wyznaczanie macierzy kowariancji tradycyjnie stosowanymi metodami wygląda na realne do wykonania i przedstawione tłumaczenie odrzucające takie podejścia nie jest przekonujące, nawet jeżeli obliczanie macierzy kowariancji może być kłopotliwe. Myślę jednak, że Doktorant miał na myśli to, że przybliżenia liniowe nie są w przypadku rozpatrywanego modelu dostatecznie dokładne i tylko nieprecyzyjnie sformułował ten akapit. Tak czy inaczej, z pewnością przydałaby się szersza dyskusja tych postępowań w rozprawie, bo są to metody konkurencyjne do proponowanej w rozprawie, więc powinno się w niej znaleźć przynajmniej porównanie zalet i wad różnych metod, a może nawet porównanie wyników zastosowania różnych metod w rozważanych przykładach.

106<sup>14+16</sup> Należy tutaj koniecznie dodać, że błędy pomiarowe są nieskorelowane.

106<sup>17-20</sup> Przy przyjętych założeniach estymatory parametrów są asymptotycznie nieobciążone i asymptotycznie efektywne oraz mają asymptotycznie rozkład normalny z macierzą kowariancji równą dolnemu ograniczeniu Craméra-Rao, co wynika z tego, że są one estymatorami największej wiarygodności. Potocznie czasami się mówi, że mają one asymptotycznie najmniejsze wariancje. Natomiast o ile estymatory liniowej metody najmniejszych kwadratów są BLUE (czyli nieobciążone i z najmniejszą wariancją wśród liniowych nieobciążonych estymatorów) dla dowolnej długości próby, to estymatory nieliniowej metody najmniejszych kwadratów takiej właściwości nie muszą mieć. Tak więc druga właściwość podana w rozprawie nie musi być prawdziwa, chyba że Doktorant miał na myśli asymptotyczną właściwość i tylko zapomniał to napisać lub zna pracę, gdzie taka właściwość jest udowodniona – wtedy powinien podać odpowiednią pozycję literatury. Dodatkowo, stwierdzenie w przypisie 24 na dole strony jest mylące, gdyż twierdzenie Gaussa-Markowa mówi właśnie o tym, że estymatory liniowej metody najmniejszych kwadratów są BLUE, a to się nie odnosi do nieliniowej metody najmniejszych kwadratów.

107<sup>14</sup> Nie słyszałem, aby istniało w statystyce pojęcie standardowego poziomu ufności. Można najwyżej mówić o często używanych poziomach.

108<sup>12-11</sup> „Wartość  $q_{reduced}$  w funkcji liczby stopni swobody jest szybko zbieżna do jedności dla każdego poziomu ufności” – Rys. 5.1 tego nie potwierdza. 1000 stopni swobody to wcale nie tak mało.

109<sup>13</sup> Niedokończone zdanie.

110, rys. 5.3 Wcześniej sugerowano, że liczba stopni swobody równa 1000 to nie jest dużo, a tu jest wykres tylko do dwóch stopni swobody.

121, punkt 5.3 Opis wyznaczania niepewności parametrów jest niezbyt zrozumiały. Przydałyby się rysunki objaśniające przyjęte postępowanie.

121<sup>12</sup> „Współczynnik  $spread_{FL}$  stanowi dolne oszacowanie dokładności” – współczynnik  $spread_{FL}$  mówi o rozrzucie "pionowych" współrzędnych punktów FL wokół  $y_{PU}$ . Mniejsza wartość jest oczywiście lepsza, ale nie rozumiem dlaczego jest oszacowaniem dokładności szacowania niepewności, a tym bardziej dolnym oszacowaniem.

122, punkt 5.3.1 Oszacowanie obszaru ufności dokonano od wewnątrz obszaru ufności, dla punktów znajdujących się poniżej płaszczyzny krytycznej. Nie rozumiem, dlaczego Doktorant nie dokonał podobnego oszacowania obszaru ufności od zewnątrz, dla punktów powyżej płaszczyzny krytycznej. Dałoby to oszacowania z obu stron i pozwoliło na podanie niepewności oszacowania. A do tego, stosując mniej lub bardziej zaawansowane metody geometryczne można by było na pewno uzyskać na tej podstawie znacznie dokładniejsze oszacowania punktów hiperpłaszczyzny ograniczającej obszar ufności. Takie wyniki byłyby ciekawsze i chyba bardziej użyteczne.

122<sup>13</sup> „Jako liczbę sąsiadów przyjmuje się podwojoną długość wektora parametrów” – czy chodzi o wektor parametrów  $p_{BEST}$ ? Jaki związek mają te dwie wielkości?

## 5. Podsumowanie

Uwagi dotyczące etapu formułowania modelu i jego badania mają charakter dyskusji naukowej i nie są oczywiście zasadnicze dla oceny samego osiągnięcia przedstawionego w tezach rozprawy. Może trochę podobna sytuacja jest z uwagami związanymi z etapem minimalizacji wskaźnika jakości, chociaż w tym przypadku przeoczenie możliwości zastosowania innych narzędzi optymalizacyjnych, które wydają się być bardziej odpowiednie w omawianym w rozprawie przypadku, ma większą wagę biorąc pod uwagę, że rozwój metod ewolucyjnych optymalizacji jest powszechnie wiązany z dyscypliną informatyki technicznej, w której jest rozpatrywany doktorat. Zastosowanie specjalizowanych metod ewolucyjnych dla funkcji wielomodalnych mogłoby może także uprościć proponowaną w rozprawie metodę.

Natomiast zasadniczą częścią rozprawy podlegającą ocenie jest opracowanie przez Doktoranta nowej nieparametrycznej metody estymacji ufności parametrów modelu w regresji nieliniowej, korzystającej z punktów uzyskanych w trakcie minimalizacji wskaźnika jakości za pomocą algorytmu genetycznego. Doktorant stworzył algorytm i obszerny program komputerowy oraz przeprowadził obliczenia dla dwóch przypadków, w tym jednego dla rzeczywistych danych. Słabszą stroną rozprawy jest to, że Doktorant nie przedyskutował innych metod wyznaczenia obszarów ufności i nie porównał z nimi zaproponowanej metody, ani nie wykazał, jakie korzyści ma zaproponowana metoda w stosunku do znanych metod. Wydaje się też, że metoda mogłaby być lepiej dopracowana i dawać dokładniejsze oceny niepewności, gdyby uwzględnić w niej także oszacowania obszaru ufności od zewnątrz i użyć ich do dokładniejszego wyznaczenia ocen.

Analizując formalnie zapisane w rozprawie tezy:

- Możliwe jest oszacowanie niepewności wyznaczenia wartości elementów macierzowych w analizie danych z pomiarów wzbudzeń kulombowskich w oparciu jedynie o próbkowanie przestrzeni rozwiązań przez algorytm genetyczny.
- Dokładność wyznaczenia niepewności przedstawioną Metodą AH jest porównywalna z innymi metodami wykorzystywanymi do estymacji niepewności wartości parametrów, a czas niezbędny do wykonania obliczeń jest znacząco krótszy.

to pierwsza teza jest w rozprawie wykazana. Podejście przedstawione w rozprawie jest oczywiście nowe i całkiem inne niż prezentowane w innych pracach. Natomiast mam nieco wątpliwości co do wykazania drugiej tezy, chociaż uważam, że jest ona najprawdopodobniej prawdziwa. Doktorant ograniczył się w rozprawie do dyskusji różnych sposobów próbkowania przestrzeni parametrów i porównania jakości uzyskiwanych w ten sposób ocen przedziałów ufności. Ale nie przedyskutował innych możliwych podejść do szacowania niepewności estymacji parametrów i nie porównał zaproponowanej metody z innymi metodami. Tak że ta teza jest sformułowana zbyt ogólnie w stosunku do badań zaprezentowanych w rozprawie.

W ocenie rozprawy trzeba jednak wziąć pod uwagę, że zaprezentowany pomysł jest nowy, a jego implikacje są znacznie dalej idące, niż to przedstawiono w rozprawie. W rozprawie wyznacza się tylko oszacowania niepewności w kierunkach osi poszczególnych parametrów, jednak w analogiczny sposób można wyznaczyć cały obszar ufności przy stosunkowo niewielkim obciążeniu czasowym. Takie oszacowania obszaru ufności można by było też uzyskać rozwiązując numerycznie odpowiednie równania wynikłe z przyjęcia, że wartość statystyki testowej chi kwadrat jest równa wartości krytycznej. Ten sposób wymagałby jednak policzenia wartości wskaźnika jakości zgodnie z wymaganiami metody wyznaczenia



rozwiązania równania nieliniowego jednej zmiennej, co wymaga dodatkowych obliczeń statystyki chi kwadrat i znacznie dłuższego czasu w stosunku do korzystania z istniejących punktów. Może dałoby się to zrobić dla kilku czy kilkunastu kierunków w przestrzeni parametrów, ale gdyby chciało się oszacować z satysfakcjonującą gęstością punkty na całej hiperpowierzchni ograniczającej obszar ufności, to obliczenia za pomocą numerycznych metod rozwiązywania równań byłyby prawdopodobnie czasowo niewydolne. Natomiast wydaje mi się, że policzenie takiej większej liczby punktów nie powinno trwać tak długo w metodzie zaproponowanej w rozprawie, a uzyskana dokładność może nie być specjalnie gorsza, szczególnie jeżeli dopracuje się zaproponowany w recenzji sposób korzystający z punktów leżących poza obszarem ufności. W ten sposób można by było praktycznie natychmiast po optymalizacji obejrzeć na przykład wykresy przekroju obszarów ufności i uzyskać w ten sposób wstępną jakościową ocenę jakości estymacji i obejrzeć na przykład ewentualne widoczne odchylenia uzyskanej hiperpowierzchni od hiperelipsoidy odpowiadającej przybliżeniu liniowemu.

Podsumowując powyższe uwagi, doceniam przedstawiony w rozprawie pomysł i uważam, że wskazuje on na możliwość efektywnego nieparametrycznego wyznaczania obszarów ufności dla modeli nieliniowych z wieloma parametrami, co jest zbyt trudne obliczeniowo dla innych metod. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, że rozprawa dotyczy praktycznego aspektu ważnych badań fizycznych i że opracowana metoda estymacji parametrów modelu oraz jego statystycznej oceny, być może po modyfikacjach, ma szansę na dołączenie i poprawienie działania programu GOSIA, który jest obecnie podstawowym narzędziem używanym w badaniach związanych z eksperymentami kulombowskimi.

Te względy skłaniają mnie do uznania, że rozprawa spełnia kryteria naukowe stawiane pracom doktorskim zarówno ustawowe jak i zwyczajowe. Wnoszę więc do Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr. inż. Andrzeja Piętaka do publicznej obrony.



