

Dr hab. inż. Marek Kowal, prof. UZ
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Uniwersytet Zielonogórski
email: M.Kowal@issi.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 8.03.2025r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Rozwijanie narzędzi obliczeniowych oraz modeli matematycznych dla systemów reakcji-adwekcji-dyfuzji

Autor rozprawy: mgr inż. Jarosław Gil

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrzej Polański

Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Jarosz

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Głównym celem recenzowanej pracy doktorskiej było opracowanie, implementacja oraz weryfikacja efektywności narzędzi obliczeniowych i modeli matematycznych stosowanych do analizy systemów reakcji-adwekcji-dyfuzji. Podjęta tematyka jest niezwykle istotna, ponieważ modelowanie złożonych procesów chemicznych, fizycznych i biologicznych stanowi kluczowe narzędzie w tych dziedzinach nauki, jednak wymaga opracowania zaawansowanych algorytmów numerycznych.

W ramach pracy skupiono się na trzech zagadnieniach: modelowaniu wzorców Lieseganga, detonacji materiałów wybuchowych oraz ewolucji populacji komórkowych. Rozprawa obejmuje analizę równań różniczkowych cząstkowych (PDE) opisujących wspomniane procesy oraz ich numeryczne rozwiązywanie. Istotnym elementem pracy jest opracowanie algorytmów umożliwiających symulację poszczególnych zjawisk oraz ich weryfikację poprzez porównanie wyników symulacyjnych z danymi eksperymentalnymi i literaturowymi.

Do modelowania procesu powstawania wzorców Lieseganga zastosowano równania kinetyczne reakcji chemicznych, równania adwekcji i dyfuzji oraz prawo przesycenia. Przeprowadzono liczne symulacje numeryczne w oparciu o PDE, co pozwoliło na analizę dynamiki formowania się wzorców w czasie. W przypadku modelowania detonacji materiałów wybuchowych wykorzystano równania Naviera-Stokesa, równania stanu gazu doskonałego oraz prawa Rankine'a-Hugoniota do opisu propagacji fali detonacyjnej. Modele numeryczne zweryfikowano na podstawie danych eksperymentalnych, co umożliwiło ocenę ich poprawności.

Modelowanie ewolucji populacji komórkowych i mikroorganizmów przeprowadzono za pomocą zmodyfikowanego algorytmu Gillespiego. Wprowadzone ulepszenia pozwoliły na efektywne modelowanie populacji o dużej liczebności. Otrzymane wyniki porównano z modelem deterministycznym oraz danymi z bazy TCGA.

Praca ma charakter badawczy. W jej ramach opracowano i zaimplementowano zaawansowane algorytmy numeryczne, umożliwiające precyzyjne modelowanie złożonych procesów reakcji-adwekcji-dyfuzji. Zastosowano formalizm matematyczny niezbędny do budowy modeli, jednak główny nacisk położono na aspekty praktyczne i skuteczność zastosowanych metod. Dla każdego z analizowanych procesów przeprowadzono badania numeryczne potwierdzające poprawność opracowanych metod. Modele wzorców Lieseganga wykazały zgodność z prawami Matalona-Packtera oraz danymi literaturowymi. Symulacje detonacji materiałów wybuchowych wykazały wysoką zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Natomiast modelowanie ewolucji populacji komórkowych pozwoliło na precyzyjne odwzorowanie dynamiki mutacji i rozwoju populacji.

Należy podkreślić interdyscyplinarny charakter rozprawy, ponieważ opracowane narzędzia obliczeniowe mogą znaleźć szerokie zastosowanie w naukach przyrodniczych i technicznych, zwłaszcza w chemii, fizyce i biologii. Szczególnie istotnym osiągnięciem jest modyfikacja algorytmu Gillespiego, która otwiera nowe możliwości modelowania populacji komórkowych i może znaleźć zastosowanie w badaniach nad chorobami nowotworowymi.

Uwzględniając powyższe, cel rozprawy został sformułowany właściwie, a jej zakres obejmuje istotne i aktualne problemy badawcze z obszaru informatyki o znaczeniu praktycznym.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim. Praca liczy 131 stron i składa się z 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim, streszczenia w języku angielskim, bibliografii, spisu rysunków, spisu tabel oraz spisu algorytmów.

Rozdziały 1, 2 i 3 prezentują odpowiednio cel i zakres pracy, tezy pracy oraz oryginalne osiągnięcia i publikacje Doktoranta.

Rozdział 4 stanowi teoretyczne wprowadzenie do tematyki pracy, definiuje podstawowe pojęcia i narzędzia matematyczne wykorzystywane w analizie numerycznej procesów reakcji-adwekcji-dyfuzji. Na wstępie tego rozdziału omówiono równania kinetyczne reakcji chemicznych, opisujące tempo przemian reagentów, oraz równania adwekcji i dyfuzji, które są fundamentalne w modelowaniu transportu substancji. Przedstawiono również podstawy procesów stochastycznych, w tym łańcuchów Markowa oraz równań Chapmana-Kołmogorowa, które mają zastosowanie w modelowaniu ewolucji populacji komórkowych.

Kolejna część rozdziału dotyczy metod numerycznych wykorzystywanych w pracy, w tym równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych. Opisano podstawowe metody rozwiązywania tych równań, takie jak metoda Eulera i metoda Rungego-Kutty, które są kluczowe dla implementacji numerycznych modeli badanych procesów. Przedstawiono również klasyfikację równań różniczkowych cząstkowych na eliptyczne, hiperboliczne i

paraboliczne, a także metodę charakterystyk, stosowaną do analizy równań hiperbolicznych. Przedsatwione metody są w kolejnych rozdziałach stosowane do modelowania konkretnych zjawisk.

Rozdział 5 przedstawia szczegółowy opis procesów prowadzących do powstawania charakterystycznych pasm strącania w układach chemicznych, które tworzą wzorce Lieseganga. Omówiono zarówno podstawowe aspekty teoretyczne, jak i zastosowane metody numeryczne wykorzystywane w modelowaniu tego zjawiska. Na wstępie podkreślono, że wzorce Lieseganga mogą powstawać w różnych środowiskach, takich jak ciecze, żele czy gazy, co czyni je istotnym zagadnieniem w chemii, biologii i geologii. Przedstawiono również matematyczne podstawy procesu, w tym opis zjawiska przy użyciu drugiego prawa Ficka oraz teorii przesycenia.

Kolejna część rozdziału omawia prawo Matalona-Packtera, opisujące zależność między stężeniem substancji a odległością pomiędzy kolejnymi pasmami. Wprowadzono trzy kluczowe zasady: czasową, szerokości i odstępów, które umożliwiają precyzyjne modelowanie formowania się wzorców.

Dalsza część rozdziału koncentruje się na budowie modelu numerycznego opisującego powstawanie wzorców Lieseganga. Omówiono założenia modelu, w tym warunki początkowe i graniczne, oraz przedstawiono szczegóły implementacji. Przedstawiono algorytmy numeryczne i metody dyskretyzacji, umożliwiające rozwiązanie układu równań różniczkowych cząstkowych opisujących dynamikę zjawiska.

W końcowej części przedstawiono wyniki symulacji dla geometrii jedno i dwuwymiarowej, które zostały zweryfikowane na podstawie zasad opisanych w teorii Matalona-Packtera. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne wykazały zgodność uzyskanych wyników z danymi literaturowymi, co potwierdza poprawność opracowanego modelu. Szczegółowe analizy wykazały, że struktury pasmowe formują się zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, a ich parametry zależą od stężeń reagentów oraz warunków dyfuzji. W efekcie sformułowano wnioski, że opracowany model numeryczny pozwala na dokładne odwzorowanie procesu powstawania wzorców Lieseganga i może znaleźć zastosowanie w projektowaniu leków o kontrolowanym uwalnianiu.

Rozdział 6 przedstawia podstawy teoretyczne oraz matematyczne podejście do modelowania procesu detonacji i propagacji fali uderzeniowej. Opisuje kluczowe koncepcje, takie jak teoria wybuchu, równania stanu gazu doskonałego, modele detonacyjne oraz empiryczne równania stanu, które opisują zachowanie gazowych produktów detonacji. Szczególną uwagę poświęcono dynamice fali uderzeniowej, jej propagacji oraz zmianom fizycznym i chemicznym zachodzącym w medium oraz procesowi dopalania produktów detonacji, który wpływa na dalszy rozwój fali.

W części poświęconej modelowaniu numerycznemu przedstawiono matematyczne równania opisujące zmiany kluczowych parametrów, takich jak ciśnienie, temperatura, gęstość, lepkość i prędkość fali uderzeniowej. Zaprezentowano nową metodologię wyznaczania parametrów fali uderzeniowej opartą na równaniach adwekcji i transportu masy, uwzględniającą punktowe zmiany składu fali podmuchowej na skutek spalania i adwekcji produktów rozkładu ładunku wybuchowego. Zaproponowano podejście do modelowania propagacji fali poprzez zastosowanie zarówno równań Naviera-Stokesa, jak i

równania Burgersa do wyznaczania zmian prędkości frontu uderzeniowego. Następnie zaproponowano schemat obliczeniowy opisujący zmiany kluczowych parametrów, oparty na metodzie z zakresu różnic skończonych i schemacie Eulera. Ponadto przedstawiono podejście do analizy składu fali podmuchowej, którą modelowano jako dynamiczny układ chemiczny, w którym zachodzą reakcje spalania resztkowych produktów detonacji.

Dalsza część rozdziału omawia wyniki symulacji dla geometrii jedno i dwuwymiarowej. Weryfikacja modelu jednowymiarowego została przeprowadzona na podstawie danych eksperymentalnych z wybuchu sferycznego ładunku wybuchowego. Model jednowymiarowy wykazał stosunkowo dużą zgodność z rzeczywistymi wartościami nadciśnienia oraz propagacji fali podmuchowej. Model dwuwymiarowy pozwolił na bardziej szczegółowe odwzorowanie geometrii propagacji fali, jednak ujawnił problemy związane z niestabilnością warunków na froncie uderzeniowym, wymagające dalszego dopracowania.

Rozdział 7 poświęcono algorytmowi Gillespiego, który wykorzystywany jest do modelowania rozwoju populacji komórkowych i mikrobiologicznych. Przedstawiono w nim zarówno teoretyczne podstawy wzrostu populacji, jak i praktyczne metody implementacji algorytmu do analizy dynamiki systemów biologicznych. Na wstępie omówiono kluczowe mechanizmy wpływające na rozwój populacji komórek i przedstawiono podstawowe modele wzrostu, takie jak model eksponencjalny i logistyczny, oraz ich ograniczenia w opisach populacji. Następnie szczegółowo zaprezentowano algorytm Gillespiego jako metodę stochastycznej symulacji, uwzględniając jego warianty, takie jak wersja tau-leap i wersja zbinowana. Rozdział zawiera także analizę scenariuszy ewolucji populacji, w tym rozwoju nowotworów, wpływu mutacji oraz istnienia populacji krytycznej, która determinuje przeżycie lub wymieranie populacji. Szczególną uwagę poświęcono różnym typom mutacji kierunkowych i pasażerskich oraz ich wpływowi na współczynnik przystosowania komórek. Omówiono też zależność między mutacjami a dynamiką podziałów oraz śmierci komórek.

W części poświęconej implementacji zaprezentowano szczegóły numerycznej realizacji modeli w języku Python, uwzględniając optymalizację obliczeń poprzez zastosowanie różnych wariantów algorytmu. Zaproponowano macierzową odmianę algorytmu Gillespiego wykorzystującą struktury danych oparte na macierzach rzadkich, co umożliwia efektywne przechowywanie i przetwarzanie danych dla dużych populacji komórkowych.

Następnie przeanalizowano wyniki symulacji, porównując dynamikę populacji mikrobiologicznych oraz populacji nowotworowych. Omówiono m.in. modele 1D i klonalny oraz przeprowadzono analizę statystyk VAF, służących do badania zmienności genetycznej populacji. Wyniki symulacji zostały porównane z danymi eksperymentalnymi, co pozwoliło na weryfikację skuteczności podejścia z modelem. Opracowanie modelu klonalnego, który pozwolił na szczegółowe badanie wpływu mutacji kierunkowych i pasażerskich na ewolucję populacji komórek umożliwiło analizę procesu selekcji klonów.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy, w którym przedstawiono kluczowe rezultaty przeprowadzonych badań. Doktorant podkreśla, że opracowane modele i algorytmy charakteryzują się wysoką zgodnością z rzeczywistymi procesami. Zwraca również uwagę na potencjał modelowania numerycznego jako skutecznego narzędzia do symulacji

złożonych zjawisk w takich dziedzinach jak inżynieria chemiczna, biotechnologia i medycyna.

Bibliografia składa się z 74 pozycji literaturowych, obejmujących głównie artykuły z recenzowanych czasopism, materiały z międzynarodowych konferencji oraz książki renomowanych wydawnictw. Choć dobór literatury jest trafny, pewnym mankamentem pozostaje stosunkowo niewielka liczba prac naukowych z ostatnich kilku lat.

3. Poprawność i oryginalność postawionych tez i stopień w jakim one zostały wykazane

W rozprawie sformułowano pięć tez:

- 1) Bazując na schemacie obliczeniowym wyznaczonym na podstawie równania dyfuzji, modelu kinetycznego procesu chemicznego oraz teorii przesycenia można określić sumaryczne równania cząstkowe stanu składu układu. Rozwiązanie otrzymanych równań cząstkowych na bazie schematów siatkowych równań hiperbolicznych określa zmiany składu układu w czasie oraz kształt stacjonarnego procesu strącania.*
- 2) Rozdzielenie skomplikowanego procesu detonacji na cząstkowe zmiany oraz ułożenie schematu obliczeniowego opisującego ewolucję parametrów pozwala na stworzenie algorytmu modelowania funkcji czasowych opisujących kluczowe zmienne układu. Zastosowanie praw zachowania Rankine-Hugoniota oraz równania Naviera-Stokesa do opisu frontu procesu propagacji fali uderzeniowej umożliwia wyznaczenie nieciągłych zmian na froncie fali. Przedstawienie procesu detonacji i propagacji fali uderzeniowej w postaci sekwencji kolejno występujących po sobie zdarzeń zachowuje zależności pomiędzy parametrami i pozwala wyznaczyć kształt fali.*
- 3) Wykorzystanie algorytmu Gillespiego oraz zastosowanie odpowiednich struktur danych środowiska programowania Python umożliwiające obliczenia równoległe oraz przechowywanie danych dotyczących indeksów mutacji i indeksów komórek w postaci macierzy rzadkiej znacząco wpływa na czas trwania symulacji. Umożliwia przeprowadzenie symulacji rozwoju wysokoliczebnych (ponad milion komórek) populacji oraz generowanie wysokorozdzielczych statystyk.*
- 4) Weryfikacja danych symulacyjnych z wykorzystaniem danych rzeczywistych sekwencjonowania DNA z bazy TCGA wymaga opracowania kroku analizy odzwierciedlającego rzeczywistą transkrypcję materiału genetycznego, uwzględniającego wartość pokrycia w eksperymentach sekwencjonowania.*
- 5) Grupowanie danych ze względu na charakterystyczne cechy pomimo utraty rozdzielczości danych genetycznych zmniejsza czas symulacji oraz pozwala na modelowanie ewolucji populacji o wielkości dochodzącej do 500 milionów komórek.*

Teza 1 została poprawnie sformułowana, ponieważ zawiera stwierdzenie, które można zweryfikować na podstawie zaplanowanych badań oraz aktualnego stanu wiedzy naukowej. Jednocześnie obecny stan wiedzy nie dostarcza jednoznacznych odpowiedzi na zawarte w niej twierdzenie. Teza została w pełni udowodniona, ponieważ Doktorant

opracował odpowiedni model procesu dyfuzji-reakcji, opierając się na układzie równań różniczkowych cząstkowych. Następnie zaproponował metodę numeryczną do jego rozwiązania, wykorzystując siatkowe równania hiperboliczne. Zweryfikował również, przy użyciu prawa Matalona-Packtera, że opracowany model generuje wyniki zgodne z dotychczasową wiedzą na temat przebiegu procesów powstawania wzorców Lieseganga.

Teza 2 została również poprawnie sformułowana. Dotyczy ona nietrywialnego problemu modelowania detonacji ładunków wybuchowych oraz propagacji fali uderzeniowej. W celu jej udowodnienia Doktorant opracował zaawansowany model zjawiska fali uderzeniowej, uwzględniający liczne złożone aspekty procesu detonacji materiałów wybuchowych. Następnie stworzył schemat obliczeniowy oparty na metodzie Eulera. Przeprowadzone eksperymenty dla przypadku jednowymiarowego wykazały zgodność z danymi empirycznymi. W przypadku dwuwymiarowym pojawiły się pewne problemy związane z niestabilnością metody dla frontu uderzeniowego. Pomimo tych trudności, można uznać, że teza została wykazana.

Teza 3 odnosi się do kluczowego problemu, jakim jest wysoka złożoność obliczeniowa i pamięciowa algorytmu Gillespiego. Doktorant wykazał, że mimo tych wyzwań możliwe jest przeprowadzenie symulacji zarówno wysokoliczebnych, jak i wysokorozdzielczych, pod warunkiem odpowiedniej implementacji algorytmu. W rozdziale 7 przedstawiono jego modyfikację, która umożliwiła symulację populacji komórek lub mikroorganizmów liczących ponad milion jednostek, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej rozdzielczości danych. Przeprowadzone badania potwierdziły zgodność zaproponowanych rozwiązań z danymi eksperymentalnymi, co pozwala uznać tezę za udowodnioną.

Teza 4 wydaje się raczej założeniem lub ograniczeniem eksperymentu, a nie samodzielnym twierdzeniem naukowym. W związku z tym, moim zdaniem, nie jest poprawnie sformułowana.

Teza 5 w dużej mierze przedstawia oczywiste stwierdzenie. Jej wartość poznawcza wynika przede wszystkim z potwierdzenia maksymalnego rozmiaru populacji, jaki można zasymulować przy zastosowaniu mechanizmu grupowania. Przeprowadzone badania wykazały, że dzięki tej metodzie możliwe jest modelowanie populacji liczących nawet 500 milionów komórek.

4. Ocena rozprawy

Moja ocena rozprawy doktorskiej jest pozytywna. Praca stanowi kompleksowe i interdyscyplinarne opracowanie dotyczące narzędzi obliczeniowych oraz modeli matematycznych dla systemów reakcji-adwekcji-dyfuzji. Autor wykazał się głęboką znajomością metod modelowania matematycznego i algorytmiki numerycznej, stosując je do trzech istotnych zagadnień: modelowania wzorców Lieseganga, detonacji materiałów wybuchowych oraz ewolucji populacji komórkowych i mikroorganizmów. Każdy z tych obszarów jest wymagający sam w sobie, a ich połączenie w jednej pracy świadczy o wysokich kompetencjach badawczych doktoranta oraz szerokiej wiedzy w zakresie modelowania zjawisk fizycznych, chemicznych i biologicznych.

Praca wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja w obszarze obliczeń numerycznych. Szczególnie wartościowe jest rozwinięcie modeli matematycznych dla wspomnianych problemów oraz opracowanie i implementacja

dedykowanych algorytmów obliczeniowych w językach Python i MATLAB. Autor zastosował szeroki wachlarz metod numerycznych, w tym algorytmy równań różniczkowych cząstkowych oraz metody Monte Carlo do symulacji złożonych procesów chemicznych, fizycznych i biologicznych. Modele matematyczne zostały starannie dobrane i zweryfikowane. Otrzymane wyniki są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi i danymi eksperymentalnymi, co potwierdza rzetelność opracowanych metod.

Opracowane modele i algorytmy mogą znaleźć szerokie zastosowanie w nauce i przemyśle, w tym w chemii i inżynierii materiałowej (w procesach kontrolowanego strącania i modelowaniu wzorców Lieseganga), w przemyśle zbrojeniowym (przy modelowaniu detonacji i propagacji fali uderzeniowej), w medycynie i biologii (przy analizie rozwoju nowotworów i mikroorganizmów). Dodatkowym atutem pracy jest dostępność kodu źródłowego na platformie GitHub, co umożliwia dalsze wykorzystanie i rozwój metod przez innych badaczy.

Praca jest dobrze zorganizowana i czytelna. Autor w sposób logiczny przedstawia kolejne zagadnienia - poczynając od wprowadzenia w problematykę, poprzez opis metod matematycznych, aż po szczegółową analizę wyników. Każda część pracy jest poparta solidnym aparatem matematycznym oraz wynikami symulacji, które są przejrzysto zilustrowane wykresami i tabelami.

Mimo wysokiej jakości pracy pewne aspekty można by ulepszyć. O ile modele matematyczne są przedstawione szczegółowo, to opisy zaproponowanych algorytmów numerycznych oraz sposobów ich implementacji są miejscami zbyt lakoniczne. Praca niewątpliwie zyskałaby, gdyby poświęcono więcej miejsca tym zagadnieniom. Ponadto, poszerzenie badań o większą liczbę porównań z innymi metodami mogłoby dodatkowo wzmocnić wiarygodność opracowanych modeli. Warto byłoby również rozważyć bardziej szczegółową analizę wpływu poszczególnych parametrów na wyniki, co mogłoby zwiększyć dokładność predykcji modeli.

Za istotny mankament pracy uważam także brak rozbudowanej części przeglądowej, w której Doktorant omówiłby aktualny stan wiedzy w badanych obszarach. Dodatkowo, w manuskrypcie znaleziono liczne błędy redakcyjne, głównie literówki, które powinny zostać poprawione. Niektóre wykresy są również mało czytelne - niewielki rozmiar i dobrana kolorystyka utrudniają interpretację danych.

Wymienione niedoskonałości nie podważają jednak pozytywnej oceny rozprawy ani jej wkładu w rozwój dyscypliny naukowej.

Wyniki przedstawione w pracy doktorskiej zostały opublikowane w czterech czasopismach naukowych oraz zaprezentowane podczas pięciu konferencji, co świadczy o wysokiej jakości badań oraz ich znaczeniu dla środowiska naukowego.

5. Pytania i uwagi

1. Czy zaproponowane metody można w prosty sposób rozszerzyć na inne klasy problemów?
2. Czy do modelowania procesów przedstawionych w pracy doktorskiej można również zastosować metody sztucznej inteligencji?

3. Jak czasochłonne były obliczenia dla symulacji poszczególnych modeli? Czy możliwe było przeprowadzenie symulacji dla większej liczby różnych konfiguracji parametrów oraz rozmiarów siatek?
4. Jakie byłoby zwiększenie kosztu obliczeniowego w przypadku przeprowadzania eksperymentów dla geometrii 3D?
5. Proszę dokładniej opisać pochodzenie i szczegóły zbioru danych przedstawionego na rysunku 10. Należy także doprecyzować znaczenie poszczególnych kolorów, ponieważ brakuje legendy.
6. Proszę dokładniej wyjaśnić problemy związane z modelowaniem fali uderzeniowej po opuszczeniu materiału wybuchowego.
7. Jakie są największe ograniczenia w praktycznym zastosowaniu uzyskanych wyników?
8. W jaki sposób można dalej rozwijać i ulepszać opracowane metody?
9. Proszę doprecyzować, jaką wielkość reprezentuje C we wzorze (60).
10. Czy do symulacji wybranych procesów można wykorzystać metodę elementów skończonych?
11. Czy uwzględniono wpływ osadów na proces dyfuzji w procesie powstawania wzorców Liesganga?

6. Uwagi szczegółowe na temat błędów o charakterze redakcyjnym i edytorskim

- Str. 7: "hiperbolicznych"
- Str 22: "współczynnyk"
- Str 23: we wzorze (24) należy opisać znaczenie symbolu θ
- Str 23: "nie rozpuszcza się układzie"
- Str 24: wyjaśnić we wzorach (26) znaczenie symboli a i b
- Str 29: "porcesu"
- Str 30: "goometrycznym"
- Str 30: "siatke"
- Str 33: "wyciągnięte"
- Str 50: "uderzenioowej"
- Str 50: "rówanania"
- Str 53: "okreslania"
- Str 53: "wynikając"
- Str 54 "geometri"
- Str 55: "początkowa"
- Str 64: "detonacyjnengo"
- Str 64: "nadciśnieinia"
- Str 68: rys. 14 jest przed rys. 13
- Str 68: rys 14 jest nieczytelny
- Str 69: rys. 13 jest za mały i nieczytelny
- Str 73: "ekperymentów"
- Str 77: "Wystapienie"

Str 80: "dodwłnej"
Str 82: "wilekości"
Str 85: "wcześniejszym"
Str 85: "wystapienia"
Str 86: "warotści"
Str 87: "mozna"
Str 89: "wielkosci"
Str 94: "dla trzech chwilach czasowych"
Str 97: "powodowawły"
Str 98: "funckji"
Str 98: "występuję"
Str 100: "pionwej"
Str 100: "pionwej"
Str 101: "prawdopodobieństwa"
Str 103: "przedstwaiono"
Str 103: "zbiliżony"
Str 108: "obejmumą"
Str 111: "rzeczywitsy"
Str 114: "umożliwło"
Str 114: "reakcji"
Str 115: "trkacie"
Str 115: "akcpetacji"

7. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje ważny z punktu widzenia dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja problem naukowy. Wyniki przedstawione w rozprawie wnoszą oryginalny wkład do dyscypliny naukowej. Doktorant udowodnił, że posiada szeroką wiedzę z obszaru reprezentowanej dyscypliny oraz potrafi rozwiązywać trudne problemy naukowe stosując przyjęte w nauce metody poznawcze i badawcze.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie recenzowanej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Marek Kowal