

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Suszyński
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2
75-453 Koszalin

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Danylo Lizanetsa
pt. "Analiza obrazowa do wieloparametrycznej charakteryzacji komórek w układach mikrofluidycznych"

1. Wstęp

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie pisma RDN AEE/47/2022 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica, z dnia 20.04.2022 r. Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr inż. Danylo Lizanetsa pt. "Analiza obrazowa do wieloparametrycznej charakteryzacji komórek w układach mikrofluidycznych", która została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dra hab. inż. Rafała Walczaka na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Ocena rozprawy została opracowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami oraz zgodnie z ogólnymi zasadami oceny prac doktorskich przez recenzentów.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena ogólna

Przedłożona do oceny dysertacja napisana jest w języku polskim, liczy 135 stron i zawiera 5 rozdziałów, spis literatury, wykaz akronimów oraz spis rysunków.

W pierwszym rozdziale Autor charakteryzuje obszar badań związany z systemami mikroprzepływowymi a w szczególności z analizą obrazów dedykowaną tym systemom. Podkreśla systematyczny wzrost liczby publikacji związanych z tą dziedziną. Zdefiniowano w nim również listę cech niezbędnych do prawidłowej identyfikacji komórek. Ten krótki rozdział kończy się sformułowaniem celów pracy, którymi oprócz analizy literatury było opracowanie algorytmów przetwarzania oraz analizy obrazów mikroskopowych lub tzw. obrazach holograficznych komórek a także badanie efektywności opracowanych procedur i narzędzi programistycznych, które je realizują.

Rozdział drugi zawiera analizę publikacji dotyczących systemów wizualizacji i analizy obrazowej komórek. To opracowanie powstało w oparciu o przegląd literatury naukowej i zawiera 35 pozycji ze specyfikacją rodzajów układu optycznego, wykrywanych cech oraz

źródeł danych (obraz lub sekwencja obrazów). Znajduje się tu również ogólna, ale istotna z punktu widzenia ich funkcjonalności, specyfikacja narzędzi programistycznych dedykowanych tym systemom. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono przykłady układów mikroprzepływowych i ich zastosowań do identyfikacji i badania wybranych cech komórek. Omówiono tam również wybrane funkcjonalności programów wspierających pozyskiwanie i analizę danych dedykowanych tym układom. W podsumowaniu rozdz. 2, w oparciu o wyniki analizy danych literaturowych, zdefiniowano ogólne wymagania stawiane właściwościom optycznym systemów mikroprzepływowych, kontrastowi komórek względem tła, dynamice zmian treści obrazów w stosunku do szybkości akwizycji danych oraz doprecyzowano cele pracy przez wyliczenie najważniejszych funkcjonalności opracowywanych procedur przetwarzania jakie będą przedmiotem zainteresowania Autora: detekcja i śledzenie komórek, pomiar ich cech i analiza deformacji.

W rozdziale trzecim opisano wybrane metody przetwarzania i analizy obrazów, które Autor uznał za niezbędne i wystarczające do osiągnięcia celów badawczych. Znalazły się tam opisy regulacji jasności i zmiany histogramu, transformacji obrazów RGB do postaci monochromatycznej czy maskowania a także opis narzędzi niezbędnych do progowania, poprawy stosunku sygnału do szumu, detekcji krawędzi, konturowania, eliminacji tła niskoczęstotliwościowego, separacji połączonych komórek, filtracji odwrotnej przy rekonstrukcji obrazu z tzw. hologramu, pomiaru podobieństwa (dopasowanie wzorców), śledzenia ruchu komórek. Wszystkie opisane metody są dedykowane obrazom w odcieniach szarości. To ograniczenie jest niezrozumiałe ponieważ barwa jest zwykle istotną cechą w procesie segmentacji i rozpoznawania komórek. Autor nie wspomina tu również o metodach automatycznego pozycjonowania (ustalania określonej pozycji analizowanych obiektów przed rozpoznaniem), mimo, że opisane przez niego miary podobieństwa (rozdz. 3.2.1) są wrażliwe na skalę i obrót obiektu względem wzorca. Wśród narzędzi filtracji górno- i środkowoprzepustowej, zabrakło dyskretnej transformaty falkowej 2D, która pozwala na skuteczną eliminację tła niskoczęstotliwościowego i jeśli to konieczne, tłumienie szumu wysokoczęstotliwościowego. Rozgrupowywanie komórek za pomocą algorytmu wododziałowego jest dobrym pomysłem ponieważ obraz połączonych komórek zwykle zawiera krawędź, która je separuje a wzdłuż której ta metoda skutecznie tworzy „tę” dzielącą dwa segmenty. Szkoda jednak, że Doktorant nie zbadał skuteczności innych podobnych algorytmów obszarowych - rozrostu obszaru, split & merge i ich połączenia. Mogłoby to umożliwić automatyzację segmentacji, bez konieczności ręcznego zaznaczania każdej z połączonych komórek (minimów poszczególnych segmentów) i pozytywnie wpłynąć na jakość konturowania.

Do rekonstrukcji obrazów holograficznych komórki zaproponowano filtrację odwrotną, która w opisanym przypadku ma charakter filtracji wysokoczęstotliwościowej. Na str. 57 (brak numeracji wzorów) przedstawiono postać analityczną widma Fouriera filtru odwrotnego do dekonwolucji. Trudno ocenić skuteczność tej metody w oparciu o obraz z rys. 3.17, ale jej niedoskonałość jest widoczna na rys. 4.48. W tych przypadkach zaproponowana metoda filtracji nie sprawdziła się. W dysertacji brakuje odniesienia do tego problemu. Być może należałoby wykorzystać inne metody wyznaczania filtru odwrotnego - w przypadku, gdy zmiana kontrastu komórki względem tła ma charakter uskoku, można to zrobić w oparciu o analizę zmian sygnału holograficznego w kierunku prostopadłym do krawędzi komórki. Wynik filtracji odwrotnej ma wpływ na detekcję, pomiar cech i rozpoznawanie dlatego jest to bardzo ważny etap przetwarzania obrazów holograficznych i należałoby poświęcić mu więcej uwagi.

W rozdziale tym przedstawiono również miary podobieństwa oparte o pomiar kwadratu różnicy wartości obrazów oraz korelację i kross - korelację. Są to metody wrażliwe na przekształcenia afiniczne. W przypadku komórek można przyjąć, że ze względu na sposób rejestracji mają one stały rozmiar, ale ich położenie i orientacja (obróć) ulegają zmianie i dlatego należałoby je zneutralizować (zapewniające stabilność pozycji i orientacji) lub użyć deskryptorów niezależnych od tych parametrów. Takie deskryptory są dostępne w bibliotece OpenCV w klasie ASIFT (Affine Scaill Invariant Feature Transform).

W rozdziale 3.2 oprócz krótkiego opisu metody przepływu optycznego i klatek różnicowych przedstawiono metodę śledzenia wieloparametrycznego. W tym przypadku oprócz współrzędnych komórek uwzględniane są ich wymiary i orientacja, a także struktura wewnętrzna. Do oceny podobieństwa obiektów zastosowano miarę euklidesową (3.26, str. 62) z ważonymi cechami. Zwiększenie wymiarowości przestrzeni cech może przyczynić się do wzrostu skuteczności rozpoznawania ponieważ zmniejsza wrażliwość na błędy pomiaru poszczególnych cech. Współczynniki wagowe przypisane poszczególnym cechom są kluczowe dla poprawnej identyfikacji obiektów. Powinny być wyznaczone z uwzględnieniem istotności cech, z wykorzystaniem analizy statystycznej i szkoda, że nie zostały omówione w dysertacji.

Niezależnie od uwag do rozdz. 3 przedstawionych powyżej można uznać, że wybór metod do przetwarzania i analizy obrazów komórek jest ogólnie poprawny. Definiuje on możliwości wstępnego przetwarzania oraz identyfikacji wybranych cech i rozpoznania komórek i świadczy o posiadaniu przez Doktoranta kompetencji interdyscyplinarnych z obszaru biologii, technik mikroprzepływowych oraz przetwarzania sygnałów i narzędzi inteligencji obliczeniowej.

W rozdziale czwartym przedstawiono oryginalne wyniki badań pozyskane, w dużej mierze, dzięki programowi komputerowemu napisanemu przez Doktoranta. Rozdziały 4.1 i 4.2 zawierają opis interfejsu użytkownika (GUI) z wyszczególnieniem dostępnych w programie funkcji. Opis ma charakter instrukcji obsługi.

Aby w pełni zrozumieć możliwości programu, poznać rodzaje zaimplementowanych algorytmów oraz zakres ich parametryzacji niezbędny byłby kod źródłowy, diagram klas lub bardziej szczegółowy opis zaimplementowanych metod wyjaśniający wzajemne relacje pomiędzy funkcjami oraz rodzaje i zakresy ich parametryzacji. Lista metod oraz parametry powinny być spójne z tymi, które przedstawiono w rozdziale 3. Dysertacja w udostępnionej postaci nie daje możliwości oceny programu inaczej niż na podstawie przedstawionych w niej wyników przetwarzania i opisu parametrów.

W rozdz. 4.3 opisano wyniki analizy obrazów komórek drożdży, euglen oraz oocytów z wykorzystaniem napisanego przez Doktoranta programu komputerowego.

Na przykładzie drożdży pokazano wynik konturowania i separacji obrazów dwóch połączonych komórek z wykorzystaniem algorytmu wododziałowego. Przetwarzanie wykonano dla wydzielonego fragmentu obrazu. Obraz nie zawierał innych elementów oprócz dwóch komórek, które należało poddać separacji. Przetwarzanie było poprzedzone ręcznym oznaczeniem środków segmentacji. Stanowi to ograniczenie w procesie detekcji komórek w dużych skupiskach i szczególnie w przypadku ich śledzenia.

W dalszej części opisano możliwości detekcji i śledzenia kolonii euglen w oparciu o sekwencje obrazów zarejestrowanych dla cztero- i dziesięciokrotnego optycznego powiększenia obrazu. Opisano tu przykład nieudanej detekcji komórki z nierównomiernym tłem z wykorzystaniem progowania. Należy jednak zwrócić uwagę, że wykrycie przez progowanie dwóch komórek z różniącymi się znacznie poziomami tła zawsze powinno być poprzedzone jego wcześniejszą eliminacją. Analiza wpływu powiększenia optycznego (x4 i x10) na możliwość detekcji i pomiaru cech komórki wykazała, że w warunkach niskiej rozdzielczości

powierzchnia komórek jest sztucznie zaniżana. Do eliminacji tła wykorzystano dolnoprzepustowy w tym przypadku filtr Gaussa. Należy zwrócić uwagę, że jego użycie zawsze zmniejsza kontrast obiektów wysokoczęstotliwościowych co wpływa na zmniejszenie ich rozmiarów przy określonym poziomie progowania. Lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie do odtworzenia tła odpowiedniego wariantu filtracji statystycznej. Poprawna eliminacja tła poprawia skuteczność wykrywania konturów komórek. Detekcja komórek z wykorzystaniem filtracji krawędziowej oraz SSN okazała się, jak można było oczekiwać, skuteczniejsza od progowania. W tab. 4.1 przedstawiono zestawienie wyników poprawnej detekcji dla zbioru 205 komórek. Najgorsze wyniki uzyskano dla progowania. Dla metody z odejmowaniem tła niewłaściwie jednak zinterpretowano odsetek poprawnie wykrytych komórek (101%). W rzeczywistości wykryto 100% komórek oraz uzyskano dwa fałszywie dodatnie rozpoznania. W takim przypadku lepiej byłoby posłużyć się pojęciami takimi jak czułość i swoistość detekcji komórek.

W tym samym rozdziale pokazano wyniki domykania konturów z wykorzystaniem filtracji morfologicznej (zamknięcie). Przetwarzanie wykonano dla konturów z jednopikselowymi przerwami i było ono skuteczne. Trzeba jednak wiedzieć, że metoda ta nie będzie skuteczna przy większych ubytkach pikseli w konturze. W takich przypadkach poprawniejsza będzie rekonstrukcja krawędzi oparta o transformatę Hougha, wspomnianą w rozdz. 3. Niestety obie metody charakteryzują się niską wydajnością obliczeniową.

Opisano tu również wyniki śledzenia i pomiaru liczby oraz ruchliwości komórek euglen, w pierwszym i czternastym dniu ich hodowli (rys. 4.23). W oparciu o przedstawione wyniki (obrazy i wykres 4.23d) można zauważyć, że wyniki przetwarzania są jakościowo poprawne. Nie ma tu jednak odniesienia do żadnej metody referencyjnej więc trudno ocenić dokładność wyznaczonych, w ten sposób, cech populacji euglen. Podobnie jak w opisie śledzenia wieloparametrycznego (rozdz. 3.2.4) zabrakło tu informacji o sposobie parametryzacji metody. W szczególności zabrakło informacji o sposobie wyznaczania i wartościach współczynników wag (wzór 3.26).

Wyrażenia 4.2 definiuje sposób wyznaczania ruchliwości komórek. Z pewnością można ją tak wyznaczać, ale w związku z tym, że częstotliwość rejestracji zdjęć może się zmieniać w szerokim zakresie większą wartością praktyczną miałoby odniesienie tego parametru do czasu zamiast liczby zdjęć (kadrów).

Bardzo duży wpływ na końcowy wynik przetwarzania ma jakość danych. Zakłócenia jasności tła takie jak na obrazie z rys. 4.23a (pulsacja intensywności oświetlenia), ale także niejednorodność powierzchniowa oświetlenia czy zbyt niska rozdzielczość opisane w innych przykładach, powinny być neutralizowane na etapie pomiarów. Wydaje się, że Autor, w kilku przypadkach, rozwiązuje problemy, których można było uniknąć przez lepszą parametryzację pomiarów.

Rozdz. 4.3.3 zawiera uproszczony rachunek błędów pomiaru odległości na obrazach dyskretnych oraz analizę skuteczności detekcji krawędzi komórek z niskim kontrastem warstwy zewnętrznej. Porównano i wykazano skuteczność wybranych metod detekcji konturu zewnętrznego, wnętrza i jądra komórki oraz ich pomiarów.

W kolejnym rozdziale (4.4) opisano wybrane problemy związane z analizą układów bezsoczewkowych oraz metodę symulacji obrazu holograficznego obiektu 2D z możliwością parametryzacji poziomu absorpcji, ugięcia i rozpraszania światła. Model uwzględnia oświetlenie stożkowe. Obrazy holograficzne pozyskano dla masek w kształcie pierścienia, koła i kwadratu o wymiarach 50-270 μm . Charakteryzowały się one wysokim kontrastem, jednorodnym tłem i zakłóceniami o stosunkowo wysokiej amplitudzie. Najważniejszym elementem tego badania była próba filtracji odwrotnej z wykorzystaniem filtrów Fresnela-

Fouriera oraz Kirchhoffa-Fresnela, której celem było odtworzenie oryginałów obrazów. Filtracja okazała się nieskuteczna. Na obrazach (rys. 4.48) można zauważyć światłocienie charakterystyczne dla filtrów gradientowych i płaskorzeźby. Autor wykazał, że wielkość cienia koreluje z odległością maski od matrycy detektora (rys. 4.49) ale nie wyjaśnia to przyczyn niepowodzenia. Ten problem nie został skutecznie rozwiązany i ogranicza to możliwości przetwarzania obrazów holograficznych. Mimo to, w ostatniej części opisującej wyniki badań (rozdz. 4.4.4) wykazano skuteczność detekcji konturów w obrazach holograficznych oocytu i kulek agarozowych.

W ostatniej części dysertacji (rozdz. 5) Autor podsumowuje wyniki swojej pracy, do których zalicza przegląd literatury związanej z przedmiotem rozprawy, analizę możliwości i skuteczności wybranych metod przetwarzania obrazów z uwzględnieniem specyfiki techniki lab-chipów, napisanie programu komputerowego realizującego wybrane metody przetwarzania obrazów mikroskopowych i holograficznych a także eksperymentalną weryfikację zaimplementowanych metod m. in. do analizy detekcji i analizy wybranych parametrów komórek.

2.2. Oryginalne elementy rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera rezultaty stanowiące oryginalny wkład Autora do dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika zarówno w obszarze metod badawczych jak i wyników badań. Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

1. Ogólnie oprawny wybór metod dostosowanych do potrzeb analizy cech komórek w układach mikroprzepływowych;
2. Zaproponowanie wieloparametrycznej analizy cech komórek w procesie ich śledzenia;
3. Szczegółową analizę literatury związanej z przedmiotem rozprawy doktorskiej i trafność cytowań;
4. Opracowanie modelu rozproszenia światła w obrazowaniu holograficznym;
5. Napisanie programu implementującego wybrane metody z wykorzystaniem bibliotek OpenCV, gotowych narzędzi inteligencji obliczeniowej (SSN) i praktyczną weryfikację metod przetwarzania.

2.3. Uwagi szczegółowe i ocena poziomu edytorskiego.

Tematyczny układ rozprawy nie zawsze jest przejrzysty i logiczny. Autor nie ustrzegł się powierzchownych analiz lub braku kontynuacji niektórych wątków. Podsumowania rozdziałów są bardzo skrótowe i powierzchowne. Dysertacja zawiera szereg błędów, które mogły być poprawione na etapie edycji tekstu. Analizę rozprawy utrudnia niekonsekwentne czasem użycie symboli indeksów i zmiennych. Poniżej przedstawiono listę zauważonych niedostatków rozprawy doktorskiej:

1. Niedokończone wątki:

- Model rozpraszania światła w obrazowaniu holograficznym (rozdz. 4.4.1) – w pracy przedstawiono model ale brak informacji na temat jego wykorzystania do symulacji obrazów holograficznych i np. testowania parametrów filtracji odwrotnej. Model w tej postaci można traktować jak koncepcję, wymagającą weryfikacji i rozwoju. W podsumowaniu końcowym Autor potwierdza, że badania związane z modelem będą kontynuowane;

- SSN – wątek SSN nie pojawia się w opisie metod przetwarzania ale w pracy przedstawiono przykładowe wyniki jej użycia do detekcji krawędzi. Autor nie uzasadnia wyboru konkretnych parametrów SSN i bazy wiedzy, która była użyta do jej uczenia.
- Transformata Hougha – jest wymieniona w rozdz. 3. ale Autor nie pokazuje przykładów jej stosowania;
- Śledzenie wieloparametryczne – opisano tę metodę (rozdz. 3.2.4), ale zabrakło informacji o sposobie jej parametryzacji, a w części doświadczalnej, w rozdz. 4.3.2, pominięto ten wątek.

2. Niewłaściwe terminy matematyczne i techniczne:

„komputerowe widzenie” lub „wizja komputerowa”, zamiast „obrazowanie komputerowe” lub w innych przypadkach „komputerowa analiza i rozpoznawanie obrazów” – np. str. 6, 45,

„Laplacjan” lub „Laplacjan gaussianów” zamiast Laplasjan – str. 43, „transformata Fourie’go” – str. 57, „rząd” zamiast „wiersz” – str. 61, „prognozowanie obrazów” – str. 45, „odwrócony mikroskop” – str.22,, „ „kierunek elipsy” zamiast „oś główna elipsy” – rys. 3.8, str.49.

3. Dwuznaczność symboli:

x, y – indeksy pikseli w równaniu 3.17, x, y – oznaczenia punktów – str. 62

4. Inne błędy językowe:

„... komórek migrujących w poszczególne puste obszary”, „powinni być wykonane” – str. 37,

”...istnieje możliwość obliczenia entropii dla pojedynczego piksela jako dla niewielkiego...otoczenia tego piksela”- str. 46, „...kontur jest podmieniony na uproszczoną jego wersje...” str. 47, „zgodnie z wyrazem” zamiast „zgodnie z wyrażeniem” – str. 57, „zbiorach obrazów” zamiast „sekwencji obrazów” – str.57, „...bliska do zera...” – str. 63, „wytrenowany zbiór danych” zamiast „wytrenowana SSN w oparciu o zbiór danych” – str. 75, „różnicowanie klatek” zamiast „odejmowanie klatek” - str. 76, „skała krawędzi” – str. 84, „...komórka jest lokalizowana przez znalezienie dokładnego jej obwodu” – str. 25

5. Niezrozumiała definicja:

„Rozmiar krawędzi - w tym przypadku – różnica jasności pomiędzy pikselami obrazu po obu stronach krawędzi” – stopka na str. 85

6. Literówki:

„przykładopwy” – str.32, „okręg” – str.49,

7. Wzory matematyczne:

Wzory 3.10 i 3.11 zamieniono miejscami, błędne indeksy w 3.28 na str., 63

8. Brak numeracji wzorów - str. 57

3. Podsumowanie

Przedmiotem rozprawy są metody przetwarzania obrazów pozyskiwanych w układach mikroprzepływowych oraz ich programowa implementacja i weryfikacja skuteczności. Autor, w oparciu o analizę literatury oraz doświadczenia w obszarze badań komórek w systemach mikrofluidycznych zaproponował zestaw metod, które uznał za istotne i skuteczne z punktu widzenia specyfiki pozyskiwania oraz przetwarzania obrazów mikroskopowych i holograficznych. Przedstawił konkretną listę metod oraz je opisał. Są one przeznaczone do detekcji komórek, ich śledzenia oraz przetwarzania wstępnego. Wybór metod świadczy o tym,

że Autor posiada wiedzę oraz doświadczenie w obszarze komputerowej analizy i rozpoznawania obrazów, rozumie specyfikę danych źródłowych i celów przetwarzania. Kompetencje te zostały wykorzystane m.in. w procesie wytwarzania programu komputerowego, który powstał w związku z pracą badawczą. Program ten jest bardzo istotnym elementem badań ponieważ stanowi odpowiednik stanowiska laboratoryjnego niezbędnego do weryfikacji protokołów przetwarzania uwzględniających sekwencje pojedynczych metod i ich parametrów. Wykonanie programu implementującego liczne metody przetwarzania, dostosowanie formatów danych wejściowych i wyjściowych do potrzeb użytkownika, opracowanie spójnej funkcjonalności odzwierciedlonej częściowo w GUI było czasochłonne i wymagało kompetencji programistycznych. Program został wielokrotnie użyty w celach testowych. W dysertacji pokazano reprezentatywne przykłady wyników przetwarzania. Potwierdzają one, w dużej mierze, skuteczność wybranych metod i sposobu ich parametryzacji. Zarówno metody jak i sam program wymagają korekt i uzupełnień, powinny być doskonałe, ale jednocześnie stanowią dobrą bazę do dalszych prac, które Doktorant zdefiniował we wnioskach końcowych.

Doktorant jest współautorem 17 publikacji, w tym trzech z tzw. listy filadelfijskiej. Są to publikacje współautorskie, prezentują treści odnoszące się do dysertacji, a szczególnie do jej rozdziału czwartego. Wpływ wyników badań mgra Danylo Lizanetsa na merytoryczną wartość artykułów jest znaczący.

4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że praca doktorska mgra inż. Danylo Lizanetsa pt. "Analiza obrazowa do wieloparametrycznej charakteryzacji komórek w układach mikrofluidycznych" stanowi oryginalne rozwiązanie detekcji i oceny parametrycznej komórek w układach mikroprzepływowych oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, opisane w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami.

W oparciu o lekturę pracy doktorskiej Pana mgra inż. Danylo Lizanetsa stwierdzam, że posiada on usystematyzowaną wiedzę ogólną z obszaru dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz kompetencje do prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę przedstawione w dysertacji wyniki badań i uwzględniając przedstawione w recenzji niedostatki moja końcowa ocena rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Danylo Lizanetsa jest pozytywna.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.


Prof. dr hab. inż. Zbigniew Suszyński