

## Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: „*Implementation of Shear Wave Elastography for Point-of care Ultrasound Imaging*”

Autor rozprawy: mgr inż. Damian Cacko

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Ranachowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Lewandowski

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Cacko, która została opracowana na zlecenie wyrażone w piśmie z dnia 6 grudnia 2023r. sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego. Rozprawa napisana została w języku angielskim.

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska podejmuje nowatorski temat badań nad implementacją elastografii fali ścinania w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych, działającej w czasie rzeczywistym. W ramach rozprawy Doktorant zrealizował prace projektowo-konstrukcyjne i badawcze ukierunkowane na rozwiązanie powyższego problemu. Rozprawa ma charakter wdrożeniowy i obejmuje wyraźnie wydzieloną część teoretyczną, praktyczno-konstrukcyjną oraz eksperymentalno-badawczą. W teoretycznej części rozprawy Doktorant opisał podstawy fizyczne obrazowania elastyczności tkanek za pomocą fal ultradźwiękowych, dokonał przeglądu rozwijanych i wykorzystywanych obecnie ultradźwiękowych metod elastograficznych wraz z ich klasyfikacją według sposobu pobudzania do drgań tkanki oraz realizacji pomiarów i obliczeń; szczegółowo opisał również technikę dwuwymiarowej elastografii fali ścinania (SWE) na podstawie obszernej analizy literaturowej w aspekcie stosowanych sekwencji nadawczo-odbiorczych, metody przetwarzania danych i czynników wpływających na jakość obrazowania i bezpieczeństwo badania pacjentów *in vivo*. W praktycznej części rozprawy Doktorant z powodzeniem zaimplementował metodę SWE w nisko-kosztowym przenośnym systemie obrazowania ultradźwiękowego skonstruowanym w postaci w pełni konfigurowalnej platformy badawczej z procesorem graficznym (GPU) i oprogramowaniem wykorzystującym opracowany wieloetapowy algorytm rekonstrukcji obrazu elastograficznego. W eksperymentalnej części rozprawy Doktorant przeprowadził badania pod kątem analizy jakości obrazowania opracowanego systemu za pomocą specjalistycznego fantomu do badań elastograficznych z obszarami struktury skalibrowanej pod kątem określonych wartości modułu Younga. Dokonał również oceny wydajności systemu pod kątem szybkości rekonstrukcji i zbadał wpływ najistotniejszych parametrów rekonstrukcji na czas przetwarzania i jakość obrazu. Doktorant przeanalizował również zależność zużycia energii systemu od jakości obrazowania, co pozwoliło mu sformułować ogólne wnioski umożliwiające znalezienie kompromisu między tymi czynnikami w kontekście realizacji tezy pracy.



Tematyka rozprawy jest istotna i aktualna zarówno z perspektywy badawczej jak i aplikacyjnej. Dysertacja napisana jest w języku angielskim, zawiera łącznie 148 stron i składa się z 5 rozdziałów wraz ze stroną tytułową, podziękowaniami, spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisami rysunków, tabel, skrótów i oznaczeń, bibliografią oraz dodatkiem prezentującym parametry i sposób pomiarów fantomu Elasticity QA Phantom model 049A firmy CIRS, wykorzystanego przez Doktoranta do testowania obrazowania elastograficznego za pomocą opracowanej metody i urządzenia.

**Rozdział 1 (Wprowadzenie)** obejmuje 22 strony i zawiera ogólne wprowadzenie do tematu rozprawy dotyczące fizycznych podstaw obrazowania elastyczności tkanek za pomocą ultradźwięków. Autor przedstawił tutaj również motywację związaną z podjęciem tematyki rozprawy, sformułował tezę oraz cele wyznaczone do jej udowodnienia. Rozdział zawiera też zwięzły opis układu rozprawy.

W **Rozdziale 2 (Technika elastografii fali ścinania)** obejmującym 19 stron rozprawy, Doktorant dokonał przeglądu rozwijanych i wykorzystywanych obecnie ultradźwiękowych metod elastograficznych oraz szczegółowo opisał technikę dwuwymiarowej elastografii fali ścinania (SWE) na podstawie obszernej analizy literaturowej.

W kolejnym 31-stronicowym **Rozdziale 3 (Implementacja elastografii fali ścinania w przenośnym systemie badawczym)** Doktorant opisał implementację dwuwymiarowej techniki elastografii fali ścinania w opracowanej do tego celu przenośnej ultradźwiękowej platformie badawczej z procesorem graficznym (GPU), rozwijanej jako konfigurowalny system obrazowania ultradźwiękowego pod nazwą us4R-lite. Przedstawił również zastosowaną metodykę projektowania i konstrukcji układów elektronicznych oraz narzędzia informatyczne i sprzętowe wykorzystane do realizacji tego celu. Rozdział kończy się podsumowaniem zaprojektowanego podziału przetwarzania danych pomiędzy programowe i sprzętowe części systemu.

W najbardziej obszernym i istotnym **Rozdziale 4 (Prace eksperymentalne)** liczącym 36 stron, Autor dokonał weryfikacji poprawności działania opracowanego przenośnego systemu elastografii fali ścinania na podstawie eksperymentów obejmujących ocenę jakości obrazowania z wykorzystaniem specjalistycznego fantomu testowego, ocenę wydajności systemu pod kątem szybkości rekonstrukcji oraz badanie wpływu najistotniejszych parametrów rekonstrukcji na czas przetwarzania i jakość obrazu. Pozwoliło to Doktorantowi na analizę i dobór odpowiednich wartości parametrów zapewniających kompromis pomiędzy czasem przetwarzania a jakością obrazu i umożliwiającymi działanie systemu w czasie rzeczywistym.

**Rozdział 5 (Podsumowanie)** stanowi 7-stronicowe podsumowanie przeprowadzonych badań, w którym Doktorant w syntetyczny sposób opisał wykonane prace, uzyskane rezultaty i osiągnięcia, wykazując udowodnienie postawionej tezy.

Rozprawę uzupełnia 13-stronicowa **Bibliografia**, która liczy 207 pozycji. Literatura przedmiotu cytowana przez Doktoranta jest dobrana prawidłowo i w znakomitej większości są to pozycje anglojęzyczne.

Układ rozprawy jest przemyślany i nie budzi zastrzeżeń. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres zostały wyczerpująco przedstawione. Zagadnienia związane z wprowadzeniem do tematu rozprawy, przedstawieniem tezy, celu i metodyki pracy, przeglądem ultradźwiękowych metod elastograficznych oraz szczegółowym opisem techniki dwuwymiarowej elastografii fali ścinania zostały zawarte w 2 rozdziałach rozprawy (**1, 2**) liczących łącznie 41 stron (tj. ok. 28 % całej rozprawy). Zagadnienia bezpośrednio związane z praktyczną i eksperymentalną stroną rozprawy obejmującą implementację metody SWE w przenośnym systemie obrazowania ultradźwiękowego, badania jakości obrazowania, wydajności i zużycia energii opracowanego systemu, zawarte zostały w 3 rozdziałach rozprawy i w dodatku do rozprawy (**3, 4, 5, Dodatek A**) liczących łącznie 76 stron (tj. ok. 51 % całej rozprawy).



Rozprawa dotyczy badań z zakresu aktualnych i najnowszych osiągnięć nauki w realizowanym przez Doktoranta obszarze tematycznym i świadczy o szerokiej znajomości zagadnień literatury przedmiotu w interdyscyplinarnym zakresie ultradźwiękowych metod obrazowania diagnostycznego, elektroniki, informatyki, przetwarzania sygnałów, akustyki, mechaniki i fizyki, co tematycznie zawiera się w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Nieinwazyjna i nieszkodliwa elastografia fali ścinania w czasie rzeczywistym, zaimplementowana w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych jest pożądanym narzędziem w diagnostycznych badaniach medycznych, ponieważ umożliwia pozyskiwanie jednocześnie jakościowych i ilościowych informacji zwrotnych w postaci wysokiej jakości obrazów zmian patologicznych w wizualizowanym obszarze wraz z informacją o ich właściwościach sprężystych, co jest bardzo pomocne w diagnozowaniu zmian patologicznych.

## 2. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W wyniku szybkiego rozwoju technologicznego producenci ultradźwiękowych urządzeń medycznych rozwijają coraz to nowe systemy, wyposażone w coraz więcej różnorodnych ultradźwiękowych trybów obrazowania wspomagających szybkie diagnozowanie zmian patologicznych w ciele ludzkim *in vivo*. Typowe obrazowanie ultrasonograficzne w trybie B jest echograficznym obrazowaniem jakościowym i jako takie, jest zdolne do wizualizacji względnych zmian impedancji akustycznej tkanki, które decydują o odbiciu i rozpraszaniu fali ultradźwiękowej na granicach niejednorodności. Szczególnie pożądane w diagnostyce medycznej są tryby obrazowania umożliwiające ilościową wizualizację rozkładu określonych wartości parametrów fizycznych tkanki, które zmieniają się w wyniku różnych patologii czy nowotworzenia. Do takich trybów należy elastografia fali ścinania (SWE), która jest przedmiotem rozprawy podjętej przez Doktoranta. W diagnostyce medycznej pożądane jest wykorzystywanie coraz to mniejszych urządzeń, pobierających niewiele energii, umożliwiających wyświetlanie obrazu na komputerach przenośnych, tabletach, czy smartfonach. Kilka firm na świecie produkuje już ultrasonografy o zadowalającej jakości obrazu i wielu różnych trybach obrazowania (łącznie z obrazowaniem przepływu krwi), które wbudowane są w obudowy sond ultradźwiękowych. Akwizycja danych pomiarowych oraz ich przetwarzanie realizowane jest za pomocą odpowiednio zoptymalizowanych układów elektronicznych o miniaturowych rozmiarach i niewielkim poborze energii. Przenośny komputer, tablet czy smartfon wyświetla obraz ultrasonograficzny przesyłany za pomocą złącza USB lub nawet bezprzewodowo, z wykorzystaniem połączenia WiFi. Elastografia fali ścinania (SWE), ze względu na konieczność generowania sekwencji impulsów o dużej energii oraz konieczność wykonywania skomplikowanych obliczeń związanych z przetwarzaniem sygnałów i rekonstrukcją obrazu implementowana jest obecnie tylko w stacjonarnych i drogich ultrasonografach produkowanych przez światowych potentatów. Doktorant podjął nowatorskie i istotne badania związane z możliwością wdrożenia dwuwymiarowej elastografii fali ścinania (SWE) przy użyciu przenośnej ultradźwiękowej platformy badawczej, która pozwoliła mu na analizę i dobór odpowiednich wartości parametrów zapewniających kompromis pomiędzy czasem przetwarzania a jakością obrazu i umożliwiającą działanie systemu w czasie rzeczywistym.

Za cele rozprawy Autor przyjął:

- wdrożenie dwuwymiarowej elastografii fali ścinania (SWE) przy użyciu przenośnej ultradźwiękowej platformy badawczej us4R-lite,
- opracowanie przetwarzania danych zapewniającego możliwości dwuwymiarowego obrazowania SWE w czasie rzeczywistym,
- dokonanie oceny i zoptymalizowanie implementacji techniki SWE 2D w celu przystosowania jej do użytkowania w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych.





W efekcie realizacji celów pracy Doktorant wykazał, że:

- dwuwymiarowa elastografia fali ścinania jest złożoną techniką obrazowania ultrasonograficznego, która charakteryzuje się surowymi wymaganiami sprzętowymi i koniecznością zapewnienia wysokiej wydajności obliczeniowej ze względu na ogromną ilość danych do przetworzenia i intensywny obliczeniowo charakter algorytmu rekonstrukcji obrazu,
- dzięki starannemu zaprojektowaniu sprzętu i oprogramowania systemu, dwuwymiarowe obrazowanie ultradźwiękowej elastografii fali ścinania w czasie rzeczywistym może być praktycznie zaimplementowane w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych poprzez wykorzystanie akcelerowanego przez procesor graficzny (GPU), zdefiniowanego programowo podejścia ultradźwiękowego,
- obrazowanie w czasie rzeczywistym dla metody SWE 2D jest możliwe dzięki wykorzystaniu przetwarzania równoległego przy użyciu GPU. Na podstawie wyników uzyskanych w tej pracy można oczekiwać, że wykorzystanie GPU do przetwarzania danych dla metod SWE 2D może skrócić czas przetwarzania nawet do 100 razy, w zależności od stopnia zrównoleglenia danych w algorytmie, wykorzystania technik optymalizacji i liczby zasobów GPU,
- rozwój metody SWE 2D przy użyciu przenośnej platformy badawczej o otwartej architekturze daje możliwości opracowania nowatorskich metod w obszarach akwizycji i przetwarzania danych obejmujących optymalizację generowania sekwencji impulsów o dużej energii, opracowanie nowych sekwencji akwizycji, walidację nowych podejść w algorytmach przetwarzania danych lub fuzję z innymi metodami obrazowania ultrasonograficznego w celu zwiększenia informacji diagnostycznych w złożonych zastosowaniach.

Na potrzeby realizacji wyznaczonych celów rozprawy Doktorant sformułował następującą tezę:

*„The real-time 2D shear wave elastography imaging can be practically implemented using a point-of-care device class by exploiting a GPU-accelerated, software-defined ultrasound approach.”*

*(tłum: „Dwuwymiarowe obrazowanie elastografii fali ścinania w czasie rzeczywistym może być praktycznie zaimplementowane w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych poprzez wykorzystanie akcelerowanego przez procesor graficzny (GPU), zdefiniowanego programowo podejścia ultradźwiękowego.”)*

Doktorant dążył do udowodnienia postawionej tezy poprzez realizację zadań naukowo-badawczych obejmujących implementację dwuwymiarowej techniki elastografii fali ścinania w opracowanej do tego celu przenośnej ultradźwiękowej platformie badawczej z procesorem graficznym (GPU), rozwijanej jako konfigurowalny system obrazowania ultradźwiękowego pod nazwą us4R-lite, badania poprawności działania opracowanego systemu na podstawie eksperymentów obejmujących ocenę jakości obrazowania z wykorzystaniem specjalistycznego fantomu testowego, ocenę wydajności systemu oraz badanie wpływu najistotniejszych parametrów rekonstrukcji na czas przetwarzania i jakość obrazu. Pozwoliło to Doktorantowi na dobór zestawu wartości parametrów umożliwiających działanie systemu w czasie rzeczywistym. W rezultacie Doktorant zrealizował cel rozprawy oraz udowodnił postawioną tezę wykazując, że dwuwymiarowe obrazowanie elastografii fali ścinania w czasie rzeczywistym może być praktycznie zaimplementowane w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych poprzez wykorzystanie akcelerowanego przez procesor graficzny (GPU), zdefiniowanego programowo podejścia ultradźwiękowego.

Według danych zawartych w bazie *Web of Science (WoS)* na dzień 04.02.2024r, Doktorant jest współautorem 4 publikacji, w tym 1 artykułu w czasopiśmie naukowym z listy JCR (*Applied Sciences: IF = 2.7, 100 pkt. na liście czasopism MEiN*) oraz 3 referatów z 2 konferencji międzynarodowych IEEE (IEEE International Ultrasonic Symposium 2023 w Montrealu; IEEE Joint Conference – Acoustics 2018



w Ustce). Według bazy *Web of Science* na dzień 04.02.2024, publikacje te **cytowane** były **5-krotnie** z wyłączeniem autocytowań, a indeks Hirsha Doktoranta wynosi 2. Wszystkie 4 publikacje mgr. inż. Damiana Cacko są pracami współautorskimi, co w obszarze wdrożeniowych działań eksperymentalno-badawczych wykorzystujących skomplikowane techniki obliczeniowe, pomiarowe i konstrukcyjne w zakresie zaawansowanych układów elektronicznych oraz ich programowania wskazuje na umiejętność twórczej pracy w zespole i jest istotne w szczególności przy realizacji projektów naukowo-badawczych. Dorobek publikacyjny Doktoranta potwierdza, że zdobył on szeroką wiedzę w zakresie tematyki swoich badań oraz że Jego osiągnięcia zostały zaprezentowane i zweryfikowane w środowisku naukowym poprzez Jego aktywny udział w 6 międzynarodowych, uznanych w świecie konferencjach naukowych i sympozjach (IEEE International Ultrasonics Symposium, International Congress on Ultrasonics, IEEE Joint Conference – Acoustics).

Za najważniejsze osiągnięcia i oryginalny dorobek Doktoranta uznaję:

1. Opracowanie dedykowanego 256-kanalowego podsystemu nadajnika dla przenośnej platformy badawczej us4R-lite w postaci zintegrowanego modułu rozszerzającego wykorzystującego układy scalone impulsatorów nadawczych nowej generacji jako urządzenia pobudzające nadawanie. Opracowanie to jest kluczowym elementem, który pozwolił na praktyczne wdrożenie techniki SWE, ponieważ umożliwił generowanie wysokoenergetycznego pobudzenia do wytwarzania impulsów pchających, które indukują fale ścinające w tkance.
2. Implementację kompletnego algorytmu rekonstrukcji obrazu dla metody SWE 2D do rekonstrukcji mapy sztywności przy użyciu danych RF jako danych wejściowych.
3. Analizę poprawności działania opracowanego przenośnego systemu elastografii fali ścinania na podstawie eksperymentów obejmujących: ocenę jakości obrazowania z wykorzystaniem specjalistycznego fantomu testowego, ocenę wydajności systemu pod kątem szybkości rekonstrukcji oraz zbadanie wpływu najistotniejszych parametrów rekonstrukcji na czas przetwarzania i jakość obrazu. Pozwoliło to Doktorantowi na dobór zestawu wartości parametrów zapewniających kompromis pomiędzy czasem przetwarzania a jakością obrazu i umożliwiającą działanie systemu w czasie rzeczywistym z rozdzielczością czasową 2.85 fps.

Osiągnięcia Doktoranta wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja i mają istotne znaczenie wdrożeniowe, ponieważ mogą zaowocować opracowaniem pierwszego lub jednego z pierwszych w świecie przenośnych systemów ultrasonograficznych z trybem dwumiarowej elastografii fali ścinania.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Moje uwagi krytyczne dotyczą błędów związanych z podanymi przez Doktoranta wzorami w rozdziale „2.4 Safety considerations” (Kwestie bezpieczeństwa):

1. wzór (2.9) jest błędny. Konstrukcja deskryptorów natężenia z uśrednieniem jego wartości w przestrzeni i/lub w czasie (w tym deskryptora  $I_{SPTA}$  oznaczającego szczytową wartość natężenia fali ultradźwiękowej w przestrzeni uśrednioną w czasie powtarzania impulsu) musi być zgodna z powszechnie znanym ogólnym wzorem na natężenie fali ultradźwiękowej.
2. wzór (2.10) opisujący wzrost temperatury tkanki w wyniku pochłaniania energii fali ultradźwiękowej jest błędny. Według takiego wzoru, zmiana temperatury musiałaby wyrażać się w jednostkach  $[(cm \cdot ^\circ C)/W]$ . W literaturze, która została podana przez Doktoranta jako źródło dla tego modelu [149] podany jest inny, prawidłowy wzór. Rozwinięcie tego prostego modelu (zob. C.R.Hill, J.C.Bamber, G.R. ter Haar - *Physical Principles of Medical Ultrasonics*), przy założeniu, że ciepło nie jest tracone w objętości tkanki przez przewodzenie, konwekcję, promieniowanie, perfuzję krwi, daje możliwość oszacowania



maksymalnego wzrostu temperatury  $\Delta T$  w tkance wskutek propagacji energii ultradźwięków w czasie  $\Delta t$ .

W związku z powyższymi uwagami, proszę o odniesienie się Doktoranta w dyskusji w czasie obrony rozprawy doktorskiej do kwestii definicji deskryptorów natężenia fali ultradźwiękowej spotykanych w literaturze, w normach i technicznych opisach urządzeń ultradźwiękowych oraz stosowanych w medycynie do oceny bezpieczeństwa oddziaływania ultradźwięków na tkanki *in vivo*. Wyniki obliczeń z zakresu bezpieczeństwa opracowanej metody SWE na podstawie pomiarów (rozdz. 4.1) wydają się prawdopodobne ale jeśli obliczenia zostały wykonane za pomocą błędnego wzoru (2.9), poproszę o ich skorygowanie i omówienie uzyskanych wyników w czasie dyskusji podczas obrony rozprawy.

Proszę również podczas obrony rozprawy o sprostowanie w kwestii prawidłowego zdefiniowania modelu szacowania maksymalnego wzrostu temperatury  $\Delta T$  w tkance wskutek propagacji energii ultradźwięków z rozwinięciem w zakresie osiągania przez tkankę równowagi cieplnej.

Biomechanika tkanki miękkiej w rozdz. 1.2.1 rozprawy została przedstawiona w sposób w zupełności wystarczający do wyjaśnienia zagadnień lepko-sprężystych właściwości tkanki w elastografii ultradźwiękowej. W czasie obrony rozprawy doktorskiej proszę jednak o dodatkowe przedstawienie definicji stałych Lamego i krótkie przedyskutowanie potrzeby ich stosowania do opisu sprężystych i lepko-sprężystych właściwości ośrodków.

Przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej. Skorygowanie ewentualnych błędów w obliczeniach deskryptorów natężenia spowoduje obniżenie ich wartości, a więc doprowadzi do uzyskania korzystniejszych wartości w kwestii limitów związanych z bezpieczeństwem opracowanej metody.

#### 4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Rozprawa jest napisana bardzo starannie, technicznym językiem angielskim, bez zbędnych ozdobników, z wykorzystaniem słownictwa adekwatnego do przejrzystego i zrozumiałego opisu podjętych przez doktoranta prac badawczych.

Redakcja rozprawy jest wzorowa, z czytelnymi ilustracjami dobrej jakości. Wyniki zostały przedstawione umiejętnie i przekonująco, a zagadnienia zaprezentowano w sposób jasny i zwięzły.

Wśród 148 stron rozprawy z trudem znalazłem zaledwie 4 następujące, drobne błędy redakcyjne:

1. str 24 – brak zamknięcia nawiasu po „(see Eq. 1.19”,
2. str 50, wzór (2.11) – szczytowe ciśnienie refrakcyjne powinno być pisane małą literą w postaci  $p_{r,0.3}$ , podobnie w tekście - pierwszy wiersz na str 51 (wielka litera kojarzy się z mocą),
3. str 111, Tab. 4.4 – wartości w tabeli są podane w sekundach, a nie w milisekundach, jak opisano,
4. str 122, wiersz po wzorze (4.9) – zmienną zapisano w tekście jako  $nch$ , a powinna zostać zapisana jak w równaniu (4.9),

oraz 1 błąd edycyjny na str 20, związany z brakiem opisu zmiennej  $\gamma$  (greckie ni) oznaczającej współczynnik (liczbę) Poissona i występującej w równaniu (1.9) i (1.10).

Przytoczone błędy nie powodują trudności w zrozumieniu zagadnień, czy też w interpretacji wyników i w kontekście wzorowej oceny całości redakcji pracy nie mają istotnego znaczenia.

#### 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Mgr inż. Damian Cacko w oryginalny sposób rozpracował problem naukowy posługując się szeroką wiedzą, umiejętnościami konstrukcyjnymi, właściwie dobranymi narzędziami informatycznymi oraz stosując zaawansowane metody obliczeniowe, metody przetwarzania sygnałów i techniki pomiarowe.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska, jej sposób realizacji wraz z uzyskanymi wynikami, analizami i wnioskami wykazują, że Autor posiada wysokie umiejętności związane ze sposobem prowadzenia badań naukowych, jak również wiedzę na zaawansowanym poziomie o charakterze interdyscyplinarnym dla dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych oraz o charakterze szczegółowym, związanym z obszarem prowadzonych badań naukowych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Postawiony w rozprawie problem naukowy został przez Autora szczegółowo przeanalizowany i rozpracowany, doprowadzając do praktycznego zaimplementowania trybu dwuwymiarowego obrazowania elastografii fali ścinania w czasie rzeczywistym w klasie przenośnych urządzeń ultrasonograficznych, zgodnie z postawionymi celami i tezą.

W konkluzji stwierdzam, że mgr inż. Damian Cacko udowodnił postawioną tezę oraz wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

Recenzowana rozprawa doktorska z nadmiarem spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W związku z nowatorską tematyką ocenianej rozprawy, której wynikiem jest oryginalne opracowanie wdrożeniowe oraz biorąc pod uwagę dorobek naukowy Autora, uważam, że praca ma znamiona pracy wybitnej i zasługuje na wyróżnienie. Badania przeprowadzone przez Autora stanowią istotny przyczynek badawczo-rozwojowy w zakresie ultradźwiękowych metod ilościowego obrazowania diagnostycznego oraz analizy i praktycznej weryfikacji możliwości ich zaimplementowania w nisko-kosztowych i przenośnych systemach ultrasonograficznych.

