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

Koszalin, 8. 08. 2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej Piotra Jóźwiaka pt.:

„Zastosowanie probabilistycznych metod do oceny losowości liczb otrzymanych z kwantowych generatorów liczb losowych"

1. Obszar problemowy rozprawy

Dynamiczny rozwój informatyki, a w szczególności szybki wzrost mocy obliczeniowej komputerów kwantowych, otwiera nowe możliwości rozwiązywania problemów obliczeniowych. Dotyczy to zwłaszcza problemów klasy NP-trudnych, których rozwiązanie na komputerach klasycznych wymaga co najmniej wykładniczego czasu obliczeń. Zastosowanie odpowiednich algorytmów kwantowych sprawia, że wybrane problemy – takie jak planowanie tras, zarządzanie portfelem inwestycyjnym czy optymalizacja łańcuchów dostaw – mogą być już obecnie rozwiązywane w trybie online.

Warto zauważyć, że obserwowany, znaczący wzrost mocy obliczeniowej komputerów kwantowych, obok wyżej wspomnianych korzyści, rodzi również poważne zagrożenia dla obecnie wykorzystywanych systemów kryptograficznych wykorzystujących pseudolosowe ciągi bitów. Wraz z dalszym rozwojem technologii kwantowej, komputery te mogą w niedalekiej przyszłości osiągnąć zdolność łamania nawet w czasie rzeczywistym powszechnie stosowanych algorytmów szyfrujących. To rosnące zagrożenie wymusza intensywny rozwój nowych rozwiązań kryptograficznych. Obejmuje ono zarówno projektowanie algorytmów odpornych na ataki kwantowe (czyli skutecznych wobec komputerów klasycznych i kwantowych), jak i rozwój metod testowania losowości w kwantowych generatorach liczb losowych (QRNG).

W związku z tymi oczekiwaniami szczególnego znaczenia nabiera potrzeba opracowania rygorystycznych testów jakości losowości. Testy te powinny łączyć dwa podejścia oparte na: probabilistycznych metodach typowych dla klasycznych generatorów pseudolosowych oraz metodach wykorzystujących splątane stany wielokubitowe. Równocześnie muszą też uwzględniać specyficzne, fizyczne właściwości procesu generowania losowości – takie jak wpływ temperatury, napięcia zasilania czy poziomu szumów. Klasyczne zaburzenia

wprowadzające deterministyczne domieszki do kwantowo generowanych ciągów losowych bitów deformują idealną kwantową losowość i są czynnikiem szkodliwym. Implikuje to potrzebę zidentyfikowania takich domieszek oraz próbę ich minimalizacji poprzez zarówno poprawianie technicznej implementacji generatora, jak też stosowanie metody tzw. wybielania ciągów losowych. Dla odróżnienia klasycznych domieszek od idealnej losowości kwantowej potrzebne są jednak stosowne, dedykowane testy losowości warunkujące jakość oceny przydatności obecnie dostępnych testów a zwłaszcza ich selektywności w odniesieniu do kwantowych ciągów losowych.

Proponowane w rozprawie podejście przyjmuje, że system testujący losowość implementuje probabilistyczny model oceny źródeł losowości ciągów generowanych przez QRNG. Przy tym założeniu rozważany w niej problem można zrekonstruować następująco:
Dana jest klasa kwantowych generatorów liczb losowych, których działanie opiera się na fundamentalnych zasadach mechaniki kwantowej, a zwłaszcza na bezwarunkowej nieprzewidywalności wyników pomiarów kwantowych, w tym pomiarów proponowanych w pracy splątanych stanów kwantowych. Zaletą generatorów opartych na splątaniu kwantowym jest możliwość niezależnego potwierdzenia ich kwantowego charakteru, m.in. poprzez testy naruszenia nierówności Bella. Gwarantuje to, że wytwarzane binarne ciągi liczb – zgodnie z założeniem – są niemożliwe do skompresowania oraz wolne od długozasięgowych korelacji, typowych dla ciągów pseudolosowych.
Poszukiwane jest rozwiązanie problemu sprowadzającego się do odpowiedzi na pytanie: Czy istnieje metoda testowania, która – w odróżnieniu od klasycznych statystycznych baterii testów – umożliwia zarówno wykrywanie subtelnych, deterministycznych domieszek w teoretycznie idealnych ciągach kwantowych zapewniając przy tym bezpieczną oraz publicznie weryfikowalną ocenę poziomu kwantowej losowości? Odpowiedź twierdząca na to pytanie umożliwia projektowanie zaawansowanych generatorów QRNG, opartych na fundamentalnych zasadach fizyki kwantowej, których działanie spełnia wymogi zarówno bezpieczeństwa, jak i wiarygodności wymaganej przez nowoczesne systemy kryptograficzne i wpisuje się w aktualny nurt badań nad kryptografią kwantową.

Reasumując, podjęty w rozprawie problem testowania i oceny jakości losowości ciągów generowanych przez kwantowe generatory liczb losowych jest zagadnieniem aktualnym i bardzo istotnym z perspektywy zapewnienia bezpieczeństwa kryptograficznego. Odpowiada na rosnącą potrzebę opracowania wiarygodnych metod weryfikacji losowości, dostępnych dla stron trzecich i funkcjonujących w środowisku o ograniczonym zaufaniu.

Uważam, że wybór tej problematyki jest w pełni uzasadniony – zarówno z poznawczego punktu widzenia, jak i licznych zastosowań praktycznych. W szczególności dotyczy to obszaru kryptografii postkwantowej i występujących w niej zagadnień projektowania algorytmów odpornych na ataki realizowane zarówno przy użyciu komputerów klasycznych, jak i kwantowych.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana praca liczy 204 stron i składa się z *Wstępu*, 7 rozdziałów, *Zakończenia* oraz liczącego 171 pozycji spisu cytowanej bibliografii. Jej cyfrowa wersja załączona na CD rozszerzona została o polsko- i anglojęzyczne streszczenia. W załączonym spisie cytowanej bibliografii występuje 10 współautorskich, anglojęzycznych publikacji Doktoranta (w tym jedna samodzielna). Wśród tych pozycji na szczególną uwagę zasługują prace opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach takich jak ***Scientific reports*** i ***Quantum Information Processing***, lokujących się na poziomach odpowiednio 140 i 100 punktów ministerialnych, a także prace przedstawione w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych rangi ***Core B***. Warto podkreślić, że przywołane wyżej publikacje mające interdyscyplinarny charakter łączący zagadnienia informatyki, fizyki kwantowej oraz statystyki, stanowią jedynie część dorobku Doktoranta obejmującego łącznie 24 pozycje. Zgodnie z danymi bazy ***Scopus***, prace te zostały cytowane 104 razy, co przekłada się na indeks Hirscha równy 4.

Z merytorycznego punktu widzenia, w rozprawie wyodrębnić można trzy zasadnicze części, odpowiednio o: *teoretycznym, empirycznym* i *rozwojowym* charakterze składające na przemyślaną, logiczną całość.

Część pierwsza, (obejmująca rozdziały 1 - 4) przedstawia swoiste wprowadzająco-systematyzujące kompendium pojęciowe tworzące solidne fundamenty dla zrozumienia zagadnień wykorzystujących: pojęcia losowości, teorii informacji, różnic między klasyczną a kwantową losowością, a także tradycyjnych narzędzi testowania. W części tej Doktorant:

- omawia klasyczne i kwantowe koncepcje losowości (od teorii von Misesa i Martina-Löfa po złożoność algorytmiczną Kołmogorowa-Chaitina) oraz analizuje różnice występujące między losowością a pseudolosowością,
- wprowadza w problematykę klasycznej i kwantowej teorii informacji ze szczególnym uwzględnieniem: entropii, stanów qubitowych, splątania oraz relatywistycznych aspektów pomiarów kwantowych,
- przedstawia klasyfikację i charakterystykę generatorów liczb losowych, tak pseudolosowych, jak i sprzętowych (opartych na efektach kwantowych),

- dokonuje szczegółowego przeglądu (uwzględniającego zarówno założenia teoretyczne, jak i znaczenie parametrów testowych) metod statystycznego testowania losowości (15 testów pakietu NIST STS (SP800-22), tzn. zestaw testów opracowany przez National Institute of Standards and Technology w dokumencie zatytułowanym Statistical Test Suite SP800-22).

Omawiana część, w interdyscyplinarnym ujęciu łączącym informatykę, fizykę, teorię informacji i statystykę wprowadzając kluczowe definicje losowości oraz zróżnicowane podejścia teoretyczne (statystyczne, algorytmiczne, kwantowe), przedstawia krytyczną ocenę obecnych metod testowania losowości akcentującą ich ograniczenia względem kwantowych źródeł. Do jej mankamentów zaliczyć należy zbytnią obszerność i niejednorodności stylu powodowaną przemieszaniem fragmentów filozoficznych, historycznych i technicznych nadających jej charakter encyklopedycznego przeglądu, nie w pełni zintegrowanego z celem rozprawy.

Części druga (obejmująca rozdział 5) tworząca centralną, eksperymentalno-diagnostyczną oś rozprawy, realizuje jej kluczowy cel badawczy podkreślając wagę empirycznego wkładu Doktoranta oraz pokazując wyraźne przejście od teorii do praktyki. Część ta zawiera:

- opis dwóch rzeczywistych kwantowych generatorów liczb losowych opartych odpowiednio na kwantowym szumie śrutowym oraz na splątaniu fotonów konstruowanych w Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych (zwane dalej NLTK) przy Politechnice Wrocławskiej,
- szczegółowe badania empiryczne umożliwiające analizę wygenerowanych ciągów binarnych,
- oryginalne interpretacje wyników zastosowania baterii testów NIST STS w arbitralnie wybranych metodach: zgodności rozkładu wartości p oraz proporcji wyników pozytywnych
- opis eksperymentu wprowadzenia kontrolowanych zaburzeń deterministycznych w kwantowych ciągach pozwalającego na ocenę skuteczności testów NIST STS w wykrywaniu dalekozasięgowych korelacji.

Przedstawione w tej części wyniki prac prowadzonych na realnych danych pochodzących z kwantowych generatorów (szum śrutowy, splątanie) wskazują, że statystyczne baterie testowe, jak NIST STS, nie są wystarczające do wykrywania subtelnych nielosowości specyficznych dla technicznie niedoskonałych implementacji kwantowych źródeł. Warto podkreślić, że oprócz wysokiej wartości poznawczej prowadzonych badań empirycznych na uwagę

zasługuje również nowatorskie podejście Doktoranta, który nie tylko stosuje testy, ale także testuje testy przez świadome wprowadzenie zakłóceń.

Do głównych niedostatków tej części rozprawy należy zaliczyć skrótową w stosunku do przedstawionego opisu analizę wyników przeprowadzonych testów NIST STS oraz brak syntetyzującego, tabelarycznego podsumowania ułatwiającego ocenę skuteczności różnych testów (np. tabeli porównawczej skuteczności testów w wykrywaniu zaburzeń). Brakuje również klasycznego porównania skuteczności poszczególnych testów w formie zestawienia ilościowego.

Część trzecia rozprawy (obejmująca rozdziały 6 i 7), stanowi próbę twórczego rozwinięcia wniosków płynących z wcześniej przedstawionych analiz oraz ukierunkowaną projekcję dalszych badań nad problematyką oceny losowości w systemach kwantowych. Ta część pracy nawiązuje do wcześniej przedstawionych wniosków dotyczących trudności w odróżnieniu kwantowej losowości od wysokiej jakości ciągów pseudolosowych. Ogranicza to skuteczność klasycznych testów statystycznych, takich jak baterie NIST, w szybkim i wiarygodnym rozpoznawaniu charakteru ciągu. Problem ten szczególnie uwidacznia się przy testowaniu ciągów z kwantowych generatorów w czasie rzeczywistym — analiza korelacji dalekozasięgowych jest czasochłonna (skalując się wykładniczo) i prowadzi do degradacji testowanego materiału. W związku z tym rozważane są alternatywne metody testowania, oparte na niezależnym potwierdzeniu kwantowego charakteru generatora, np. poprzez wykorzystanie splątania kwantowego. Doktorant przedstawia w niej oryginalne koncepcje nowych narzędzi oraz kierunków rozwoju badań, odnoszących się odpowiednio do:

- nowych metod testowania losowości specyficznych dla splątanych układów opartych na korelacjach Bella-CHSH oraz autorskiej propozycji permutacyjnego testu statystycznego.
- innowacyjnej, stanowiącej o przyszłości kryptografii postkwantowej koncepcji publicznej oceny jakości losowości generowanej przez kwantowe źródła (ideę wpisującą się w światowe trendy zmierzające do budowy zaufanych, otwartych infrastrukturalnie systemów kryptograficznych).

W części tej uwagę zwraca oryginalna i osadzona w aktualnym dyskursie nad alternatywnymi miarami losowości dla układów kwantowych, propozycja permutacyjnego testu statystycznego. Szkoda, że test ten nie został sformalizowany jako kompletna procedura testowa ani porównany z istniejącymi standardami w zakresie oceny QRNG. Brakuje również jednoznacznych kryteriów jego walidacji, co nieco osłabia siłę jego przekazu jako narzędzia praktycznego. Podobną uwagę zwraca propozycja zastosowania niezależnej weryfikacji

losowości (tzw. device-independent certification), która może zapewniać bezpieczeństwo nawet w warunkach ograniczonego zaufania do urządzeń generujących liczby losowe.

Część ta wnosi wyraźny, twórczy wkład własny Doktoranta w rozwój kierunków dalszych badań, zarówno o charakterze aplikacyjnym, jak i teoretyczno-metodycznym. Na uwagę zasługuje fakt, że przedstawione koncepcje mają nie tylko wartość naukową, ale mogą również stanowić punkt wyjścia do opracowania praktycznych rozwiązań w zakresie certyfikacji i oceny jakości QRNG, zgodnych z wymaganiami przyszłych zastosowań przemysłowych i instytucjonalnych.

Podstawowym niedostatkiem tej części rozprawy jest brak syntetycznego zestawienia ograniczeń istniejących narzędzi służących do oceny losowości oraz jasno wyodrębnionego katalogu propozycji pozwalających na ich przezwyciężenie. Zważywszy na znaczenie tych kwestii dla projektowania zaufanych systemów bezpieczeństwa informacji oraz strategii certyfikacyjnych w erze postkwantowej, ich zebranie i podsumowanie – choćby w formie tabelarycznej lub graficznej – znacząco podniosłoby komunikatywność i praktyczną wartość tej części pracy.

Reasumując, narracja recenzowanej rozprawy w sposób systematyczny prowadzi od fundamentalnych rozważań nad naturą losowości, poprzez praktyczne testowanie rzeczywistych kwantowych ciągów, aż po propozycję nowej klasy metod testowania oraz bezpiecznych i audytowalnych protokołów generowania liczb losowych, opierając się na mechanice kwantowej.

Rozprawa ma charakter analityczno-wdrożeniowy, łączący elementy krytycznej refleksji metodologicznej z empiryczną weryfikacją testów stosowanych do oceny losowości kwantowych generatorów liczb. Doktorant nie tylko dokonuje analizy skuteczności istniejących narzędzi (m.in. baterii NIST STS), ale również proponuje nowe podejścia testujące, adekwatne do specyfiki losowości generowanej przez układy kwantowe (np. splątane fotony). W pracy połączono aspekt teoretyczno-modelowy z praktycznym testowaniem konkretnych urządzeń oraz ich symulacją, co pozwala zaliczyć rozprawę do prac o profilu badawczo-wdrożeniowym z silnym komponentem eksperymentalnym.

3. Oryginalne osiągnięcia

Zmierzając do osiągnięcia zamierzonych przez siebie celów, m.in. do: ***„Opracowania metody oceny losowości kwantowego generatora liczb losowych wykorzystującego splątanie kwantowe qubitów."*** oraz ***„Określenia czy aktualnie stosowane algorytmy statystyczne są wystarczające oraz odpowiednie do badania kwantowych generatorów liczb***

losowych jako odrębnej klasy generatorów." Doktorant uzyskał szereg nowych rezultatów. Do ważniejszych z nich można zaliczyć:

1. Przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań empirycznych na danych pochodzących z rzeczywistych kwantowych generatorów liczb losowych (QRNG) opartych na szumie śrutowym i splątaniu fotonów pozwalających wykazać, że standardowe testy statystyczne – w szczególności NIST STS – są niewystarczające do wykrywania subtelnych, deterministycznych korelacji, które mogą pojawić się w fizycznych źródłach losowości. Tym samym podważył powszechne założenie o ich uniwersalności dla oceny QRNG.
2. Opracowanie i przeprowadzenie eksperymentu polegającego na celowym wprowadzaniu zaburzeń deterministycznych do wcześniej pozytywnie przetestowanych kwantowych ciągów losowych. To oryginalne podejście pozwoliło ocenić zdolność klasycznych testów do detekcji nielosowości na dużych skalach korelacyjnych, a uzyskane wyniki ujawniły istotne ograniczenia diagnostyczne standardowych narzędzi.
3. Opracowanie nowego typu testu statystycznego dedykowanego kwantowym generatorom liczb losowych opartego na splątaniu i wykorzystującego permutacyjne podejście do analizy korelacji Bella-CHSH, stanowiącego próbę formalizacji niezależnej, wewnętrznie spójnej metody testowania losowości w systemach o silnych własnościach nielokalnych.
4. Przedstawienie innowacyjnej koncepcji publicznej, zewnętrznej weryfikacji losowości, umożliwiającej ocenę ciągów losowych bez potrzeby zaufania do wewnętrznej struktury generatora. Rozwiązanie to wpisuje się w najnowsze tendencje w kryptografii postkwantowej, gdzie wymagana jest certyfikacja QRNG w warunkach ograniczonego zaufania.

Reasumując, uważam, że uzyskane rezultaty potwierdzają kwalifikacje Doktoranta umożliwiające Mu swobodne poruszanie się zarówno w obszarze zagadnień z zakresu mechaniki kwantowej i inżynierii informacji kwantowej, jak i metod statystycznej analizy danych oraz teorii testowania losowości. Uzyskane wyniki weryfikują także Jego umiejętności w zakresie praktycznego wykorzystania nowoczesnych technik analizy probabilistycznej i statystycznej w badaniach nad fizycznymi i splątaniowymi kwantowymi generatorami liczb losowych. Uzyskane rezultaty potwierdzają sformułowaną w rozprawie tezę, że klasyczne narzędzia testowania losowości są niewystarczające do oceny jakości generowanych danych w systemach opartych na zjawiskach kwantowych, potwierdzają również, że Doktorant potrafi podejmować i samodzielnie realizować zaplanowane cele badawcze.

4. Uwagi

Lektura rozprawy skłania do kilku uwag, tak ogólniejszej, jak i bardziej szczegółowej natury.

Uwagi ogólne:

1. Bardzo obszerny, w różnych wątkach, sposób prezentacji odbił swoje piętno na braku pogłębionej dyskusji wielu istotnych wątków pracy. Szczególny niedosyt w tym względzie budzi brak dyskusji związanej z ograniczeniem rozważań do konkretnych typów fizycznych generatorów losowości, tj. opartych na szumie śrutowym oraz splątaniu fotonów, z pominięciem innych implementacji QRNG (np. opartych na interferencji czy tunelowaniu). Związane z tym pytanie dotyczy możliwości ujęcia porównawczego skuteczności testów w różnych fizycznych reżimach generowania losowości. Inne, wiążące się z tym pytanie dotyczy możliwości rozszerzenia proponowanych metod oceny losowości na inne klasy generatorów – zarówno deterministycznych, jak i kwantowych – oraz uogólnienia zaproponowanych wniosków.
2. W przedstawionym kontekście ciekawą byłaby również dyskusja na temat wpływu parametrów eksperymentalnych (np. liczności próby, rodzaju źródła splątania, charakterystyki detekcji) na czułość i skuteczność proponowanych testów, w szczególności permutacyjnego testu statystycznego. Interesującym, w szczególności, byłoby tutaj oszacowanie wpływu poziomu szumu eksperymentalnego lub błędów detekcji na wyniki analizy korelacji CHSH. Związane z tym pytanie sprowadza się do oceny odporności zaproponowanych metod na nieidealności fizycznych implementacji oraz do potencjalnej potrzeby ich kalibracji lub adaptacji.
3. Opracowana metoda umożliwia świadome testowanie skuteczności klasycznych narzędzi statystycznych przez wprowadzanie kontrolowanych zaburzeń deterministycznych do ciągów pochodzących z QRNG. Oznacza to, że realnym staje się krytyczna walidacja istniejących standardów testowania losowości oraz formułowanie nowych, fizycznie ukierunkowanych narzędzi diagnostycznych. Związane z tym pytanie dotyczy oceny możliwości integracji takiego podejścia w procesach certyfikacji QRNG oraz jego użyteczności w definiowaniu przyszłych standardów zgodnych z wymaganiami bezpieczeństwa kryptograficznego.

Uwagi szczegółowe

W trakcie lektury rozprawy należy odnotować obecność nielicznych, lecz istotnych kolizji oznaczeń, które mogą wprowadzać niejednoznaczność interpretacyjną. Przykładowo,

symbol „p" w różnych kontekstach oznacza zarówno wartość prawdopodobieństwa sukcesu w rozkładach statystycznych, jak i wartość p *(p-value)* w klasycznych testach hipotez. Podobna wieloznaczność dotyczy symboli takich jak „n" (stosowanego zarówno jako długość ciągu, jak i liczba sukcesów) czy „s" (indeks lub zmienna pomocnicza). Zjawisko to, choć nienagminne, może utrudniać płynny odbiór tekstu zwłaszcza w partiach łączących aparat probabilistyczny z analizą fizyczną i numeryczną. Wskazane byłoby doprecyzowanie symboliki lub wprowadzenie jednoznacznej konwencji notacyjnej, np. poprzez indeksowanie.

Rozprawa została przygotowana z należytą starannością redakcyjną i spełnia wymogi formalne stawiane pracom doktorskim pod względem objętości, układu i struktury logicznej. Podział na rozdziały wprowadzające, przeglądowe, badawcze i podsumowujące został przeprowadzony konsekwentnie, a zawartość poszczególnych sekcji odpowiada kolejnym etapom realizacji celów pracy. We wstępie i zakończeniu sformułowano klarowne uzasadnienie problemu badawczego

Pod względem językowym rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń. Styl wypowiedzi jest akademicki, a terminologia – właściwa dla dziedziny informatyki kwantowej, probabilistyki i statystyki matematycznej. W nielicznych miejscach zauważalne są drobne uchybienia redakcyjne, takie jak powtórzenia wyrażeń, brak konsekwencji interpunkcyjnej lub niejednoznaczne odniesienia do wcześniej użytych symboli. Nie wpływają one jednak na zrozumiałość tekstu i nie zakłócają odbioru meritum rozprawy.

5. Konkluzja

Przytoczone uwagi krytyczne nie podważają mojej ogólnie bardzo pozytywnej oceny pracy. Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgra inż. Piotra P. Jóźwiaka został rozwiązany oryginalny problem badawczy, polegający na empirycznej i metodologicznej weryfikacji skuteczności klasycznych narzędzi statystycznych do oceny losowości danych generowanych przez fizyczne źródła kwantowe oraz zaproponowaniu alternatywnych metod analizy specyficznych dla układów splątanych. Stwierdzam tym samym, że przedstawiona do recenzji rozprawa wnosi wkład w rozwój interdyscyplinarnej problematyki oceny jakości losowości w systemach kwantowych, a w szczególności w rozwój metod testowania, certyfikacji i publicznej weryfikacji losowości w kontekście QRNG, z uwzględnieniem ich zastosowania w kryptografii postkwantowej

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością metod statystycznej analizy danych, probabilistyki i oceny rozkładów *p-value*, a także umiejętnością planowania i prowadzenia eksperymentów wykorzystujących współczesne technologie IT.

Uważam, że opiniowana praca spełnia warunki stawiane przez obowiązującą ustawę: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742) w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Uważam również, że poziom i jakość uzyskanych wyników naukowych przedstawionych w dysertacji, współautorstwo dwóch publikacji lokujących się na poziomach ≥100 punktów ministerialnych, a także aktywny udział Doktoranta w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w NLTK przy Politechnice Wrocławskiej zasługują na wyróżnienie.