

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki
al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 31 sierpnia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Kwoki pt. „Elektryczne metody pomiarów
wychyleń układów MEMS i NEMS”

I. Podstawa opracowania

Podstawę formalną sporządzenia niniejszej recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej (RDN AEEiTK PWr) – prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziedzica z dnia 21 lipca 2023 r. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została opracowana w Katedrze Nanometrologii na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej pod opieką promotora dr. hab. inż. Tomasza Piaseckiego (prof. uczelni).

II. Opis sylwetki Kandydata

Mgr inż. Krzysztof Kwoka jest absolwentem Politechniki Wrocławskiej, gdzie uzyskał w 2015 r. tytuł magistra inżyniera w zakresie elektroniki i telekomunikacji. Na uwagę zasługuje będący na wysokim poziomie dorobek naukowy Kandydata. Jest On współautorem 6 publikacji naukowych w prestiżowych czasopismach, takich jak: *Measurement* (2022, 2023), *Sensors and Actuators A - Physical* (2018, 2020), *Microelectronic Engineering* (2018), *Metrology and Measurement Systems* (2020) o wysokim sumarycznym współczynniku oddziaływania 20,2. Według baz Web of Science i Scopus na dzień 22.08.2023 r. prace Doktoranta były cytowane odpowiednio 13 i 16 razy (bez autocytowań); indeks Hirscha wynosił 3. Jest to bardzo dobry wskaźnik jak na tak wczesny etap kariery naukowej. Wyniki

RDN AEEiTK/154/2023

swojej pracy Doktorant prezentował m.in. na seminarium sprawozdawczym projektu NanoHEAT (2015), XIV Ogólnopolskim Seminarium „Techniki Jonowe” (2017), 9th Dachshund Workshop: Nanometrology for nanoelectronics and material science (2018) oraz na konferencjach międzynarodowych (5th Conference on Nano and Micromechanics – CNM, Wrocław, 2017; 44th International Conference on Micro and Nanoengineering – MNE, Kopenhaga, Dania, 2018; 4th EuFN and FIT4NANO Joint Workshop/Meeting, Wiedeń, Austria, 2021; XI Workshop on Applications of Scanning Probe Microscopy STM/AFM, Zakopane, 2022). Ponadto uczestniczył w badaniach naukowych w ramach projektu naukowego OPUS-19 pn. „Nanometrologia efektu Nottingham prowadzona operacyjnymi układami mikro-elektromechanicznymi” (2020/37/B/ST7/03792) pod kierownictwem prof. Teodora Gotszalka.

III. Ocena rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Krzysztof Kwoka przedstawia RDN AEEiTK PWr rozprawę doktorską zatytułowaną „Elektryczne metody pomiarów wychyleń układów MEMS i NEMS”, której cel został określony we Wstępie, na stronie 5. Jest nim opracowanie metodyki prowadzenia pomiarów oraz narzędzi analitycznych pozwalających na pomiary wychyleń struktur MEMS/NEMS metodami elektrycznymi. Realizacja tego celu wymagała od Autora zaproponowania modeli fizycznych i elektrycznych badanych układów, skonstruowania stanowisk pomiarowych i technik analizy danych pochodzących z pomiarów oraz przeprowadzenia testów potwierdzających poprawność i skuteczność zaproponowanych rozwiązań. Testy te potwierdziły adekwatność zaproponowanych metod oraz modeli belek pomiarowych, a tym samym ich użyteczność w mikroskopii bliskich oddziaływań. Nakład pracy potrzebny do przeprowadzenia ww. testów był znaczny i wymagał nie tylko wytworzenia badanych struktur MEMS/NEMS, lecz także oryginalnych koncepcyjnie eksperymentów, co wiązało się ze znacznym zakresem działań prowadzących do utworzenia stanowisk badawczych. Wymagało to wszechstronnej wiedzy Doktoranta nie tylko z zakresu Jego naukowej specjalizacji. W wielu przypadkach zaproponowane metody, modele i techniki pomiarowe mają charakter oryginalny; uważam zatem, że przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Kwoki jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oraz że prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia naukowego doktora w dyscyplinie „automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne” (AEEiTK), a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa liczy 97 stron, jest podzielona na 10 rozdziałów i zaopatrzona w obszerny spis literatury. Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna. Wynika to z bardzo szerokiego zastosowania mikroskopii, w tym mikroskopii bliskich oddziaływań, dla której przedstawione w rozprawie zagadnienia są niezwykle ważne. Uważam także, iż tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie AEEiTK ze względu na jej bezpośredni związek ze stosowanymi elektrycznymi technikami pomiaru, wykorzystywanymi sensorami – przetwornikami wielkości fizycznych na elektryczne (efekt piezorezystywny), mikro- i nanoelektroniką, technologią półprzewodników, a także potencjalnymi zastosowaniami w technologii i architekturze współczesnych przyrządów elektronicznych.

Tytuł rozprawy odpowiada jej treści oraz zakresowi przeprowadzonych badań. W rozprawie brak jest jednak zaprezentowania szerszego kontekstu, w którym metody elektryczne byłyby przedstawione na tle innych metod. Nie jest także jasne, czy omówione w pracy metody wyczerpują w pełni spektrum stosowanych metod elektrycznych. Cele pracy zostały określone we Wstępie, który zawiera 3 krótkie podrozdziały. Wspomniane wyżej braki mogłyby stanowić cenne uzupełnienie treści zawartych w tym rozdziale. Celowe byłoby także streszczenie zawartości rozprawy i wymienienie najważniejszych jej osiągnięć. Mankamentem tego rozdziału jest także zbyt uogólniający tytuł podrozdziału 1.1. *Struktury MEMS/NEMS*; w pierwszym zdaniu tego podrozdziału dowiadujemy się jednak, że chodzi wyłącznie o „uginające się” struktury tego typu.

Rozdziały drugi i trzeci to rozdziały wprowadzające czytelnika w problematykę rozprawy, mające ułatwić mu rozumienie zagadnień omawianych w dalszych częściach pracy. Umieszczenie ich w rozprawie uważam za uzasadnione. Co więcej, uważam, że niektóre zagadnienia mogłyby zostać przedstawione obszerniej. Dotyczy to w szczególności części dotyczącej szumu termomechanicznego oraz modelu oscylatora harmonicznego w miejscu, w którym omawiany jest tzw. „przesłuch”. Podane w rozprawie równanie (3.5) nie jest oczywiste, dlatego oczekuję, że w czasie publicznej obrony Doktorant uzasadni pochodzenie czynnika $\sqrt{Q^2 - \frac{3}{16}}$ zawartego w tym równaniu. Wśród innych mankamentów tych rozdziałów wymienić można pomyłki/błędy, których Doktorant się nie ustrzegł. Na stronie 7 pisze On, że sygnały zmieszane „zerują się”, jeśli okres całkowania produktu jest większy niż okres tych sygnałów. Wynik mieszania zawiera jednak składową, której okres jest odwrotnością różnicy częstotliwości i w przypadku zdudnienia częstotliwości może być znacznie dłuższy niż okresy sygnałów mieszanych. Na stronie 16, w równaniu (2.3) nie została zdefiniowana faza φ (rozdział omawia technikę spektroskopii impedancyjnej). Równanie (3.4) zawiera

błędy: ω i ω_0 powinny występować w 2. potędze. Na rys. 3.6b linią czerwoną przedstawiono raczej część rzeczywistą amplitudy niż jej moduł (podpis pod rysunkiem). Brak jest także precyzji określeń. Na stronie 25 napisano np., że: „siła pobudzająca nie będzie zbiegała się z częstotliwością rezonansową” lub „wartość szczytowa amplitudy będzie przesunięta względem częstotliwości środkowej” – nie jest jasne, o jaką częstotliwość chodzi. Widoczna jest także niestaranność całego opracowania: na stronie 25 w nawiasie pojawia się niedokończone zdanie, na stronie 8 zapis: „Wyników pomiarów uwzględniają (...)”, na stronie 26 „(...) przy wraz ze wzrostem (...)”. Tego typu niedociągnięcia/błędy gramatyczne dostrzegłem także na stronach 29, 44, 46, 75. Uważam także, iż tytuł rozdziału trzeciego w formie skrótu „SHO” jest nieodpowiedni; w literaturze naukowej unika się stosowania skrótów w tytułach, nawet jeśli zostały one wcześniej zdefiniowane lub są powszechne w użyciu (SHO z pewnością nie jest tego typu skrótem). Kontynuując ten wątek, uważam, że nieodpowiednie są także tytuły czwartego i piątego rozdziału tj.: *Miękkie belki* oraz *Ciężkie fotony*.

W rozdziale czwartym Autor przedstawia wyniki przeprowadzonego przez Niego eksperymentu, w którym mikrobekkę pobudzano wymuszeniem mechanicznym, a wychylenie mierzono w układach: optycznym i elektrycznym. Dało to możliwość „wyskalowania” pomiarów elektrycznych (rezystancja) w jednostkach wychylenia i określenia parametrów badanej belki. Uzyskano wartość czułości na siłę $FS = 263 \text{ V/N}$, co – jak stwierdza w streszczeniu Autor – „jest wartością nieporównywalnie większą niż dla analogicznych rozwiązań z literatury”. Przyjęty tytuł rozdziału *Miękkie belki* sugeruje, iż właśnie ten rezultat jest głównym osiągnięciem przeprowadzonych prac. Z treści rozdziału, tytułu rozprawy oraz przyjętego celu rozprawy wynika jednak, że osiągnięciem Autora jest wykazanie, iż pomiar elektryczny (z użyciem metody detekcji fazoczułej) sygnału z piezorezystywnego czujnika ugięcia daje wyniki zgodne z pomiarami referencyjnymi wykonanymi metodą optyczną. Doktorant stosuje w tym celu autorskie metody analizy danych eliminujące sygnał przesłuchu. Zapewne oba osiągnięcia są ważne, lecz istotne jest prawidłowe rozłożenie akcentów, które z punktu widzenia Autora rozprawy powinno koncentrować się na aspekcie pomiarów. W tym zakresie Jego osiągnięcia są zapewne większe niż w osiągnięciu polegającym na wytwarzaniu belki o odpowiednio małej sztywności. Wracając do treści opisanych w rozdziale czwartym, chcę odnieść się do przedstawionego w podrozdziale 4.4 komentarza dotyczącego pomiarów czasu termomechanicznego. Autor uważa, że uśrednianie widm prowadzi do zmniejszenia szumu termicznego. Jest to błędne rozumowanie. Eliminację szumu termicznego można osiągnąć uśredniając sygnał

w dziedzinie czasu. Uśrednianie gęstości widmowej mocy (gwm) w dziedzinie częstotliwości nie eliminuje tego szumu. W tym przypadku istota i potrzeba stosowania tej metody wynika ze zmniejszania się błędu estymatora gwm wraz ze wzrostem ilości uśrednianych rekordów. Niedosyt czytelnika budzi także brak szerszej informacji o „przeprowadzonych symulacjach właściwości mechanicznych” (strona 36).

Podobnie jak w przypadku rozdziału czwartego zasadniczym mankamentem rozdziału piątego jest jego tytuł: *Ciężkie fotony*. Zapewne odnosi się on do stosowanej techniki wymuszania drgań za pomocą promieniowania o wysokiej energii. Zasadniczym osiągnięciem Autora, opisanym w tym rozdziale, nie jest jednak zastosowanie ww. metody pobudzania, lecz wykazanie, że fazoczuły pomiar elektryczny sygnału z piezorezystora przeprowadzony na drugiej harmonicznej częstotliwości pobudzania (sygnału referencyjnego) w obecności pola magnetycznego prowadzi do wyników bardzo dobrze zgodnych z bezpośrednim pomiarem ugięcia belki. Aby to wykazać, Autor przedstawił odpowiednią analizę teoretyczną oraz niezwykle skomplikowany eksperyment, którego schemat przedstawiono na rys. 5.6. Jak wspomniałem, jego przeprowadzenie wymagało działań integrujących wiele technik oraz opracowania odpowiedniego oprogramowania sterującego eksperymentem i analizującego/ przetwarzającego wyniki pomiarów. Uważam, że przedstawione w tym rozdziale wyniki są bardzo znaczącym osiągnięciem Doktoranta.

W rozdziałach 6÷9 Doktorant przedstawia swe osiągnięcia w zakresie stosowania spektroskopii impedancyjnej. W swych rozważaniach buduje modele fizyczne drgających struktur oddziaływujących z polem magnetycznym lub elektrostatycznym. W dalszej kolejności proponuje zastępcze modele elektryczne tych struktur oraz podaje związki łączące parametry modelu fizycznego i modelu elektrycznego. W części eksperymentalnej wyznacza On zespoloną impedancję badanych struktur, a na jej podstawie niektóre parametry modelu fizycznego. Istotnym elementem tych badań jest uzyskanie zgodności zmierzonych charakterystyk z charakterystykami modelu w adekwatnym zakresie częstotliwości (rys. 7.5, 9.9, 9.11). Podobnie jak w rozdziale piątym, przeprowadzone eksperymenty są bardzo skomplikowane i potwierdzają rzetelną wiedzę Doktoranta z różnych dziedzin. Znaczenie osiągniętych wyników, zarówno tych uzyskanych dla spektroskopii impedancyjnej, jak i detekcji fazoczułej, polega na tym, iż wynika z nich, że w spektroskopii bliskich oddziaływań możliwe jest stosowanie czujników piezorezystancyjnych i wyłącznie elektrycznych (prostych i tanich) metod odczytu sygnału. Co więcej, odpowiednio skalibrowany model fizyczny tych czujników może prowadzić do optymalizacji ich konstrukcji.

Odnosząc się do szczegółowych treści przedstawionych w tych rozdziałach, moje zastrzeżenia dotyczą „modelu elektrostatycznego” przedstawionego na stronie 69. Autor upraszcza wyrażenie (8.11) do postaci (8.13), powołując się na warunek (8.12), co jest błędem. Warunek ten obowiązuje, gdy odległość między elektrodami jest dużo większa niż amplituda wychyleń. Zastosowane przybliżenie obowiązuje jednak w odwrotnej sytuacji, tj. gdy obie te wielkości są tego samego rzędu, tj. $x/d \cong 1$ oraz napięcie stałe U_{DS} jest znacznie większe niż pobudzenie ac , \hat{u} . Jest to intuicyjnie i koncepcyjnie zrozumiałe: niewielkie względne zmiany odległości między elektrodami nie mogą prowadzić do detekcji tych zmian. Pisze o tym sam Autor w ostatnim zdaniu rozdziału ósmego: „dla uzyskania jak największego stosunku odpowiedzi elektrycznej do sygnału pobudzającego (...) najistotniejszym parametrem będzie jak najmniejsza odległość pomiędzy elektrodami (...)”. Ponadto w równaniu (8.14), po lewej jego stronie pojawia się zależny od czasu prąd, podczas gdy po prawej stronie widnieje jego zespolona amplituda. Niejasne jest także pochodzenie drugiego składnika w równaniu (8.15). Oczekuję tu odpowiedzi wyjaśniającej moje wątpliwości.

Autor kończy rozprawę rozdziałem dziesiątym, w którym podsumowuje swe badania i osiągnięcia. W swej recenzji wymieniłem je omawiając poszczególne rozdziały pracy. Uważam, że są one poparte wartościowym materiałem doświadczalnym i solidną argumentacją teoretyczną. Przedstawiony materiał ma w głównej mierze charakter eksperymentalny. Podstawowym osiągnięciem Doktoranta jest uzyskanie założonego celu, jakim było wykazanie skuteczności elektrycznych metod pomiarów ugięcia belek stosowanych w mikroskopii bliskich oddziaływań. Nie było to zadanie łatwe, gdyż wymagało to zarówno dogłębnej znajomości zagadnień metrologicznych, jak i wiedzy dotyczącej np. fizyki badanych struktur czujnikowych oraz ich technologii. Tę stronę swych kompetencji Doktorant potwierdził włączając w treść rozprawy zagadnienia dotyczące wytwarzania struktur do badań. Podobnie znaczną wartość posiadają kompetencje Autora dotyczące zagadnień metrologicznych. Wykorzystał On specjalne stanowiska badawcze i przeprowadził pomiary metodami o znacznym stopniu złożoności. Autor udowodnił, że posiada tu potrzebne kompetencje, co jest ważne z punktu widzenia dyscypliny, w której ubiega się o stopień naukowy (a także kontynuacji Jego kariery naukowej).

Metodyka badań przeprowadzonych przez Doktoranta w celu rozwiązania problemu jest odpowiednia. Podstawowe metody stosowane w rozprawie to badania eksperymentalne, włączając w to prace o charakterze technologicznym. Stosowane są także analizy teoretyczne

i symulacje. W zakresie eksperymentu Autor nie ogranicza się do standardowych metod pomiaru istotnych wielkości, takich jak: napięcie, prąd, rezystancja, pojemność czy moc optyczna, lecz także przeprowadza zaawansowane pomiary technikami detekcji fazoczułej czy spektroskopii impedancyjnej, a mierzone sygnały są zarówno deterministyczne, jak i losowe.

Podstawą wniosków, zaproponowanych rozwiązań i postawionej tezy – oprócz zastosowanych technik eksperymentalnych – są także rozważania teoretyczne. Autor stosuje je w celu weryfikacji koncepcji oraz pogłębienia rozumienia zjawisk mających wpływ na obserwowane charakterystyki spektralne. Doktorant posiadał umiejętność wykorzystania współczesnych programów komputerowych do rozwiązywania takich zagadnień. Należy zauważyć, że rozważania Autora zostały uzupełnione o bardzo obszerny przegląd literaturowy. Uważam ponadto, że różnorodność zagadnień rozwiązanych przez Doktoranta potwierdza Jego znaczną wiedzę i zaangażowanie w jej stosowaniu. Jest to dobry prognostyk dla Jego przyszłej kariery naukowej.

IV. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując, uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Kwoki stanowi bardzo wartościowy wkład do wiedzy o elektrycznych metodach pomiarów wychyleń układów MEMS i NEMS. Problem badawczy został jasno postawiony we Wstępie, w którym Doktorant określa cele rozprawy. Trafność wybranej metodyki badań potwierdzają osiągnięte wyniki. Autor dowodzi, że możliwe jest zastosowanie wspomnianych wyżej metod elektrycznych w spektroskopii bliskich oddziaływań. Jest to zatem rezultat nowy, ma on charakter praktyczny, a jego znaczenie w technologii rozwoju tej techniki badawczej jest znaczne. Rozprawa, w której Autor przedstawił swą argumentację, w mojej opinii nie posiada wad głównych. Za niewielką wadę można uznać mankamenty wymienione przeze mnie przy omawianiu zawartości pracy. Uważałem za swój obowiązek wskazać na te uchybienia, kierując się troską o dalszy rozwój kariery naukowej Doktoranta, w nadziei, że okażą się one pomocne w Jego przyszłych pracach. Mankamenty te nie wpływają na osiągnięcie założonego celu rozprawy. Uważam, że cel ten został osiągnięty, a moja ocena rozprawy doktorskiej jest jednoznacznie pozytywna.

Stwierdzam, że recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Kwoki pt. „Elektryczne metody pomiarów wychyleń układów MEMS i NEMS” spełnia kryteria określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce

(Dz. U. 2023 r., poz. 742 z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Z uwagi na bardzo dobry jak na tak wczesny etap kariery dorobek naukowy, wnioskuję o wyróżnienie ocenianej pracy.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek

