

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

Rzeszów, 16 września 2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Pruchnika

pt. „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS”

w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała nr 914/41/RDND02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej (RDN AEEiTK PWr) z dnia 8 lipca 2024 r. oraz nawiązujące do tej uchwały pismo Przewodniczącego RDN AEEiTK PWr – prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziedzica, sygn. RDN AEETK/117/2024, z dnia 22 lipca 2024 r.

Podstawę prawną opracowania recenzji, zgodnie z otrzymanym pismem Przewodniczącego Rady, stanowią:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.)
- Uchwała nr 914/41/RDND02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 8 lipca 2024 r.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Pruchnika została zrealizowana w Katedrze Nanometrologii PWr pod kierunkiem promotora – prof. dr. hab. inż. Teodora Gotszalka. Manuskrypt, zawierający 182 strony maszynopisu, jest podzielony na 11 rozdziałów, a część z nich (rozdziały 2÷6) zakończono zwięzłym podsumowaniem. W pracy zamieszczono również spis akronimów i przyjętych oznaczeń. Rozprawę kończą rozdziały zatytułowane: *Podsumowanie*, *Wykaz dorobku* oraz *Literatura*, która obejmuje aż 329 pozycji.

Tytuł rozprawy: „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS” nie w pełni odpowiada jej treści oraz zakresowi przeprowadzonych badań. Zgodnie

RDN AEETK/139/2024

ze słownikiem PWN „nanometrologia” obejmuje „pomiarów wymiarów (...) oraz przemieszczeń w zakresie 0,1–1000 nm”, podczas gdy w pracy prowadzone są pomiary innych wielkości fizycznych, m.in. napięcia elektrycznego, rezystancji czy temperatury. Drugi człon tytułu – „prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS” – zawiera nazwę operacyjnego przyrządu MEMS. Jest to nazwa, która powstała w zespole Autora, odnosząca się do przyrządów opisywanych w pracy. Jej użycie w tytule nie niesie zatem informacji; ma za to aspekt intrygujący, budzący zaciekawienie potencjalnego czytelnika. Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna. Wynika to z szerokiego zastosowania przyrządów MEMS w badaniach nanostruktur oraz ich wytwarzania, a przedstawione w rozprawie zagadnienia są ważne z punktu widzenia rozwoju tych systemów. Uważam, iż tematyka pracy mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiTK) ze względu na jej bezpośredni związek ze stosowanymi elektrycznymi technikami pomiaru, mikro- i nanoelektroniką, technologią materiałów elektronicznych oraz zjawiskami określającymi działanie współczesnych przyrządów elektronicznych, a także potencjalnymi zastosowaniami stosowanych metod i technologii.

Cel rozprawy został określony dwukrotnie: na str. 13 oraz na str. 23. W pierwszym sformułowaniu jest nim „rozwój przyrządu pomiarowego dla nanometrologii w formie platformy do badania nanostruktur”. By uzasadnić postać, jaką przyjmie proponowany przyrząd, Autor przeprowadza we wstępie rozważania, których efektem jest bardziej precyzyjne sformułowanie celu pracy na str. 23. Jest nim „opracowanie technologii elektromechanicznych mikrouządzeń operacyjnych – opMEMS”. Doktorant napisał dalej, iż „rozumie się przez to zaproponowanie topologii, technologii i praktyki pomiarowej”, zaś przyrząd opMEMS jest definiowany jako „platforma pomiarowa złożona z mikrouządzenia wykonanego w technologii MEMS oraz nanourządzenia elektromechanicznego (NEMS) zintegrowanego wewnątrz platformy”.

Praca posiada również tezę. Aby dowieść celowości i skuteczności prac koniecznych do osiągnięcia celu, Autor sformułował tezę, zgodnie z którą pomiar efektu Nottinghama możliwy jest przez zastosowanie opracowanych w pracy przyrządów opMEMS. Przedstawione w ostatnim rozdziale pracy wyniki badań wydają się potwierdzać to stwierdzenie. Sformułowanie Autora zawiera jednak również wtrącenie stwierdzające, że pomiar ww. zjawiska jest „nieujmowalny innymi metodami pomiarowymi”. W pracy brak jest jednak argumentów potwierdzających tę opinię. Uważam zatem, że ta część tezy pozostaje nieudowodniona.

Realizacja celu pracy i weryfikacja postawionej tezy, w części którą uważam za udowodnioną, wymagała od Kandydata niezwykle zaawansowanych prac konstrukcyjnych i technologicznych o charakterze zarówno doświadczalnym, jak i teoretycznym, m.in. budowy i analizy modeli fizycznych i elektrycznych badanych układów, skonstruowania stanowisk pomiarowych, opracowania technik analizy danych pochodzących z pomiarów oraz przeprowadzenia testów potwierdzających poprawność i skuteczność zaproponowanych rozwiązań. Testy te potwierdziły adekwatność zaproponowanych metod do wytworzenia zaawansowanych koncepcyjnie i technologicznie przyrządów operacyjnych opMEMS, których użyteczność potwierdzono przeprowadzeniem różnego rodzaju pomiarów przyrządów/elementów/struktur o rozmiarach nanometrowych. Nakład pracy potrzebny do wytworzenia ww. urządzeń był znaczny i wymagał przeprowadzenia oryginalnych koncepcyjnie eksperymentów, konstrukcji oraz utworzenia prototypowych stanowisk badawczych. Wymagało to znacznej i wszechstronnej wiedzy Doktoranta nie tylko z zakresu elektroniki i technologii elektronicznej, lecz także mechaniki oraz inżynierii materiałowej. W wielu przypadkach zaproponowane metody, modele i techniki pomiarowe mają charakter oryginalny, a opracowane systemy MEMS są unikatowe. Uważam zatem, że przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Pruchnika jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oraz że prezentuje ona nie tylko ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia naukowego doktora w dyscyplinie AEEiTK, lecz także znajomość prowadzenia pracy naukowej na wysokim poziomie merytorycznym.

Struktura pracy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Pruchnika jest nietypowa. Przede wszystkim rozprawa nie zawiera wstępu, co jest zwyczajowym elementem składowym prac doktorskich. Tę rolę przejmuje rozdział pierwszy zatytułowany „Metrologiczne pomiary w nanoskali”, w którym Doktorant przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, formułuje cel i tezę pracy. Ponadto w rozdziale tym Autor zawarł krótką charakterystykę tematyki pracy i scharakteryzował metody pomiaru oraz przetwarzania informacji. Wyjaśnił także, iż zaproponowane w pracy przyrządy opMEMS przyjmują formy belek utwierdzonych jednostronnie oraz dwustronnie (mostków).

W rozdziale drugim, zatytułowanym „Projektowanie przyrządów opMEMS”, Doktorant przedstawił m.in. pięć założeń projektowych i opisał metody aktywacji wspomnianych belek, dokonując ich podziału ze względu na: (i) charakter aktywacji w dziedzinie częstotliwości (tzw. zmiennie- i stałosygnałowa) oraz (ii) mechanizm fizyczny odpowiedzialny za generację siły. Spośród wymienionych przez Autora metod tylko cztery, tj. elektromagnetyczna, optomechaniczna, termomechaniczna i akustyczna, zostały zastosowane w pracy do analizy

i syntezy układów opMEMS. Doktorant omówił też metody analizy kinematycznej i wytrzymałościowej belek oraz metodę elementów skończonych, którą wykorzystał do symulacji bardziej złożonych przyrządów opMEMS w środowisku COMSOL Multiphysics.

W rozdziale trzecim mgr inż. Bartosz Pruchnik przedstawił metody wytwarzania, użytkowania i pomiarów przyrządów opMEMS. Przyrządy te – jak wcześniej wspomniałem – zawierają belki, które mogą być aktuowane elektromagnetycznie, elektrotermicznie i optomechanicznie. Doktorant omówił właściwości platformy, w tym jej pożądaną formę oraz technologię, a w kolejnym rozdziale scharakteryzował nanostruktury (nanodruty, nanokulki oraz materiały dwuwymiarowe) i przedstawił metody integracji technologii MEMS i NEMS. W wyniku zastosowania metod przedstawionych w rozdziale czwartym Kandydat opracował zintegrowany przyrząd opMEMS wyposażony w aktuator (dzięki platformie MEMS) oraz przetwornik (w postaci nanostruktury NEMS).

Rozdział piąty opisuje zagadnienie dotyczące dopasowania naprężeń przyrządów opMEMS, umożliwiające dokładną kontrolę odległości w obszarze, w którym został umieszczony przetwornik NEMS. Na uwagę zasługuje fakt, iż Doktorant opanował szereg technik analitycznych i badawczych, dzięki czemu wprowadził pojęcie niezgodności położenia, wyrażające niepożądaną odległość pomiędzy kontaktami w obszarze zainteresowania. Eliminacja tej wielkości, poczynając od jej definicji, a kończąc na konkretnych przykładach zastosowań, została także przedstawiona w tym rozdziale. Osiągnięciem Kandydata było też opracowanie metod produkcji i integracji przyrządów NEMS w wytworzonej platformie i wprowadzenie metodyki ustalania poziomu naprężeń własnych.

Rezultaty pomiarów przeprowadzonych przez Doktoranta zostały zamieszczone w rozdziale szóstym. Wynika z nich, iż kluczowe dla badania nanostruktur jest odpowiednie ich umiejscowienie w układzie pomiarowym. Odpowiednia separacja nanostruktury od podłoża i otoczenia zapobiega zakłóceniom pomiaru przez wpływy czynników zewnętrznych. Chociaż możliwe jest uzyskanie wiarygodnych pomiarów różnych wielkości fizycznych w układzie klasycznym, to – przez wzgląd na separację od czynników zewnętrznych oraz wprowadzenie układu pomiarowego będącego zarazem przyrządem pomiarowym – najlepszym technicznie rozwiązaniem jest zaprojektowany przez Autora i opisany w pierwszej części rozprawy przyrząd opMEMS.

W rozdziale siódmym Kandydat opisał przebieg oraz wyniki walidacji kilku serii przyrządów opMEMS, zaprojektowanych i wykonanych zgodnie z założeniami projektowymi

przedstawionymi w podrozdziale 2.4.3. Do ich realizacji wykorzystał On techniki opisane w podrozdziałach 3.2.1÷3.2.3 rozprawy. Rozdział zawiera także dyskusję na temat rozdzielczości opracowanych przyrządów.

Rozdział ósmy jest kluczowy z punktu widzenia oceny realizacji założonego celu i udowodnienia postawionej tezy. W rozdziale tym opisano czteropunktowy pomiar rezystancji nanodrutów oraz emisji polowej z uwzględnieniem efektu Nottinghama przeprowadzony z zastosowaniem przyrządów pomiarowych opMEMS. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 74, 77, 81 i 87.

Z przedstawionych na rys. 74 rezultatów pomiarów wynika, że badane nanodrutu mają charakter omowy, a udział kontaktów w zmierzonych charakterystykach I-V jest nieznaczny. Brak jest jakichkolwiek oznak efektów kwantowych, a oszacowana wartość rezystancji (około 10 M Ω) znacznie przewyższa wartość kwantu konduktancji (6 k Ω). Transport elektryczny ma zatem charakter silnie dyfuzyjny, a zmierzone charakterystyki nie dają odpowiedzi co do dominującego mechanizmu rozpraszającego. Autor nie wspomina o potencjalnych zastosowaniach tego typu nanodrutów.

Pomiary emisji polowej, których wyniki przedstawiono m.in. na rys. 77 i 81, są tymi, które w pełni demonstrują zalety przyrządu opMEMS. W eksperymentach mierzono prąd tunelowy płynący w strukturze dwuelektrodowej, w której modulowano odległość tunelowania za pomocą elektromechanicznego przełączenia położenia katody. W pewnym zakresie napięć uzyskano charakterystykę liniową w skali $\lg(I/U^2)$ w funkcji $1/U$, co jest charakterystyczne dla procesu Fowlera-Nordheima. Nie przeprowadzono jednak żadnych analiz ilościowych potwierdzających występowanie tego mechanizmu przewodnictwa. Można zatem uznać, że opisane pomiary stanowią wstęp do bardziej zaawansowanych badań, który – co warto podkreślić – był możliwy dzięki opracowanemu przez Autora systemowi opMEMS.

Najważniejsze z punktu widzenia celu i tezy pracy są wyniki pomiarów efektu Nottinghama przedstawione na rys. 87. Dzięki opracowanemu w pracy przyrządowi opMEMS możliwe było przeprowadzenie dwupunktowego pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej złącza tunelowego z równoczesnym pomiarem temperatury po jednej stronie złącza. Elementem pomiarowym był tu odpowiednio skalibrowany nanotermistor. Uzyskano charakterystykę prądowo-napięciową charakterystyczną dla tunelowania Fowlera-Nordheima z równoczesnym obniżeniem temperatury emitera. Zjawisko znane jako efekt Nottinghama zostało zatem zaobserwowane na poziomie jakościowym. Podobnie jak poprzednio Autor nie podjął prób analiz ilościowych, które zwiększyłyby wartość merytoryczną przeprowadzonej obserwacji. Niemniej jednak trzeba uznać, że opracowane urządzenie opMEMS otwiera

możliwość pełnej weryfikacji zjawiska. Tak więc uważam, że teza pracy została udowodniona, a cel pracy został osiągnięty.

Autor kończy rozprawę rozdziałem dziewiątym, w którym podsumowuje swe badania i osiągnięcia. Uważam, że są one poparte wartościowym materiałem doświadczalnym i solidną argumentacją teoretyczną. Przedstawiony materiał ma w głównej mierze charakter eksperymentalny. Podstawowym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie przyrządu opMEMS i jego zastosowanie w badaniach nanoprzyrządów i zjawisk występujących w tych przyrządach. Nie było to zadanie łatwe, gdyż wymagało ono zarówno dogłębnej znajomości zagadnień metrologicznych, jak i wiedzy dotyczącej np. fizyki badanych struktur oraz ich technologii. Tę stronę swych kompetencji Doktorant potwierdził włączając w treść rozprawy zagadnienia dotyczące wytwarzania struktur do badań. Podobnie znaczną wartość posiadają kompetencje mgr. inż. Bartosza Pruchnika 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 zarówno z punktu widzenia dyscypliny, w której ubiega się o stopień naukowy, jak i 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, lecz także przeprowadza zaawansowane pomiary technikami analizy częstotliwościowej, 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. 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.

Na uwagę zasługuje będący na wysokim poziomie dorobek naukowy Kandydata. Jest On współautorem 11 publikacji naukowych w renomowanych czasopismach, takich jak:

Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (2024), *Scientific Reports* (2023, 2024), *Ultramicroscopy* (2024), *Measurement Science & Technology* (2024), *Journal of Microelectromechanical Systems* (2022, 2024), *Sensors and Actuators A - Physical* (2024), *Nanomaterials* (2023), *Materials* (2023), *Metrology and Measurement Systems* (2022, 2021), *Microelectronic Engineering* (2018) o wysokim sumarycznym współczynniku oddziaływania. Według baz Web of Science i Scopus na dzień 08.08.2024 r. prace mgr. inż. Bartosza Pruchnika były cytowane odpowiednio 3 i 9 razy (bez autocytowań); indeks Hirscha wynosi 3. Jest to bardzo dobry wskaźnik jak na tak wczesny etap kariery naukowej. Wyniki prac badawczych Doktoranta były prezentowane również na konferencjach międzynarodowych (MNE EUROSENSORS 2022, STM/AFM 2022, EUFN 2023, SPM 2023, FIT4NANO 2023). Ponadto uczestniczył On 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.

Przedstawiona do oceny rozprawa nie jest wolna od wad, błędów i niejednoznaczności:

- 1) Przytaczając równanie Nyquista na wielkość szumu termicznego, podano błędny odnośnik literaturowy do pracy Hooge'a, w której analizowany jest inny rodzaj szumów, tzw. szum $1/f$.
- 2) Na rys. 2 podano wzorce wysokości wyskalowane w woltach.
- 3) Równanie (9) na str. 30 jest niezrozumiałe. Jak rozumiem dotyczy niepewności pomiaru siły elektromotorycznej F_{em} określonej równaniem (8). W równaniu (9) pojawiają się: niepewność bliżej nieokreślonej siły F oraz niepewność źródła prądowego δ_d , przy czym d w równaniu (8) oznacza długość przewodnika. Proszę Doktoranta o szczegółowe wyjaśnienie tej kwestii.
- 4) Z równania (22) wynika, że odpowiedź rezonatora pobudzonego siłą harmoniczną nie zawiera przesunięcia fazowego. Czy rzeczywiście tak jest?
- 5) Równanie (27) zawiera błąd: całkowita odchyłka pozycji ΔZ jest ważoną sumą odchyłek cząstkowych δz_i , a nie bezwzględnych pozycji z_i .
- 6) Na str. 45 pojawia się stwierdzenie: „(...) liniowość przemieszczenia od sterowanego elektrycznie parametru elektrycznego”. Proszę o wyjaśnienie pojęcia „sterowany elektrycznie parametr elektryczny”.
- 7) Zdanie: „Wielkość szumu prądowego wyznaczana jest eksperymentalnie, jednak co do zasady jest proporcjonalna do temperatury, a odwrotnie proporcjonalna do pasma i rezystancji” zawiera błąd. Prąd szumu termicznego jest proporcjonalny

do pasma pomiarowego, a nie – jak napisano – odwrotnie proporcjonalny do tego pasma.

- 8) Autor definiuje ESD jako widmową gęstość energii i konsekwentnie informuje czytelnika na str. 137, że jego jednostką jest stosunek jednostki mierzonej wielkości i na pierwiastek z Hz. Kilka stron dalej, na str. 114, podaje szacowaną wartość ESD w Ω , a nie $\Omega/\sqrt{\text{Hz}}$! Przedstawiona na wspomnianej str. 137 dyskusja dotycząca ESD i PSD wydaje się być wątpliwa w kontekście praw obowiązujących dla sumowania ww. wielkości pochodzących z różnych procesów. Zasady są tu identyczne – obowiązuje sumowanie arytmetyczne, a nie, jak napisano, sumowanie geometryczne w przypadku ESD.
- 9) Z zamieszczonego w podrozdziale 8.2 opisu pomiaru nanodrutów FEBID wynika, że badano druty o długości ok. $0,4\pm 0,5 \mu\text{m}$ i grubości 50 nm. Opis procesu zrywania nanodrutu na str. 146 informuje, że stosowano wychylenie „na poziomie” 50 μm . Jak to możliwe?
- 10) Z przedstawionego na str. 153 wzoru (49) wynika, że temperatura emitera w przypadku braku pola elektrycznego ($E_U = 0$) obniży się do 0 K? Proszę o szerszy komentarz do tego równania.
- 11) Przedstawione na rys. 77 charakterystyki potwierdzające występowanie efektu Nottinghama uwidoczniają efekt histerezy pomiaru napięcia wymuszającego emisję, który nie jest komentowany. Jaka jest jego przyczyna?

Wymienione wyżej niedociągnięcia nie mają jednak charakteru wady głównej, która zmieniłaby radykalnie ocenę rozprawy. Jednak ich obecność (a także język i styl rozprawy, pełny potocznych i mało precyzyjnych stwierdzeń, w wielu miejscach trudno zrozumiały) sprawia, że nie występuję z wnioskiem o jej wyróżnienie, co – biorąc pod uwagę znakomity dorobek – byłoby w pełni uzasadnione.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Pruchnika zatytułowana „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS” spełnia kryteria określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 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.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek

