

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana **mgra inż. Bartosza Pruchnika** pt. „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS”, której promotorem jest Pan prof. dr hab. inż. Teodor Gotszalk (Politechnika Wrocławska).

Podstawa prawna

Recenzję wykonałem w odpowiedzi na pismo (RDN AEETK/168/2024) z dnia 21.10.2024 r. przesłane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej Pana prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica w odniesieniu do wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.), wymagań szczegółowych przekazanych ww. piśmie przewodnim Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej oraz na podstawie rekomendacji Rady Doskonałości Naukowej zawartych w poradniku pt. „Recenzje w postępowaniach o awans naukowy” z 2022 r., gdzie zwrócono uwagę, że recenzja rozprawy doktorskiej powinna co do zasady zawierać odpowiedź z uzasadnieniem na 3 pytania:

- (1) czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach;
- (2) czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- (3) czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS” dotyczy nowatorskich zagadnień związanych z opracowaniem kompleksowej technologii elektromechanicznych mikrouządzeń operacyjnych – opMEMS. Pod pojęciem kompleksowej technologii należy rozumieć zarówno opracowanie procesów technologicznych wytwarzania urządzeń opMEMS, jak również ich charakteryzacji i pomiarów możliwych do wykonania przy wykorzystaniu opMEMSów. Jak zostało ujęte w celu pracy: „*opMEMS stanowi platformę pomiarową złożoną z mikrouządzenia wykonanego w technologii MEMS oraz nanourządzenia elektromechanicznego (NEMS) zintegrowanego wewnątrz platformy*”. I cel ten został w pełni osiągnięty, co zostanie uzasadnione w dalszej części recenzji.

Rozprawa składa się z 11 rozdziałów z uwzględnieniem wykazu dorobku (rozdział 10) oraz literatury (rozdział 11). Praca została przygotowana w języku polskim, co zasługuje na podkreślenie. W ostatnich latach obserwuje się bowiem tendencję do przygotowywania rozpraw w języku angielskim (co poniekąd jest zrozumiałe, gdyż w opisie technologii wytwarzania przyrządów elektronicznych w przeważającej większości przypadków posługujemy się terminologią anglojęzyczną, niekiedy sprowadzając ją do żargonu laboratoryjnego i wprowadzając liczne spolszczenia czego Doktorant starał się uniknąć), przynosi to wymierne korzyści autorom rozpraw, gdyż zwiększa możliwość wykorzystania ich wyników przez innych badaczy, ale prowadzi to też do zubożenia języka polskiego, gdyż nowe pokolenia pracowników naukowych i studentów nie zapoznają się z obowiązującą terminologią ze względu na brak pozycji literaturowych. Niniejsza rozprawa ma szansę wypełnić tę lukę. W rozprawie został zawarty również spis akronimów i przyjętych oznaczeń wraz z podaniem tłumaczenia. Doktorant

doprecyzował również wykorzystywany w rozprawie układ (standardowy) współrzędnych. I choć Doktorant dołożył starań, aby praca miała przejrzysty i czytelny charakter i wskazywała na dużą dbałość autora o szczegóły, m.in. poprzez wprowadzenie licznych definicji (nawet do ogólnie znanych problemów), to jednak zauważalne są liczne niedociągnięcia natury edycyjnej, np. różnice w podpisie pod rysunkami (rysunek 4 – str. 22, rysunek 5 – str. 23 a pozostałe rysunki), w stosowanej pisowni (opMEMSów vs. opMEMS-ów, MEMSa vs. MEMS-a), stosowaniu interpunkcji (np. wzór (5), (7) vs. wzór (6); dra vs. dr. – str. 62), różnych oznaczeń (długość d (wzór (8)) vs. L (wzór (14))), pisania niektórych wyrazów z dużej litery w środku zdania (np. Mechaniki, str. 38), czy wymiennego stosowania wyrazów glin i aluminium. Mankamentem są też rysunki polsko-angielskie (np. rysunek 17, str. 59) – będąc konsekwentnym Doktorant powinien zastosować opisy osi również w języku polskim. Uchybienia te nie wpływają jednak na merytoryczną ocenę rozprawy.

Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach?

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant przywołuje 329 pozycji literaturowych, z których znaczna część dotyczy zagadnień teoretycznych podejmowanych w rozprawie. Liczba pozycji literaturowych wskazuje na dogłębne zapoznanie się Doktoranta z tematyką, choć w kilku miejscach brakuje przywołania *explicite* referencji (np. str. 61 do doświadczenia Davissona i Germera, odwołań do rozpraw doktorskich innych badaczy z zespołu, których wyniki były komentowane w niniejszej rozprawie). Początkowe rozdziały rozprawy (która *de facto* ze względu na swoją obszerność mogłaby być nazwana traktatem) zawierają wprowadzenie do zagadnienia pomiarów w nanoskali (rozdział 1) z uwzględnieniem ograniczeń w pomiarach niskowymiarowych (podrozdział 1.5), przedstawienie procesu projektowania przyrządów opMEMS (rozdział 2), omówienie technologii stosowanych w procesie wytwarzania urządzeń MEMS (rozdział 3). Przyrządom NEMS poświęcone zostały kolejne rozdziały rozprawy, tj. rozdział 4, rozdział 5, i rozdział 6. Rozprawa poświęcona jest pomiarom w nanoskali i jak słusznie zauważa Doktorant (str. 14) *„istnieje zapotrzebowanie na przyrząd, który będzie dokonywał porównania w skali właściwej dla wielkości mierzonej, ale tym samym będzie możliwe odniesienie jego wskazań do wzorca miary”*. Zaproponowany przez Doktoranta (i zespół projektowy pod kierownictwem promotora rozprawy) opMEMS na bazie mostków (rozdział 8) ma być rozwiązaniem ww. problemu.

Na podstawie literatury rozprawy można przyjąć, że Doktorant posiada wiedzę teoretyczną w dyscyplinie AETiK. Rozważania teoretyczne dotyczące pomiarów, ze szczególnym naciskiem na pomiary w nanoskali zostały prawidłowo omówione. Miejscami nawet zbyt obszernie, gdyż każda dygresja i odwołanie do literatury może prowadzić do niekończącego się procesu analizy zagadnienia, co jak domniemam miało potwierdzić posiadaną przez Doktoranta wiedzę z zakresu metrologii i nanometrologii (vide rysunek 3, rozdział 1). W kilku miejscach Doktorant prowadzi rozważania bardzo drobiazgowo, podczas gdy w innych (w ocenie recenzenta nie mniej ważnych (podrozdział 2.2.2., str. 20) bardzo zdawkowo z odesłaniem do literatury. Niemniej jednak Doktorant wykazał, że posiada wiedzę teoretyczną w przedmiocie badań.

Czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora?

Prowadzenie prac badawczo-rozwojowych, w tym badań podstawowych w zakresie poszukiwania nowoczesnych materiałów i przyrządów stoi u podstaw nauk inżyniersko-technicznych, gdyż materiały i przyrządy takie mogą znaleźć zastosowanie w wielu aplikacjach, m.in. w dynamicznie rozwijającej się elektronice, optyce i dyscyplinach pokrewnych (np. bioinżynierii). Jednocześnie badania nad opracowaniem nowoczesnych materiałów i przyrządów nie mogą być prowadzone w oderwaniu od prac technologicznych umożliwiających ich praktyczne wykorzystanie, m.in. w zakresie wytwarzania kluczowych elementów. Doktorant przedstawił tezę rozprawy jako *„możliwość przeprowadzenia pomiaru zjawiska nieujmowanego innymi metodami pomiarowymi – efektu Nottinghama – przez zastosowanie opMEMS-ów”*, sugerując że *„zastosowanie wzorca w postaci właściwej struktury, która*

zadawać będzie przemieszczenie, eliminuje konieczność żmudnego i wprowadzającego błędy procesu porównania”. W rozprawie przedstawione są wyniki uzyskane przez Doktoranta oraz poszczególnych członków zespołu projektowego, jednakże doprecyzowania wymaga stwierdzenie zawarte na str. 24 „był aktywnym świadkiem zachodzących procesów”, gdyż nie jest jasne, co autor rozprawy miał na myśli.

W tekście rozprawy pojawiają się też odwołania do literatury bez jednoznacznego wskazania na swoje prace, toteż często można odnieść mylne wrażenie, że Doktorant odwołuje się do własnych wyników, podczas gdy powołuje się na wyniki innych badaczy. Co do zasady nie jest to absolutnie błędem, ale precyzyjne wskazywanie kiedy odwołanie dotyczy wyników uzyskanych samodzielnie a kiedy jest to dyskusja z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy poprawiłoby czytelność i zrozumienie pracy, w której de facto Doktorant ma dowieść umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na przykład opis pod rysunkiem 18 można zinterpretować dwojako, zarówno że Doktorant jest autorem głowicy, jak również że autorem jest ktoś inny i przedstawiony rysunek złożeniowy jest rysunkiem autora głowicy, ale niekoniecznie autor rozprawy jest jednocześnie autorem głowicy. Podobnie doprecyzowania wymaga zdanie zawarte w podsumowaniu rozdziału 3: „wszystkie elementy technologii stanowią również element tej rozprawy, ponieważ były wprost stosowane przez autora lub przynajmniej uczestniczył w ich przebiegu”. W podsumowaniu należałoby jednoznacznie wskazać, które elementy były opracowane przez Doktoranta bezpośrednio, a które pośrednio, co jest zrozumiałe, bo nie sposób wykonywać wszystkich eksperymentów samodzielnie. Pomimo tych uchybień (w myśl zasady *In dubio pro reo*) uznaję, że Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne?

Należy podkreślić, że prowadzenie badań w obszarze nowych technologii otrzymywania nowoczesnych materiałów i przyrządów na potrzeby współczesnej elektroniki nie jest zadaniem trywialnym. Wymaga to bowiem interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej, fizyki, chemii i elektroniki. Nierzadko potrzebna jest też wiedza z pozostałych obszarów techniki, gdyż większość prac badawczych wykonywana jest w dedykowanych stanowiskach badawczych, których budowa również jest przedmiotem prac inżyniersko-technicznych. Zasadnicze wyniki potwierdzające rozwiązanie problemu naukowego przedstawione zostały w rozdziale 7 (Metrologia przyrządów opMEMS) i w rozdziale 8 (Metrologia prowadzona przyrządami opMEMS). W rozdziale 2 zdefiniowane zostały założenia projektowe, tj.:

- założenie 1 – do realizacji zadań w różnych środowiskach i z różnymi czułościami, przyrząd powinien posiadać więcej niż jeden rodzaj aktuatora;
- założenie 2 – konieczne jest, aby realizacja zmian odległości odbywała się według trajektorii w postaci znanych funkcji zadanych parametrów, pożądane jest, aby postaci tych funkcji były jak najprostsze. Przemieszczenie musi być realizowane pomiędzy elementami możliwymi do zbliżenia na odległość nie większą niż mikrometr, aby możliwe było zamocowanie badanego elementu;
- założenie 3 – urządzenie musi integrować doprowadzenie sygnałów elektrycznych do OZ¹. Tylko w ten sposób możliwy będzie pomiar parametrów elektrycznych symultanicznie z realizacją przemieszczenia. Minimalna liczba kontaktów elektrycznych to dwa wymagane do zamknięcia obwodu; bardziej dokładne badania wymagają pomiarów co najmniej czteropunktowych;
- założenie 4 – urządzenie musi przewidywać możliwość integracji bardziej złożonych układów i sensorów wielkości elektrycznych (takich jak czteropunktowe układy pomiarowe,

¹ OZ – obszar zainteresowania – obszar zdefiniowany w konstrukcji opMEMSów, w którym umieszczona zostanie nanostruktura

układy termorezystywne i inne). Z tego względu OZ musi być wyposażony w dodatkowe doprowadzenia sygnałów elektrycznych;

- założenie 5 – urządzenie musi umożliwiać wykonywanie nanomanipulacji, którymi w OZ zostanie dostarczony właściwy element badany – urządzenie nie może być zamknięte, musi posiadać doprowadzenia elektryczne wykonane w sposób niezakłócający prowadzenie manipulacji.

Przedstawione w pracy wyniki potwierdzają, że ww. założenia zostały osiągnięte, w szczególności wyniki zaprezentowane w rozdziale 8 wskazują na rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego, chociaż przy opisie tych osiągnięć Doktorant nie ustrzegł się stosowania skrótów myślowych, co znacząco utrudnia analizę tych osiągnięć oraz analizę toku myślowego/projektowego dla kolejnych iteracji rozwiązań. Słuszną obserwację przedstawił Doktorant na str.155 pisząc „*W istotnie, jedynie w układzie z odpowiednio krótkim emiterem polowym zaobserwowano istotne pomiarowo zmiany temperatury*”, co było jedną z ważniejszych obserwacji w prowadzonym eksperymencie.

Bez wątpienia przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a tematyka rozprawy jest wysoce przydatna dla rozwoju nauk inżyniersko-technicznych ze szczególnym naciskiem na rozwój w dyscyplinie AEETiK.

Uwagi wymagające komentarza lub uzupełnienia/poprawy:

- Str. 32, proszę o doprecyzowanie, co autor miał na myśli pisząc, że „*model jest weryfikowalny, ale nie opisuje w satysfakcjonujący sposób przewidywanych właściwości MEMS-a*”?
- Proszę o doprecyzowanie, co dla autora oznacza termin „ *cienkie warstwy*”. W całej rozprawie podane są liczne definicje, ale brakuje jednoznacznego wskazania dla cienkich warstw.
- Proszę o doprecyzowanie, jakie błędy numeryczne miał na myśli Doktorant w odniesieniu do wyników symulacji przedstawionych na rysunku 9 (str.42).
- W rozdziale 3, na rysunkach 10-12 przedstawione są schematy materiałowe różnych wersji opMEMSów. W opisie Doktorant powołuje się na wyniki projektu MARS, w realizację którego był zaangażowany, i że skład materiałowy np. opMEMS-Si₃N₄, opMEMS-kanapka został z powodzeniem zastosowany. Pytanie brzmi dlaczego akurat taki skład materiałowy dał pożądane efekty i czy dla proponowanych w rozprawie opMEMSów zastosowanie innego składu nie byłoby jednak lepszym rozwiązaniem, a jeśli tak to w którym kierunku należałoby prowadzić prace technologiczne i dlaczego? Proszę o komentarz.
- W rozdziale 3, na rysunku 21 przedstawiona została komora pomiarowa ekranowana elektromagnetycznie do pomiaru mikrostruktur. Czy w ocenie Doktoranta prowadzenie takich pomiarów w ultraczystym środowisku pracy (ang. clean room) prowadziłyby do uzyskania dokładniejszych wyników? Proszę o komentarz.
- Proszę o wskazanie jakie warstwy izolacyjne były zastosowane przez Doktoranta, o których mowa w podpisie rysunku 22 na str. 68.
- W rozdziale 4 (podrozdział 4.3.1., str. 72) Doktorant wspomina, że: „*w ramach prac przygotowawczych do rozprawy, wykonano badania nanodrutów rozłożonych losowo na powierzchni podłoża eksperymentalnego we współpracy z dr. Inż. Januszem Fidelusem (GUM) oraz z Politechniką Gdańską*” – należy doprecyzować z kim dokładnie z Politechniki Gdańskiej współpracował Doktorant w trakcie tych eksperymentów.
- W rozprawie Doktorant powołuje się na kilka publikacji będących w procesie recenzji w trakcie przygotowywania tekstu rozprawy, proszę o podanie jaki jest status tychże prac obecnie.
- Niektóre obrazy SEM mają jasno i precyzyjnie wskazane, kto jest autorem, ale niektóre (np. rys. 28, str. 78) już nie. Domniemam, że Doktorant posiada zgodę na użycie tych zdjęć, proszę o potwierdzenie. W niektórych podpisach Doktorant podaje wprost opis „*zdjęcia wykonane w*

czasie wolnym pozostałym po zrealizowaniu celów krótkoterminowej misji naukowej” – nie jest jasne czemu ma służyć ta informacja – proszę o komentarz.

- Proszę o doprecyzowanie, co autor miał na myśli w odniesieniu do pierwszego akapitu w podsumowaniu rozdziału 4 (podrozdział 4.5, str. 83) „Nanostruktury (...) się wykonalne”.
- Proszę o komentarz w odniesieniu do informacji, że „Badania eksperymentalne wykazały, że opMEMS-y rozpraszają nieniszcząco moce rzędu do kilku miliwatów. Właściwa wartość zależy silnie od formy i egzemplarza urządzenia”. Pytanie brzmi jaka jest powtarzalność wytwarzania takich urządzeń i tym samym możliwość zastosowania w praktyce?
- Proszę o doprecyzowanie o jakie warstwy organiczne chodzi (str. 87) oraz jak było weryfikowane, że niszą maksymalną wartość mocy aktuacji posiadają urządzenia zanieczyszczone warstwami organicznymi?
- Proszę o doprecyzowanie z czego wynika, że sprawność serii opMEMS-ów różnić się może o całe rzędy wielkości oraz jaki zakres miał na myśli Doktorant? W tym samym akapicie Doktorant wspomina, że były badane inne struktury „pozostałych zbadanych”, proszę o doprecyzowanie o jakie urządzenia chodzi i jaki mają związek z opMEMSami opracowanymi w ramach niniejszej rozprawy.
- W rozdziale 4, na str. 88 Doktorant stwierdza, że „W większości wypadków, moce maksymalne (niszczące) pozostają w okolicach 5-10 mW, co odpowiada wychyleniom nie większym niż 20 μm w rezonansie lub ok. 1 μm statycznie” – proszę o doprecyzowanie skąd te wartości, czy są to obserwacje własne Doktoranta czy Doktorant powołuje się na prace innych autorów (a jeśli tak to proszę podać referencje).
- Proszę o doprecyzowanie o jakich sprawnościach mowa („stosunkowo niewielkie”) oraz o jakich celach optymalizacji w opisie tabeli 3 (str. 89).
- W rozprawie brak jest klarownego opisu różnic dla serii belek oznaczonych jako typ I–V (tabela 3), jaki był zamysł w procesie opracowywania tychże belek, jakie są najważniejsze różnice, kto był pomysłodawcą/twórcą tych rozwiązań. Proszę o doprecyzowanie tych braków.
- Proszę o doprecyzowanie, co przedstawiają poszczególne rysunki (1-4) przedstawione zbiorczo na rysunku 35.
- Proszę o doprecyzowanie, co autor miał na myśli w zdaniu: „Modyfikacją topologiczną można doprowadzić do stanu złożonego stanu wytężenia, który spowoduje modyfikację właściwości urządzenia poza wynikające ze stanu naprężeń własnych” (podrozdział 5.3.7., str. 104).
- Proszę o doprecyzowanie z czego wynika przyjęte założenie, żeby zdefiniować wzory jako minimalna wielkość okręgów ułożonych na wierzchołkach trójkąta równobocznego? (str. 110).
- Na rysunku 57 (d) i (e) przedstawione zostały wartości współczynnika a , a co z wartością b ? z rysunków nie wynika, żeby b wynosiło zero. W podpisie rysunku brak również odniesienia do rysunków oznaczonych od a-e.
- W podrozdziale 6.5, na stronie 120 Doktorant pisze: „Niestety nanodrutu ZnO zostały uszkodzone w procesie pomiaru, wobec czego nie wykonano właściwych pomiarów SPM, wykazano jednak, że wcześniej zmierzone właściwości były faktycznie skorelowane z nanodrutem, nie zaś z podłożem” – proszę o doprecyzowanie jakie wykonano eksperymenty, które pozwoliły postawić taki wniosek?
- W podrozdziale 6.7, na str. 122 Doktorant pisze: „Do zbadania wybrano wcześniej przygotowaną nanostrukturę FEBID-ową osadzoną na powierzchni SiO_2 pomiędzy elektrodami Pt. Wykonano szeregowo połączenie elektryczne do FEBID-u przez klej srebrny. Nie wykonano pomiaru oporu struktury ze względu na wartość przekraczającą zakres pomiarowy multimetru. Dla zabezpieczenia szeregowo zamontowano rezystor 4,3 $\text{M}\Omega$ ”. Proszę o doprecyzowanie: co było przedmiotem badania, dlaczego zastosowano akurat elektrody na bazie Pt, jaki konkretnie klej srebrny został zastosowany i dlaczego ten oraz dlaczego nie zastosowano elektrometru do pomiaru rezystancji (jaki zakres pomiarowy miał użyty multimetr). Z czego wynika wartość boczniaka 4,3 $\text{M}\Omega$?

- Na rysunku 63, str. 128 przedstawiony został projekt belki (rysunek nad zdjęciem SEM) lecz brak jest wymiarów, proszę o podanie zarówno wymiarów jak i schematu pomiarowego jaki został zastosowany.
- W tabeli 8, str. 130, przedstawione zostały wartości rezystancji R z dokładnością do 1Ω , proszę o informację w jaki sposób te wartości zostały wyznaczone i jaka była niepewność wyznaczenia wszystkich wartości przedstawionych w tabeli 8? Praca dotyczy zakresu metrologii (nanometrologii) wyniki pomiarów/obliczeń powinny być więc precyzyjnie wskazane.
- Na stronie 132 Doktorant pisze: „*Obie belki posiadały bardzo zbliżoną częstotliwość rezonansową.*”, nie podaje jednak tej wartości. Proszę o doprecyzowanie ile wynosiła ta częstotliwość rezonansowa.
- Na stronie 136 Doktorant opisuje wyniki uzyskane dla próbek E01-E03, ale brakuje informacji szczegółowych, tzn. o ile zostały zwiększone odległości pomiędzy ścieżkami przewodzącymi (w wartościach bezwzględnych albo względnych) oraz wyniki pomiarów potwierdzających brak przebicia i zachowanie liniowości charakterystyki I-U powinny być przedstawione w postaci graficznej.
- Na stronie 143 Doktorant pisze: „*Wyznaczona rezystywność wynosiła od 0,01 do $1 \Omega \text{cm}$ (w zależności od wygrzania nanodrutu) i była zgodna z wcześniej ustalonymi wartościami*”. Gdzie zostały w pracy podane te wartości, z czego te wartości wynikały? Proszę o komentarz.
- Na rysunku 79, str. 151 przedstawione zostały wyniki pomiarów I/V, proszę o komentarz z czego wynikały fluktuacje w pomiarze prądu i jaka wartość została w takim razie przyjęta w dalszych analizach?
- Na rysunku 80, str. 151 brakuje legendy odnośnie kolorystyki dla serii pomiarowych. W opisie pod rysunkiem czytamy: „Kolejne kolory przebiegów prezentują serie pomiarowe o rosnących prądach maksymalnych”, proszę o przygotowanie rysunku z legendą.
- Całkowicie niezrozumiałe jest mieszanie jednostek przy podawaniu temperatury, np. na stronie 156. Uwaga nie wymaga komentarza.
- Na rysunku 87, str. 157 przedstawione są różne przebiegi, ale osie nie mają podanych jednostek, również w podpisie do rysunku brak wyjaśnienia. Można domniemać, że są to jednostki układu SI, ale nie ma pewności. Proszę o komentarz.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera ciekawe i ważne dla rozwoju dyscypliny wyniki. Praca ma charakter eksperymentatorski oraz została poprzedzona analizą teoretyczną. Należy podkreślić, że prowadzenie badań podstawowych w obszarze technologii (nanotechnologii) jest coraz rzadsze w Polsce, m.in. ze względu na liczne trudności występujące w procesach technologicznych i tym samym podjęcie takiej tematyki przez Doktoranta zasługuje na wyróżnienie. Biorąc pod uwagę osiągnięcia przedstawione w rozprawie Pana **mgra inż. Bartosza Pruchnika** pt. „Nanometrologia prowadzona operacyjnymi przyrządami MEMS” stwierdzam, że rozprawa spełnia wszelkie warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może zostać dopuszczona do publicznej obrony. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

