

Prof. dr hab. inż. Artur Rydosz  
Instytut Elektroniki AGH  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Kraków, 24.07.2023

WPLYNĘŁO

2023 -07- 3 1

dn.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Wałpuskiego pt. „*Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby elektroniki strukturalnej*” której promotorem jest Pan dr hab. inż. Marcin Słoma, profesor uczelni (Politechnika Warszawska).

### Podstawa prawna

Recenzję wykonałem w odpowiedzi na pismo z dnia 27.06.2023 r. przesłane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Sareckiego 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.) oraz wymagań szczegółowych przekazanych w ww. piśmie przewodnim Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

### Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby elektroniki strukturalnej*” dotyczy opracowania wysokoprzewodzących ścieżek na podłożach wykonanych technikami przyrostowymi z wykorzystaniem pasty z nanoproszkiem srebra oraz z zastosowaniem procesu utwardzania laserowego. Rozprawa napisana została w języku polskim, posiada 10 rozdziałów oraz streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis skrótów i wyrażeń oraz listę publikacji.

W rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant przedstawił wprowadzenie do zagadnienia elektroniki strukturalnej i wyzwań technologicznych związanych z rozwojem elektroniki strukturalnej ze szczególnym naciskiem na zastosowanie druku przestrzennego (druku 3D) do fabrykacji układów elektronicznych. W rozdziale drugim rozprawy Doktorant zawarł analizę stanu wiedzy w zakresie metod i technik fabrykacji stosowanych w elektronice strukturalnej z uwzględnieniem podziału elektroniki strukturalnej ze względu na geometrię ścieżek przewodzących. Przedstawił wyjaśnienie różnic pomiędzy stosowanymi obecnie metodami druku, tj. druku strumieniowego (rys. 4), przerywanego druku strumieniowego (rys. 5), druku aerozolowego (rys. 6), metod bezpośredniego wytłaczania. Dokonał charakterystyki stosowanych powszechnie materiałów poligraficznych o właściwościach elektronicznych, tj. materiałów na bazie metali (2.2.1), węglowych materiałów przewodzących (2.2.2), polimerów przewodzących (2.2.3), związków metaloorganicznych (2.2.4) oraz różnych metod utwardzania. Cel i zakres pracy zostały przedstawione w rozdziale trzecim rozprawy, tj. „*celem rozprawy było opracowanie metody wytwarzania ścieżek przewodzących na polimerowych podłożach wykonanych addytywnie. Otrzymane ścieżki powinny charakteryzować się konduktywnością elektryczną wyższą niż kleje przewodzące, ponad  $2 \cdot 10^6$  S/m, a zaproponowana metoda nanoszenia i utwardzania materiału przewodzącego powinna również nadawać się do wykonywania połączeń z obecnymi na rynku komponentami*” – należy podkreślić, że cel rozprawy został jasno i klarownie sformułowany. W kolejnym rozdziale Doktorant przedstawił opis technologii bezpośredniego wytłaczania, czyli technologii będącej przedmiotem zainteresowań badawczych i istotą rozprawy. W rozdziale tym Doktorant dokonał znacznych skrótów myślowych przez co przedstawiona analiza wyników jest niejednoznaczna i utrudniona, co szczegółowo omówiłem w dalszej części recenzji. Addytywne wytwarzanie ścieżek przewodzących było przedmiotem rozdziału piątego rozprawy. W rozdziale tym Doktorant przedstawił kolejne etapy realizacji prac badawczych będących przedmiotem rozprawy, zaczynając od adaptacji materiałów dostępnych komercyjnie (5.1), poprzez zastosowanie materiałów

opracowanych laboratoryjnie (5.2), tj. materiałów opracowanych w Zakładzie Mikrotechnologii i Nanotechnologii PW na bazie nanoproszków srebra. W rozdziale tym przedstawione zostały autorskie wyniki prac badawczych realizowanych przez Doktoranta, w tym właściwości elektryczne – przewodność elektryczna uzyskana dla różnych parametrów technologicznych (rys. 17). Szczegółowe pytania do otrzymanych wyników przedstawiłem w kolejnej części recenzji. W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił wyniki uzyskane w trakcie testów połączeń otrzymanych w opracowywanych układach elektronicznych wykonanych w technologii elektroniki strukturalnej. W trakcie prac badawczych Doktorant wykorzystał opracowane podłoża PLA, HPPA, ULTEM oraz rezystory SMD (1206) i zastosował czteropunktowy pomiar rezystancji. W trakcie badań wykorzystał zarówno komercyjnie dostępne pasty (6.2), jak i pasty na bazie nanoproszku srebra (6.1). Szczegółowe pytania do wyników zaprezentowanych w tym rozdziale zawarłem w dalszej części rozprawy. Rozdział siódmy został nazwany „Badanie niezawodności elektroniki strukturalnej”, co w mojej ocenie jest zbyt generalnym określeniem, gdyż zawarte w rozdziale wyniki odnoszą się do wyników własnych Doktoranta a nie do wszystkich możliwych znanych z literatury. W rozdziale tym Doktorant przedstawił opis próbek poddanych badaniom, tj. ścieżki przewodzące wykonane na wydrukach FDM z filamentu PET-G. W tym rozdziale (co istotne) podana została informacja o liczbie próbek wykonanych w ramach eksperymentów. Wyznaczony został średni czas do uszkodzenia MTTF (ang. mean time to failure) oraz przeprowadzone zostały badania niezawodności (tabela 5). W rozdziale osóym Doktorant przedstawił badanie wpływu właściwości podłoża na efekty utwardzania laserowego z uwzględnieniem wymagań dotyczących podłoża (8.1), przedstawił właściwości termiczne badanych polimerów (tabela 6), oraz ocenił wpływ parametrów termicznych podłoża na przewodność utwardzonych laserowo warstw (8.2). Przeprowadzone przez Doktoranta badania z wykorzystaniem srebra i standardowych komponentów elektronicznych wykazały negatywny wpływ na niezawodność dlatego też Doktorant zdecydował się na opracowanie warstw metalicznych na bazie miedzi – materiału powszechnie stosowanego w przemyśle elektronicznym, co zostało opisane w rozdziale dziewiątym rozprawy. W rozdziale tym autor opisał wyniki eksperymentów z wykorzystaniem materiałów ze spiekaniem proszkiem miedzi (9.1) oraz materiałów ze związkami metaloorganicznymi na bazie miedzi (9.2), co było również przedmiotem zgłoszenia patentowego (P.438920, str. 78). Rozdział ten zawiera bardzo interesujące i praktyczne informacje o możliwości zastosowania opracowywanej przez Doktoranta metody. Rozprawę kończy rozdział dziesiąty – podsumowanie i wnioski, w którym Doktorant zebrał najistotniejsze wyniki uzyskane w trakcie realizacji prac badawczych opisanych w rozprawie.

**Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Prowadzenie prac badawczo-rozwojowych, w tym badań podstawowych w zakresie poszukiwania nowoczesnych materiałów stoi u podstaw nauk inżynierjno-technicznych, gdyż materiały 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 nie mogą być prowadzone w oderwaniu od prac technologicznych umożliwiających ich praktyczne wykorzystanie, m.in. w zakresie wytwarzania kluczowych elementów jakimi są ścieżki przewodzące w układach elektronicznych. W niniejszej rozprawie cel rozprawy został przedstawiony w rozdziale 3 (Cel i zakres pracy, str. 42), gdzie czytamy: „*celem rozprawy jest opracowanie metody wytwarzania ścieżek przewodzących na polimerowych podłożach wykonanych addytywnie. Otrzymane ścieżki powinny charakteryzować się konduktywnością elektryczną wyższą niż kleje przewodzące, ponad  $2 \cdot 10^6$  S/m, a zaproponowana metoda nanoszenia i utwardzania materiału przewodzącego powinna również nadawać się do wykonywania połączeń z obecnymi na rynku komponentami*”. Jednakże w rozdziale 10 (Podsumowanie i wnioski, str. 82) czytamy „*Na podstawie analizy literatury naukowej oraz ofert rynkowych sformułowano cel pracy, którego podstawowym założeniem było opracowanie w pełni przestrzennej metody wytwarzania elektroniki na podłożach termoplastycznych (...)*”, co należy rozumieć jako poszerzenie celu przedstawionego w początkowym rozdziale rozprawy. Niemniej jednak, należy uznać, że cel naukowy został jasno sformułowany a otrzymane wyniki potwierdzają jego

osiągnięcie pomimo uchybień poczynionych przy opisywaniu uzyskanych wyników, co szczegółowo opisałem w dalszej części recenzji.

**Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

Tematyka badawcza rozwijana przez Doktoranta dotyczyła opracowania nowej metody wytwarzania ścieżek przewodzących na podłożach wykonanych technikami przyrostowymi, co jest dość nowym zagadnieniem badawczym, toteż nie dziwi fakt, że w rozprawie ujęte zostały publikacje z ostatnich dwóch dekad. Doktorant odwołał się do 195 pozycji literaturowych uwzględniając również swoje prace w tematyce rozprawy. Jednakże, w kilku miejscach Doktorant nie ustrzegł się przed zbyt skrótowym opisem uzyskanych wyników i następującym po opisie odwołaniem do swoich wcześniejszych prac, których co prawda jest współautorem, ale dla przejrzystości wyniki uzyskane w ramach opracowanej metody wytwarzania ścieżek przewodzących (będącej głównym celem rozprawy) powinny być przywołane *explicite* bez odsyłania czytelnika do innych prac. Odesłanie takie powinno mieć w tym przypadku charakter pomocniczy celem poszerzenia wiedzy.

Praca ma duży potencjał wdrożeniowy, co potwierdza przytoczone w rozprawie zgłoszenie patentowe z 2021 roku (P.438920 – na dzień przygotowywania recenzji zgłoszenie ma status przygotowanie w toku) dlatego też dziwi brak odwołania do patentów w tematyce rozprawy, np. WO2020215839A1, WO9303192A1.

**Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwiej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Biorąc pod uwagę wyniki przedstawione w rozprawie należy uznać, że Doktorant użył właściwych metod w celu rozwiązania postawionego problemu naukowego oraz posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych, jednakże w opisie osiągnięć nie ustrzegł się zastosowania skrótów myślowych oraz część wyników zostało przedstawionych w sposób zdawkowy, co szczegółowo opisałem w dalszej części recenzji, tj. w uwagach wymagających odpowiedzi ze strony Doktoranta.

**Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Zgodnie z tytułem rozprawy przedmiotem rozprawy było „opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek możliwej do zastosowania w elektronice strukturalnej”. Podjęta tematyka badawcza jest odpowiedzią na brak takich metod w obecnie stosowanych procesach prototypowania elektroniki, a która z powodzeniem zwiększa możliwości wykorzystania elektroniki strukturalnej do fabrykacji nowoczesnych urządzeń elektronicznych. W literaturze przedmiotu brak jest gotowych rozwiązań w ww. obszarze, a ze względu na duże możliwości wdrożeniowe badacze z reguły nie ujawniają szczegółowych informacji na temat opracowywanych rozwiązań technologicznych. Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy do indywidualnego wkładu Doktoranta można zaliczyć:

- Opracowanie metody otrzymywania ścieżek o długości ok. 20 mm i o niskiej rezystancji ( $\sim 0,2 \Omega$ ), co umożliwi fabrykację układów elektronicznych o wysokiej wydajności.
- Opracowanie metody otrzymywania ścieżek na bazie nanoproszku srebra o rezystancji ( $\sim 0,1 \Omega$ ). Opracowana metoda wymaga dalszych badań ze względu na możliwe do wystąpienia efekty złączowe na styku cyna – srebro.
- Opracowanie wstępnej metody otrzymywania ścieżek na bazie związków metaloorganicznych zawierających miedź i przeprowadzenie pierwszych testów w tym kierunku.

Doktorant wykazał również, że:

- (i) potrafi dokonać analizy dostępnych obecnie rozwiązań i wskazać ich wady i zalety, w szczególności (co warto jest podkreślić w naukach technicznych) rozumie, że istotne jest dobranie odpowiedniej metody do danego zastosowania w tym przypadku do zastosowanego podłoża czy utwardzanego materiału (str. 37);
- (ii) dokonać oceny otrzymanych wyników i wyciągnąć wnioski płynące z eksperymentów (str. 62);
- (iii) sformułować problem badawczy/technologiczny (str. 68) i zaproponować jego rozwiązanie;
- (iv) krytycznie spojrzeć na otrzymane wyniki (str. 72) – niestety nie dla wszystkich wyników, co szczegółowo opisałem w dalszej części recenzji.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki zostały opublikowane w trzech artykułach z listy JCR (Applied Sciences-Basel, MDPI, vol. 12, nr 3, 2022, Numer artykułu: 12031110, s. 1-8, DOI:10.3390/app12031110, Materials, MDPI, vol. 14, nr 15, 2021, Numer artykułu: 4122, s. 1-9, DOI:10.3390/ma14154122, Advanced Engineering Materials, vol. 23, nr 4, 2021, Numer artykułu: 2001085, s. 1-7, DOI:10.1002/adem.202001085) oraz były prezentowane na konferencjach. Ponadto, wyniki zostały zgłoszone do ochrony patentowej (M. Słoma, B. Wałpuski; „Materiał z metaliczną fazą wiążącą do zastosowań w technikach addytywnych” 2021, P.438920).

### **Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Poprawność redakcyjna jest zdecydowanie najsłabszą stroną rozprawy, w szczególności błędy stylistyczne, rzeczowe, interpunkcyjne, nieład w opisie i przygotowaniu rysunków wskazują na duży pośpiech w przygotowaniu i złożeniu rozprawy, co w żaden sposób nie usprawiedliwia Doktoranta. Już po pierwszym czytaniu rozprawy rzuca się w oczy brak korekty, która na tym etapie mogłaby być wykonana nawet przez laika. Niestety brak staranności w przygotowaniu rozprawy mocno rzutuje na odbiór całej rozprawy, w szczególności zaś na zrozumienie niektórych wyników, co szczegółowo wypunktowałem w części dotyczącej wad i słabych stron. Niektóre uwagi dotyczące poprawności redakcyjnej mają jedynie charakter porządkowy i jako takie nie wymagają odpowiedzi.

### **Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?**

Należy podkreślić, że prowadzenie badań w obszarze nowych technologii otrzymywania nowoczesnych materiałów na potrzeby współczesnej elektroniki (w tym elektroniki strukturalnej) 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 inżynieryjno-technicznych. W trakcie realizacji niniejszej rozprawy Doktorant przebadał metodę pozwalającą na wytworzenie wysokoprzewodzących ścieżek na podłożach wykonanych technikami przyrostowymi, w tym podłożach elastycznych stanowiących nowy nurt badań w elektronice. Podłoża takie zaczynają być stosowane do fabrykacji płytek drukowanych FPC (ang. flexible printed circuits) w miejsce klasycznych PCB (ang. printed circuit boards). Ponadto, opracowanie metody, która jednocześnie pozwala na wykonanie past przewodzących bez degradacji termoplastycznego podłoża otwiera nowe możliwości w rozwoju układów elektronicznych, w tym układów sensorowych nowej generacji oraz rozwijanych intensywnie układów do zastosowań w elektronice zintegrowanej z odzieżą tzw. wearable electronics. Tym samym należy uznać, że tematyka rozprawy jest wysoce przydatna dla rozwoju nauk inżynieryjno-technicznych ze szczególnym naciskiem na rozwój elektroniki i technologii kosmicznych.

### **Jakie są wady i słabe strony rozprawy?**

Żadna praca naukowa nie jest pozbawiona słabych stron, które najczęściej wynikają z ograniczeń w trakcie realizacji prac badawczych, w tym ograniczeń finansowych, czasowych i technologicznych. Swoje uwagi podzieliłem na uwagi krytyczne nie wymagające komentarza oraz te, które w mojej ocenie wymagają komentarza i powinny być traktowane jako głos w dyskusji na temat dalszych możliwości

wykorzystania opracowywanych przez Doktoranta materiałów, ponieważ materiały te posiadają duży potencjał do zastosowania w nowoczesnej elektronice.

Uwagi wymagające komentarza lub uzupełnienia/poprawy:

- Str. 44: czym podyktowane było zastosowanie proporcji 6:1 (materiał B) i 6:2 (materiał C) o lepkościach odpowiednio 0,97 Pa·s i 0,66 Pa·s?
- Str. 44: z czego wynika przyjęcie następujących ciśnień 0,5 bara; 1,0 bar; 1,4 bar (a nie np. 1,5?)
- Str. 45: w jaki sposób zostały wyznaczone błędy i niepewności zaznaczone na rysunku 12 (a, b, c)? Z rysunku wynika, że niepewności zostały wyznaczone wyłącznie dla szerokości ścieżek, a co z prędkością posuwu? Jaki model został przedstawiony na rysunku i dlaczego nie podano  $R^2$  dla wskazanych dopasowań? Brakuje również rysunku gdzie wyniki uzyskane dla różnych ciśnień, ale tego samego materiału byłby pokazane celem lepszej wizualizacji otrzymanych wyników. Brakuje również informacji ile próbek było badanych (statystyka) oraz czy przy pomiarach w różnych ciśnieniach była analizowana ta sama próbka czy za każdym razem inna, ale z tej samej (a być może z innej) serii. Ten fragment rozprawy wymaga przygotowania szczegółowych odpowiedzi.
- Str. 47 rys. 13: nasuwa się pytanie dlaczego krzywą płynięcia przedstawiono wyłącznie dla materiału B, opis rysunku jest zdawkowy a legenda przesadnie duża. Co ważniejsze, nie jest dostatecznie jasno wyjaśnione czy dane przedstawione na rysunku są danymi pomiarowymi (czarna kropka – *shear stress*) czy danymi z symulacji oraz jaki sens ma podawanie parametrów z dokładnością do 13 miejsca po przecinku skoro dokładność jest o 2 rzędy mniejsza niż wartość bazowa? Ten fragment wymaga przygotowania szczegółowej odpowiedzi.
- Str. 48: wzór (4) brakuje jednostek dla Q i V.
- Akapit „*Dobry model (...) przekroju poprzecznego ścieżek*” nie ma odwołania do rysunku. Analiza tego fragmentu tekstu jest bardzo utrudniona i niejednoznaczna, a stanowi ona zasadniczą część rozprawy i wyników własnych Doktoranta. W szczególności fragment: „*przemawia za tym fakt, że zarówno dla materiału B jak i C uzyskano ścieżki o szerokości niewiele poniżej 0,5 mm (...)*” nie wskazuje jednoznacznie przy jakich warunkach ten stan został osiągnięty zostawiając czytelnika bez odpowiedzi i z utrudnioną analizą treści. Należy podkreślić, że od kandydata na stopień doktora w naukach technicznych wymagana jest rzetelna, skrupulatna i analiza otrzymanych danych eksperymentalnych połączona z jasnym, przejrzystym i poprawnym opisem nie pozostawiającym miejsca niedomówieniom. W kolejnym zdaniu tego akapitu „*Modelowa krzywa znajduje się powyżej pomiarów, jednak dość wiernie oddaje kształt wyników i przedstawia wyniki o ok. 0,2 mm większe niż zmierzone.*” – z rys. 12 wynika coś innego, a przynajmniej 0,2 mm nie wydaje się być potwierdzone.
- Str. 50: podano przewodność właściwą:  $1,92 \pm 1,38 \cdot 10^6$  S/m (~71%);  $1,85 \pm 0,81 \cdot 10^6$  S/m (~44%),  $1,86 \pm 0,90 \cdot 10^6$  S/m (~48%), brak jest natomiast dyskusji nt. otrzymanych wyników. Dyplomant odsyła czytelnika do pracy [154], której jest współautorem, ale mimo wszystko komentarz dotyczący wyników w szczególności takich gdzie dokładność jest niska (40-70%) powinien znaleźć się w tekście rozprawy.
- Str. 52: brak jest wyjaśnienia z czego wynikają wartości mocy dobrane w trakcie procesów, skąd wynika taki rozrzut od 2,3 W do 4,6 W (patrz tabela 3, str. 53).
- Str. 53 rys. 17: na podstawie jakich danych obliczone zostały błędy i niepewności przedstawione na rysunku i dlaczego dotyczą one wyłącznie przewodności elektrycznej (oś Y) a nie uwzględniono niepewności pomiaru mocy lasera (oś X). Wyniki przedstawione dla mocy powyżej 4,4 W wskazują na uzyskanie w skrajnych przypadkach ujemnej przewodności elektrycznej – proszę o komentarz, oraz w tabeli 3 nie znajdują się dane jakoby badania były prowadzone przy mocach powyżej 4,6 W na co wskazuje rysunek 17 – proszę o wyjaśnienie. Proszę również o komentarz jak należy rozumieć w kontekście użyteczności opracowanego

materiału uzyskiwane wartości najwyższej przewodności właściwej (tabela 3) skoro podano zakres  $\pm$  to czy najwyższa to było 3,2 czy  $3,2+0,13 = 3,33$  (dla materiału PLA)?

- Str. 57: Autor pisze: „*Dla utwardzania na folii PET (...) w całym badanym zakresie mocy, czyli od 2,4 W do 3,6 W.*” nasuwa się pytanie dlaczego moc w tym przypadku była inna niż poprzednio (patrz tab. 3, rys. 17) oraz skąd wynikał taki zakres badania? Gdyż w kolejnych zdaniach pojawia się inny zakres, tj. od 3,4 W do 4,2 W – co budzi wątpliwości przy interpretacji. Doktorant zastosował skróty myślowe w związku z czym proszę o komentarz.
- Str. 58 rys. 20: pytania jak poprzednio, skąd i na jakiej podstawie wyznaczono niepewności zaznaczone na rysunku (analiza błędów i niepewności jest bardzo słabą stroną rozprawy).
- Str. 60: wyniki otrzymanych rezystancji. Doktorant dość wybiórczo dokonuje analizy otrzymanych wyników, tj. dla materiału PLA otrzymane pomiary rezystancji wyniosły  $60 \text{ m}\Omega \pm 11 \text{ m}\Omega$ , co oznacza że najniższa zmierzona wartość to  $49 \text{ m}\Omega$ . W kolejnym zdaniu Autor pisze „*Nieco niższe wartości odnotowano dla HPPA,  $42 \text{ m}\Omega \pm 16 \text{ m}\Omega$ .*”. Oznacza to, że w skrajnym przypadku otrzymano  $58 \text{ m}\Omega$ , co jest prawie tyle samo co bazowa wartość dla PLA ( $60 \text{ m}\Omega$ ) i powyżej wartości bazowej. W całym opisie tych wyników (jak i poprzednich) brakuje jednoznacznego wskazania ile próbek było badanych, jaka jest statystyka, czy otrzymane wyniki zostały rzetelnie opracowane – tzn. co było przyczyną otrzymania takich rozrzutów rezystancji w tym przypadku (i przewodności w poprzednich rozdziałach). Po raz kolejny autor odsyła do publikacji (w tym przypadku do [167]), której jest współautorem. Co do zasady rozprawa doktorska powinna stanowić całość merytoryczną a odwołania do literatury, w szczególności swoich prac, powinny stanowić jedynie dodatek i uzupełnienie wiadomości a nie konieczność poszukiwania w nich kluczowych informacji.
- Str. 66 rys. 24: legenda jest niezrozumiała, podobnie jak rysunek gdyż nie podane zostały dane statystyczne a jedynie liczebność próbek. Nie jest także zrozumiałe, co Autor miał na myśli podpisując rysunek: „*Wyniki pomiaru początkowej rezystancji addytywnie wykonanych układów elektronicznych*” w świetle przedstawionych informacji na wykresie. Rysunek wymaga pogłębionego komentarza.
- Str. 66: nie jest dostatecznie jasne, co Autor miał na myśli używając wyrażenia „*Jest to przykład tzw. chorób wieku dziecięcego (...)*” – ten fragment rozprawy wymaga przerehabilitacji.
- Str. 66: w odniesieniu do poznania mechanizmu uszkodzenia proszę o komentarz dlaczego nie rozważano wykonania analiz przy wykorzystaniu mikroskopu elektronowego SEM?
- Str. 67 rys. 25: uwaga podobna jak dla rys. 24 – nieczytelna legenda, nieczytelny podpis osi OY, brak informacji nt. danych statystycznych na podstawie których został przygotowany rysunek.

#### Uwagi nie wymagające komentarza lub uzupełnienia:

- W spisie skrótów i wyrażen jest nieład edycyjny, tzn. raz Doktorant wyjaśnia wszystkie skróty dokładnie z podaniem nazw polskich i angielskich, a czasami tylko z podaniem nazw polskich.
- Brak konsekwencji w podpisach pod rysunkami, tzn. raz stosowana jest kropka na końcu podpisu (np. rys.2, rys. 17) a raz nie (np. rys.1, rys. 16).
- Ogólna uwaga edycyjna to brak odwołania w tekście do wszystkich rysunków, np. do rys. 3.
- W całej rozprawie panuje chaos i brak konsekwencji w zakresie stosowania skrótów i wyjaśnień, tzn. raz Doktorant używa dużych liter (np. na str. 15) by dwie strony dalej używać małych liter (str. 17). Przykładów takich można podać bardzo wiele, co wskazuje na ewidentny brak korekty pracy przed jej złożeniem do druku. Uchybienia takie można odnaleźć nawet w jednym zdaniu druk ciągły (początek na str. 17) i druk przerywany (str. 18).
- Brak konsekwencji przy stopniach  $50^\circ\text{C}$  vs.  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; podobnie dla  $980\text{nm}$  vs.  $980 \text{ nm}$  czy  $10\text{W}$  vs.  $10 \text{ W}$ .
- Liczne błędy interpunkcyjne, np. (str. 49), literówki (np. str. 69, str. 77, str. 80).
- Na str. 43 pojawia się ciekawy związek frazeologiczny „masowa personalizacja”, bo albo coś jest masowe i w kontekście rozprawy należy rozumieć jako powszechnie dostępne, albo coś jest

spersonalizowane czyli zaprojektowane pod konkretne wymagania. De facto po procesie projektowania może nastąpić fabrykacja urządzeń/układów elektronicznych na dużą (masową) skalę, ale wyrażenie „umożliwi masową personalizację produkowanych urządzeń” jest dość niefrasobliwe.

- Str. 46: brak domknięcia nawiasu [] w równaniu (1).
- W tabeli 3 zamiast przecinka (,) są kropki (.). Tak samo w tabeli 4, ponadto przy źródłach powinno być Bhat *et al.*, jeżeli występuje więcej niż jeden autor (lub Bhat i in.).
- Str. 57: brak odwołania do rys. 19.
- Str. 57: „bardziej wymagające” – w rozprawach doktorskich w zakresie nauk technicznych stawiamy na precyzyjne i mierzalne wartości.
- Str. 58 rys. 20 vs. str. 53 rys. 17 – brak konsekwencji w opracowywaniu rysunków. Chaos i bałagan edycyjny.
- Str. 59: zdanie zaczynające się od „*Połączenia takie poza (...) resztą układu [165]*” ma liczne błędy stylistyczne, co uniemożliwia jego zrozumienie. Brak też kropki poprzedzającej wyraz <Połączenia>, co nie zmienia faktu, że zdanie jest niezrozumiałe.
- Str. 60 rys. 21: brak legendy – czytelnik musi się domyślać, co przedstawiają kolejne etapy wytwarzania oraz brak odwołania do rysunku (co ciekawe na rys. 22 str. 61 taki opis już został przedstawiony – brak konsekwencji).
- Str. 61: brak informacji z jaką dokładnością wykonane zostały ścieżki: 0,5 mm, 1 mm i 2 mm.
- Str. 62 rys. 23: w podpisie należałoby jednoznacznie napisać: porównanie rezystancji nie zaś właściwości elektrycznych, bo podpis wskazuje na prezentowanie większej liczby danych aniżeli faktycznie zaprezentowano (podobnie dla rys. 17 i rys. 20).
- Str. 62: Autor pisze „na akceptowalnym poziomie” przy czym wcześniej poziom ten nie został nigdzie zdefiniowany. Ponowna uwaga, że w rozprawie doktorskiej stosujemy mierzalne wartości.
- Str. 63: Autor wzmiankuje temperaturę 71°C, nasuwa się pytanie skąd taka dokładna wartość i jaka była dokładność pomiaru/stabilizacji tej wartości.
- Str. 69: Doktorant posługuje się żargonem „branża automotive” chociaż istnieje bardzo dobry polski odpowiednik, tj. branża motoryzacyjna.
- Str. 76: brakuje informacji o szkiełkach mikroskopowych (tj. informacji technicznych/technologicznych) użytych w trakcie eksperymentów.

### Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera ciekawe i ważne dla rozwoju dyscypliny wyniki o dużym potencjale wdrożeniowym. Należy również podkreślić, że prowadzenie badań podstawowych w obszarze technologii 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 mgr. inż. **Bartłomieja Walpuskiego** pt. „*Opracowanie metody wytwarzania wysokoprzewodzących ścieżek na potrzeby elektroniki strukturalnej*” 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.



