

dr hab. inż. Jerzy Potencki, prof. uczelni  
Katedra Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechniki Rzeszowskiej

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Mileny Kiliszkievicz

### **„Właściwości struktur elektronicznych i fotonicznych wykonanych w technice druku strumieniowego”**

Opracowana na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica, pismo RDN AEE/119/2022 z dnia 20 lipca 2022.

#### **Tematyka pracy**

---

Recenzowana praca ma typowo technologiczny charakter.

Tytuł rozprawy sugeruje, że jej przedmiotem będzie badanie własności wybranej klasy struktur elektronicznych i fotonicznych wykonanych w technice druku strumieniowego. Jest to tylko sugestia, bo Autorka nie formułuje tezy pracy, ani ogólnego jej celu (co stosowane jest często zastępczo w przypadku prac o charakterze technologicznym), ale ogranicza się jedynie do sformułowania 6 celów cząstkowych, które w wersji oryginalnej zamieszczam poniżej.

Cele rozprawy:

- 1) *automatyzacja pomiarów struktur drukowanych*
- 2) *opracowanie metod przygotowania podłoży do druku techniką strumieniową,*
- 3) *analiza jakości warstw przewodzących oraz wykonanie testów starzeniowych uzyskanych wydruków,*
- 4) *opracowanie sposobu drukowania jednorodnej warstwy dielektrycznej poprzez analizę wpływu czynników na drukowanie warstw izolacyjnych,*
- 5) *analiza możliwości wykorzystania druku strumieniowego w technikach mikrofalowych,*
- 6) *analiza możliwości wykorzystania druku strumieniowego przy zastosowaniu tuszów bazujących na kropkach kwantowych.*

Druk strumieniowy stosowany jest od wielu lat do wykonywania klasycznych wyrobów poligraficznych. Zastosowanie tej techniki do wytwarzania elementów elektronicznych jest podejściem relatywnie nowym, dla którego nadal brakuje rzetelnych podstaw do

opanowania druku strumieniowego jako powtarzalnej i odtwarzalnej metody wytwarzania ścieżek przewodzących, a idąc dalej innych funkcjonalnych komponentów układów elektronicznych. W tym kontekście temat rozprawy jest aktualny, interesujący i perspektywiczny.

## **Układ pracy**

---

Rozprawa wydana została przez Politechnikę Wrocławską w formie nieindeksowanej monografii w roku 2022. Całość została zawarta na 141 stronach tekstu (11 rozdziałów), zawiera 118 rysunków i 11 tabel. Praca zawiera zbiór 197 cytowanych przez Doktorantkę pozycji bibliograficznych, a zamykają ją wykazy rysunków i tabel.

Cytowane publikacje w ogromnej większości pochodzą z ostatnich kilku lat i są to głównie artykuły z wiodących w przedmiotowej dyscyplinie czasopism i konferencji międzynarodowych. Liczba publikacji z zakresu elektroniki drukowanej, w tym również z obszaru techniki druku strumieniowego gwałtownie wzrasta w ostatnim okresie. Jest więc zrozumiałe, że nie wszystkie z istotnych publikacji zostały w wykazie zawarte.

Można przyjąć, że cytowane prace w wystarczająco rozległy sposób przedstawiają aktualne w tym zakresie osiągnięcia. Zaprezentowany stan wiedzy świadczy o dobrej znajomości tematyki przez Autorkę.

Doktorantka jest współautorem 5 spośród cytowanych pozycji, w których poruszana tematyka jest bardzo ściśle związana z zagadnieniami rozpatrywanymi w opiniowanej pracy.

Rozprawa zawarta jest w 11 rozdziałach. Rozprawa składa się z bardzo obszernej części literaturowej, zawartej głównie w rozdziałach 2-5. Poświęcone są one ogólnym zagadnieniom elektroniki drukowanej, technice druku strumieniowego, obszarom zastosowań technik drukarskich w elektronice, stosowanym materiałom, oraz omówieniem przebiegu procesu drukowania strumieniowego. Materiał ten przygotowany bardzo starannie i w sposób nawet nadmiarowy jak na potrzeby pracy.

Kolejne rozdziały to omówienie wyników prac własnych.

I tak w rozdziale 6. omówione zostają wyniki prac wstępnych.

Bardzo obszerny rozdział 7. zawiera opis prac związanych z wykonywaniem struktur przewodzących oraz wyników badań ich własności.

W kolejnej części (rozdział 8.) Autorka zamieszcza badań struktur pojemnościowych - w układzie klasycznego kondensatora warstwowego o raz struktur kondensatorów grzebieniowych.

Dwie kolejne części dotyczą odpowiednio, bardzo wstępnych badań aplikacji druku strumieniowego w obszarze mikrofal oraz struktur fotonicznych.

Całość kończy rozdział 11. stanowiący podsumowanie i ocenę końcową.



## **Ocena uzyskanych wyników**

---

Wobec braku wyraźnie sformułowanego generalnego celu pracy, przy jej ocenie chciałbym się odnieść do każdego z przedstawionych celów szczegółowych, które Autorka postawiła przed sobą do realizacji.

### **1. Automatyzacja pomiarów struktur drukowanych**

Pierwszy w kolejności cel to automatyzacja procesów pomiarowych. Wynikiem prac w tym zakresie jest opracowanie stanowiska pomiarowego - zrealizowanego w ramach prac dyplomowych, w których Autorka pełni rolę konsultanta. Jest to praca o typowym charakterze inżynierskim (konstrukcyjnym), a przy jej realizacji nie zostały zasygnalizowane do rozwiązania żadne problemy o charakterze naukowym. Jednocześnie w pracy poza jednym krótkim akapitem brak jest wskazania obszaru badań, w którym to stanowisko było wykorzystane.

### **2. Opracowanie metod przygotowania podłoży do druku techniką strumieniową**

W pracy znajdujemy informacje o trzech różnych wariantach wstępnego przygotowania podłoży. Sprowadzają się one do zastosowania do mycia podłoża wody dejonizowanej, alkoholu izopropylowego i acetonu.

Dane literaturowe są w tym obszarze bardzo obszerne i przedstawiane metody nie wnoszą w tym obszarze żadnych nowości. W tym kontekście, trudno tutaj mówić o opracowaniu metod, a raczej o zastosowaniu w badaniach własnych określonych, znanych z literatury sposobów przygotowania podłoża. Te wstępne badania, jednak są niezbędne, jak słusznie zauważa Autorka, że każdy rodzaj podłoża wymaga innego rodzaju mycia czy też jego aktywacji.

### **3. Analiza jakości warstw przewodzących oraz wykonanie testów starzeniowych uzyskanych wydruków**

W pracy zamieszczone są wyniki wszechstronnych badań struktur testowych. Obejmują swoim zakresem badania mikroskopowe, badania własności elektrycznych warstw jak i badania niezawodnościowe.

Podobne analizy znaleźć można w licznych publikacjach. Wyniki przedstawione w pracy zatem nie wnoszą istotnych nowości, poza faktem, że badania te zostały zrealizowane przy wykorzystaniu określonego tuszu, określonego producenta i pozwalają na bardzo szczegółową charakterystykę tego konkretnego materiału.

Część z tych badań można uznać za niepełne, lub też może tylko niewłaściwie opisane. Dotyczy to np. przypadku badań odporności próbek na zginanie. W pracy nie znajdziemy np. informacji po której stronie podłoża naniesiona została badana warstwa. A jest to bardzo istotne, z punktu widzenia analizy procesu zmiany jej rezystancji, gdyż w trakcie zginania - warstwa przewodząca umieszczona na stronie zewnętrznej jest poddawana działaniu sił rozciągających, a ta znajdująca się po stronie wewnętrznej - siłom ściskającym. Mamy zatem do czynienia z powstawaniem naprężeń wewnętrznych o

różnym charakterze.

Dodatkowo wyniki przedstawione na Rys. 7.18. nie zgadzają się z opisem eksperymentu. Przy zadanych parametrach testu, po 43 godzinach próby można by oczekiwać liczby pojedynczych zginień na poziomie około 250000, a na podanym wykresie kończą się już na poziomie 150000.

Autorka na zakończenie konkluduje, że przyczyną kilkukrotnego wzrostu rezystancji tak badanych próbek spowodowane są „pęknięciami w strukturze oraz zmianą chropowatości”. Nie przedstawia jednak żadnej dokumentacji tego stwierdzenia. Mogły by nimi być np. obrazy mikroskopowe struktur z zaobserwowanymi defektami tego typu.

#### **4. Opracowanie sposobu drukowania jednorodnej warstwy dielektrycznej poprzez analizę wpływu czynników na drukowanie warstw izolacyjnych,**

##### **Kondensatory warstwowe**

Przeprowadzone zostały badania własności struktury metal-dielektryk-metal przy stosowaniu różnych zmiennych procesu technologicznego pod kątem możliwości realizacji jednorodnej warstwy dielektrycznej. W badaniach tych brakuje informacji o grubościach poszczególnych warstw, które prawdopodobnie mają największy wpływ na wartości uzyskiwanej pojemności. Autorka nie podaje również podstawowej informacji na temat wartości przenikalności względnej stosowanego dielektryka.

##### **Kondensatory grzebieniowe**

W pracy zamieszczono wyniki podstawowych parametrów kondensatorów oraz wyniki badań niezawodnościowych obejmujących badania klimatyczne oraz odporności na zginanie.

W przypadku tych drugich pojawiają się te same uwagi co w punkcie 3. Tutaj dodatkowo brak informacji odnośnie usytuowania „palców” kondensatora w stosunku do kierunku zginania próbki (równoległe czy też prostopadłe). Porównanie wyników takich testów mogło by być może być pomocne przy poznaniu mechanizmu uszkodzeń warstw w przypadku odkształcania podłoża.

Wyniki badań klimatycznych przynoszą informację o zmianie wartości pojemności i prawie 10-krotnym wzroście współczynnika strat  $\text{tg}\delta$ . Autorka stawia tezę, że przyczyną tak ogromnej zmiany parametrów jest zmniejszanie się rezystancji i utlenianie się warstw. Nie precyzuje przy tym jaką rezystancję ma na myśli oraz jaki jest mechanizm jej wpływu na ten parametr. Na początku rozdziału 8.3 znajdujemy wzory 10-12, które pozwalają na obliczenie pojemności kondensatora grzebieniowego. A w nich żadna rezystancja się nie pojawia.

#### **5. Analiza możliwości wykorzystania druku strumieniowego w technikach mikrofalowych**

Bardzo ciekawy wątek, który sam w sobie stanowi bardzo atrakcyjny temat na samodzielną pracę doktorską. Niestety został on potraktowany bardzo powierzchownie.



Autorka w pracy ogranicza się tak naprawdę do wydrukowania w technice druku strumieniowego ścieżek przewodzących (jedno- i dwukrotny nadruk) tworzących linię mikropaskową oraz określenia przy pomocy analizatora widmowego jej podstawowych własności.

W trakcie tych badań uzyskuje nieoczekiwane wyniki (strona 110), które podsumowuje stwierdzeniem:

*„Zaskoczeniem jest fakt, że grubość dwóch warstw jest mniejsza niż jednej.”*

I niestety przechodzi nad tym faktem do porządku dziennego, nie podejmując żadnej próby wyjaśnienia przyczyn tego fenomenu.

W drugim przypadku jest to przewodząca linia konturowa w układzie rezonatora pierścieniowego. Badania te z punktu widzenia technologicznych możliwości realizacji układów mikrofalowych o zadanych własnościach w technologii druku strumieniowego nic nowego nie wnoszą.

#### **6. Analiza możliwości wykorzystania druku strumieniowego przy zastosowaniu tuszów bazujących na kropkach kwantowych.**

W tym obszarze również aktualne pozostają wszystkie uwagi i spostrzeżenia odnośnie pkt. 5. Tematyka bardzo aktualna, temat na bardzo interesującą pracę doktorską, został tutaj jedynie marginalnie zasygnalizowany.

W pracy Autorka ogranicza się jedynie do wykonania nadruków dwóch znaków firmowych oraz badania chropowatości prostej struktury – przy jednokrotnym i dwukrotnym nadruku powierzchni. Do badań wykorzystuje komercyjną kompozycję przewodzącą zawierającą kropki kwantowe. Całość została zawarta na czterech stronach pracy. Jest to zbyt skromny program badań by można w nim mówić o analizie możliwości.

### **Konkluzja**

---

W pracy Autorka dokonała bogatego przeglądu literaturowego i wykazała się bardzo dobrą znajomością i umiejętnościami praktycznymi w obszarze techniki druku strumieniowego.

Czytając pracę jednakże, można odnieść wrażenie, że przypomina ona bardziej raport, czy też sprawozdanie z przeprowadzenia zadanych badań i prezentacji ich wyników, niż rzetelną pracę naukową. Brakuje w niej w moim odczuciu bardziej analitycznego spojrzenia i oceny uzyskanych wyników, a także bardziej refleksyjnego podejścia do oceny niektórych zaobserwowanych zjawisk i wyników.

Zgodnie z aktualnie obowiązującą ustawą rozprawa doktorska:

*„Art. 13.1. (...) powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe,*

*konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej (...) oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.”*

Analizując niniejszą pracę, trudno uznać, że spełnia ona - w swojej aktualnej postaci - wymagania ustawowe. Brak tezy, czy też ogólnego celu pracy i w konsekwencji brak jednoznacznie sformułowanego problemu naukowego.

Biorąc zatem powyższe pod uwagę, uważam, że przedstawiona praca, pomimo tego, że zawiera bardzo bogaty materiał doświadczalny, to w moim odczuciu nie spełnia wymagań prawnych i przedstawienia jej do obrony w przedstawionej wersji uważam za przedwczesne i zgodnie ze swoim odczuciem Wysokiej Radzie nie będę jej rekomendował.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Adam' or similar, written in a cursive style.