

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

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Stęplewskiego

### **„Wytwarzanie i właściwości elementów biernych wykonanych w technice cienko- i grubowarstwowej zintegrowanych z wielowarstwową płytką obwodu drukowanego”**

Opracowana na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica, pismo RDN AEE/84/2021 z dnia 25 czerwca 2021.

#### **Tematyka pracy**

---

Recenzowana praca ma typowo technologiczny charakter. Podstawowym celem jaki postawił przed sobą Autor jest opracowanie praktycznych technik wytwarzania elementów biernych zintegrowanych z płytką obwodu drukowanego oraz określenie, na podstawie pomiarów i ich analizy, wybranych właściwości elektrycznych przydatnych w projektowaniu i realizacji układów elektronicznych na potrzeby nowoczesnej elektroniki, o akceptowalnych parametrach techniczno-użytkowych.

Swoje rozważania oparł o wykorzystanie do tego celu standardowych technik - cienko- i grubowarstwowej - oraz o zastosowanie wybranej grupy specjalizowanych, komercyjnych materiałów, obrabianych według określonej przez ich producenta procedury technologicznej, umożliwiającej łatwą ich implementację w zautomatyzowanych procesach stosowanych przy produkcji wielkoseryjnej obwodów PCB.

Obwody z wbudowanymi (zagrzebanymi) elementami RLC to przede wszystkim krok w kierunku miniaturyzacji i obniżania kosztów wytwarzania wielowarstwowych obwodów PCB. Konstrukcje tego typu posiadają dodatkowo szereg innych zalet w porównaniu do klasycznych obwodów drukowanych, które zostały przez Autora bardzo trafnie w pracy wyartykułowane.

W pracy Autor stawia tezę: „Elementy bierne zintegrowane z płytką obwodu

drukowanego są alternatywą dla standardowego montażu. Dlatego dogłębne poznanie procesów zachodzących podczas ich wytwarzania oraz szczegółowych parametrów elektrycznych pozwala na kontrolowanie ich właściwości podczas operacji technologicznych a także na kompleksową realizację zawierających je układów elektronicznych, tak na potrzeby elektroniki do zastosowań konsumenckich jak i specjalnych.”

Teza jak i podstawowy cel pracy został sformułowany jasno, a poszczególne zadania, jakie postawił przed sobą Autor zdefiniowane precyzyjnie.

## **Układ pracy**

---

Rozprawa wydana została w formie nieindeksowanej monografii w roku 2021. Całość została zawarta na 198 stronach tekstu (10 rozdziałów), zawiera 128 rysunków i 52 tabele. Pracę zamyka zbiór 153 cytowanych przez Doktoranta pozycji bibliograficznych.

Publikacje te, to w większości artykuły z wiodących w przedmiotowej dyscyplinie czasopism, konferencji międzynarodowych i krajowych. Ogromna większość cytowanych prac była opublikowana w ostatnich 10 latach i można przyjąć, że w wystarczająco rozległy sposób przedstawiają one aktualne w tym zakresie osiągnięcia. Zaprezentowany stan wiedzy świadczy o dobrej znajomości tematyki przez Autora, a wnioski wynikające z przeglądu źródeł zostały wykorzystane w umiejętny sposób przy planowaniu i prowadzeniu własnych prac eksperymentalnych. Doktorant jest współautorem 33 spośród cytowanych pozycji, w których poruszana tematyka jest bardzo ściśle związana z zagadnieniami rozpatrywanymi w opiniowanej pracy.

Rozprawa składa się z części literaturowej, zawartej głównie w rozdziale 2-gim, eksperymentalnej, zawierającej wyniki prac własnych (rozdziały 3-8), oraz przykładowych aplikacji opisanych w rozdziale 9-tym.

Część teoretyczna podzielona została na sześć wyraźnie wyodrębnionych obszarów tematycznych skoncentrowanych odpowiednio na omówieniu technologii wytwarzania wielowarstwowych obwodów drukowanych, rezystorów cienkowarstwowych, grubowarstwowych rezystorów polimerowych, planarnych kondensatorów, indukcyjności oraz wykorzystaniu komercyjnych kompozytów ze zintegrowanymi warstwami rezystywną i pojemnościową.

Wyniki prac własnych przedstawione zostały w kolejnych sześciu rozdziałach, których zawartość tematyczna stanowi wierne odzwierciedlenie struktury części literaturowej. W każdej nich znajdujemy opis przygotowania elementów testowych oraz bardzo szeroki zakres badań ich własności w funkcji zmiennych parametrów procesów technologicznych, ich konstrukcji oraz reakcji na oddziaływanie wybranych zewnętrznych czynników środowiskowych.

W rozdziale 10-tym Autor przedstawia w sumarycznej formie analizę otrzymanych

wyników prac doświadczalnych i ich znaczenie w procesie wytwarzania wielowarstwowych obwodów drukowanych z wbudowanymi elementami RLC.

### **Ocena uzyskanych wyników**

---

Przedstawiona rozprawa stanowi obszerny raport z przeprowadzonych prac technologicznych i wykonanych badań.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

- Opracowanie procesów technologicznych wytwarzania wbudowanych elementów biernych w strukturze wielowarstwowego obwodu drukowanego,
- Stworzenie kompleksowej bazy danych materiałowych i zbioru parametrów technologicznych do realizacji wzmiankowanych elementów.

Dostępne aktualnie na rynku oprogramowanie wspomagające procesy projektowania układów elektronicznych wyposażone jest w specjalizowane pakiety do projektowania wielowarstwowych obwodów drukowanych zawierających wbudowane podzespoły rezystancyjne i pojemnościowe. Bazują one na wstępnie przygotowanej bazie materiałowej, która może być w prosty i intuicyjny sposób rozbudowana przez użytkownika o nowe materiały, wprowadzanie szeregu różnego rodzaju ich parametrów oraz definiowanie technologii ich wytwarzania. Oprogramowanie to umożliwia projektantom obwodów drukowanych optymalizację kształtu i rozmiarów wbudowanych rezystorów i kondensatorów - z uwzględnieniem w tle stosowanych zmiennych procesu technologicznego i stanowi istotny element procesu automatyzacji samego procesu projektowania.

W tym kontekście przedstawione w pracy wyniki mają praktycznie użyteczną wartość przy tworzeniu nowej czy też rozbudowie istniejącej bazy materiałowej o technologie i materiały wykorzystywane w konkretnej firmie produkującej obwody drukowane. Dodatkowo znajdujące się w bazie dane odnośnie wpływu wybranych zewnętrznych czynników środowiskowych na zachowanie się podzespołów pozwalają na ich wykorzystanie również podczas samego procesu projektowania układów elektronicznych, do symulacji ich pracy w różnych warunkach. Uwzględnienie przedstawionych w pracy zależności częstotliwościowych tak wytwarzanych elementów, pozwala również na pełną analizę integralności sygnałowej danego układu już na etapie projektowania.

Prezentacja przeprowadzonych badań jest bardzo szczegółowa. Opis zawiera proces przygotowania elementów testowych, przebieg procedur pomiarowych, jak i informacje o wykorzystywanej aparaturze. Stosowane w pracy metody badawcze, zakres przeprowadzonych badań należy uznać za poprawne i wystarczające do osiągnięcia założonego celu pracy oraz wykazania poprawności zdefiniowanej tezy pracy.

Dodatkowo, na podkreślenie zasługuje bogaty dorobek Autora, na który składa się 33 publikacje zespołowe, przygotowane w bardzo zróżnicowanych personalnie zespołach, z których 12 opublikowanych zostało w czasopismach z listy JCR.

### Uwagi szczegółowe

---

Praca przygotowana jest pod względem edytorskim starannie. Pojawiają się jednak sporadycznie drobne niezgrabności językowe i błędy stylistyczne, a także terminy slangowe.

Do słabszych elementów pracy zaliczyć trzeba:

- Brak wykorzystania metod planowania eksperymentu. Praca zawiera wyniki bardzo szerokiej grupy różnego rodzaju badań realizowanych przy dużej zmienności różnych parametrów procesu.
- Brak podsumowań na końcu każdego rozdziału praktycznego. Duża ilość wyników badań, zamieszczanych sukcesywnie w trakcie opisu eksperymentu wymaga podsumowania w celu zwiększenia ich czytelności.

Usterki terminologiczne:

- Używanie błędnego określenia „uziemienie” w miejsce poprawnego, stosowanego w elektronice określenia „masa”. Pojęcia „uziemienie” i „masa” - to przecież zupełnie różne znaczeniowo terminy.
- Stosowanie terminu „moc”, na określenie napięcia zasilania czy też płaszczyzny zasilania, stosowanych w terminologii obwodów drukowanych.
- Zupełnie niejasne i nieprecyzyjne przedstawienie roli kondensatorów odsprzęgających w obwodach PCB (str. 40).
- Dyskusyjne także wydaje się być wyrażanie rezystancji powierzchniowej jako „ $\Omega/\text{kwadrat}$ ”. Jest to w moim odczuciu wyrażenie slangowe, co prawda powszechne w użyciu, w mowie potocznej, jednakże trudniejsze do zaakceptowania w tego typu opracowaniach. Pozostając w zgodności z układem SI - poprawne wydaje się być tutaj stosowanie określenia „rezystancja na kwadrat” i wyrażania jej w omach.

Uwagi redakcyjne:

- Niefortunny dobór kolorów na rysunkach 6.24 i 6.25, sprawia duże trudności w prawidłowej ich interpretacji.

Zamieszczone uwagi mają charakter subiektywny, i jako takie w moim odczuciu, nie umniejszają bardzo pozytywnego wrażenia, jakie praca przedstawia.

## **Konkluzja**

---

Praca ma typowo technologiczny charakter. Jej tematyka jest aktualna, a otrzymane wyniki mają duże znaczenie praktyczne, z możliwością bezpośredniego ich wykorzystania w procesach projektowania układów elektronicznych i ich produkcji wielowarstwowych obwodów drukowanych. Założony cel pracy został w pełni zrealizowany.

Reasumując, uważam, że w opiniowanej pracy doktorskiej pt. *„Wytwarzanie i właściwości elementów biernych wykonanych w technice cienko- i grubowarstwowej zintegrowanych z wielowarstwową płytką obwodu drukowanego”* mgr inż. Wojciech Stęplewski, wykazał się rozległą wiedzą teoretyczną, jak i umiejętnościami praktycznymi wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że praca odpowiada warunkom zawartym w obowiązujących uregulowaniach prawnych i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki i bogaty dorobek publikacyjny wnioskuję, w przypadku pozytywnego przebiegu obrony, o rozpatrzenie przez wysoką Radę możliwości jej wyróżnienia.

