

Dr hab. inż. Ryszard Kisiel, prof. PW
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki Techniki Informacyjnych, Politechnika Warszawska
ryszard.kisiel@pw.edu.pl

Warszawa, dnia 22 września 2021r

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektroniki i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej

Tytuł rozprawy:

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

Autor rozprawy:

Mgr inż. Wojciech Stęplewski

Współcześnie do istotnych tendencji w produkcji urządzeń elektronicznych należą wyzwania dotyczące zwiększenia ich funkcjonalności, szybkości działania i redukcji masy oraz rozmiarów. Naprzeciw tym tendencjom wychodzi problematyka integracji elementów biernych i czynnych we wspólnym podłożu. Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy tematyki integracji elementów biernych w wielowarstwową płytkę obwodu drukowanego. Tematyka integracji elementów biernych z podłożem rozpoczęła się w latach 80-tych ubiegłego wieku od ich scalania z podłożem ceramicznym (układy hybrydowe grubowarstwowe). Integrowano R, C oraz L na powierzchni podłoża i dołączano dyskretne elementy czynne. W kolejnym etapie integracji, lata 90-te, w technologii LTCC integrowano już elementy bierne i potem czynne wewnątrz wielowarstwowego podłoża ceramicznego. Konsekwencją tych tendencji było rozpoczęcie prac wdrożeniowych nad wbudowywaniem podzespołów biernych oraz czynnych w wielowarstwową płytkę obwodu drukowanego. Stało się to możliwe wraz z postępowaniem w produkcji wielowarstwowych płytek obwodów drukowanych. Niniejsza rozprawa wpisuje się ten logiczny ciąg rozwoju, a w szczególności w pierwszy krok: wbudowywanie elementów biernych. Pierwsze współautorskie publikacje Doktoranta dotyczące tej tematyki są z lat 2011-2012 (poz. lit. 56, 135, 137, 138).

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?*

Praca ma charakter doświadczalno-wdrożeniowy z ukierunkowaniem na wdrożenie wyników w Sieci Badawczej Łukasiewicz- Instytucie Tele- i Radiotechnicznym, czołowego krajowego producentów wielowarstwowych obwodów drukowanych. Doktorant stawia sobie za cel opracowanie doświadczalnej technologii wbudowywania elementów rezystywnych, pojemnościowych i indukcyjnych wewnątrz wielowarstwowej płytki obwodów drukowanych 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 (cel rozprawy).

We wstępie rozprawy sformułowano następującą tezę: „Elementy biernie zintegrowane z płytką obwodów drukowanych 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”

Praca liczy 198 stron i składa się z 10 rozdziałów, streszczenia, spisu oznaczeń i symboli oraz bibliografii. W rozdziałach od 3 do 9 zebrano wyniki prac własnych. W każdym z tych rozdziałów zastosowano wspólną metodologię badawczą. Wkładem Doktoranta było każdorazowe opracowanie płytek testowych do badań, adaptacja metod pomiarowych do określania parametrów badanych elementów, opis adoptowanych technologii i rozwiązań umożliwiających pomiary na poszczególnych etapach procesu technologicznego (co jest istotnym elementem jego pracy) oraz samo badanie właściwości elektrycznych. Ten indywidualny wkład jest spójny i wskazuje, że Doktorant ma umiejętność samodzielnego zorganizowania i prowadzenia badań naukowych.

Najobszerniejszą część badań poświęcono wbudowanym rezystorom cienkowarstwowym (Rozdział nr 3, 56 stron). W szczegółach analizowano wpływ wybranych krytycznych operacji technologicznych na rezystancję rezystorów o różnej R/kw, wpływ geometrii oraz orientacji na płycie. Doktorant zaproponował równoważny obwód zastępczy dla dopasowania zmian właściwości zmiennoprądowych rezystorów cienkowarstwowym przy narażeniach środowiskowych zbudowany z elementów R, L, C. Dla rezystorów NiP analizował model zmian rezystancji w próbie stabilności długookresowej wskazując na jeden mechanizm przy początkowym starzeniu w temperaturze 160^o. Przeprowadzone dogłębne badania odporności impulsowej rezystorów cienkowarstwowym pozwoliły na zaproponowanie, aby to zjawisko wykorzystać do korekcji rezystancji rezystorów. Istotną zaletą tej metody jest to, że można ją wykorzystać do korekcji rezystorów cienkowarstwowym zagrzebanych w płytkach.

Rozdział czwarty dedykowano wykorzystaniu rezystorów grubowarstwowym do ich wbudowywania w płytki obwodów drukowanych. Etapowe pomiary rezystancji rezystorów grubowarstwowym przeprowadzono po operacjach utwardzania, po nałożeniu brązowych tlenków oraz po prasowaniu. Szczegółowej analizie poddano wpływ szerokości ścieżek/pól kontaktowych Cu, Au lub Ag na dynamikę grzania oraz warunki chłodzenia. Najlepsze wyniki uzyskano przy nadruku rezystorów na pokrycia ENIG na styku folii Cu i polimerowej warstwy rezystywnej.

Obie analizowane technologie wbudowywania rezystorów w wielowarstwowe płytki obwodów drukowanych nie gwarantowały tolerancji poniżej 10% dla rezystorów cienkowarstwowym i poniżej 20% dla rezystorów grubowarstwowym, stąd konieczność znalezienia sposobu korekcji. Doktorant tematykę tę analizował w rozdziale czwartym. Opracował i wykonał we własnym zakresie moduł pomiarowo-przełączający do stanowiska laserowego umożliwiający dokonanie korekcji obu typów rezystorów cienko- i

grubowarstwowych. Zaproponował wykorzystanie ciecicia typu „L”, i zweryfikował, że cięcie tego typu umożliwi korekcję na opracowanym stanowisku laboratoryjnym z dokładnością lepszą niż 0,4 % dla rezystorów cienkowarstwowych oraz z dokładnością 0,8% dla rezystorów grubowarstwowych. Opanowanie metod korekcji rezystorów o tak wąskich tolerancjach jest istotne dla możliwości wdrożenia tych technologii w praktyce produkcyjnej.

W rozdziale szóstym Doktorant zajął się analizą możliwości integracji kondensatorów planarnych z płytką obwodu drukowanego. Tu wyzwaniem technologicznym były problemy związane z obróbką i trawieniem bardzo cienkich laminatów ($12 \div 24 \mu\text{m}$). Należało rozwiązać problemy związane z dokładnym pozycjonowaniem klisz na kopioramie oraz sterowanie procesem trawienia. Analizowano wpływ procesów starzenia na parametry kondensatorów. Stwierdzono, że dla badanych materiałów dielektrycznych zmiany pojemności z temperaturą w zakresie 25°C do 75°C można przybliżyć funkcją liniową, a dla wyższych temperatur zależność da się opisać funkcją potęgową o wykładniku potęgi „n” (różnym dla każdego dielektryka i rozmiaru kondensatora, ale w miarę stałym dla zakresu temperatur od 70°C do 130°C).

W rozdziale siódmym dokonano analizy możliwości wykorzystania kompozytu warstwy rezystywnej i pojemnościowej do wbudowywania w płytkę drukowaną. Przeanalizowano możliwość formowania elementów R i C na jednym nośniku w oparciu o dwie technologie (jednoczesne trawienie po obydwu stronach laminatu oraz sekwencyjne trawienie warstw cienkiego laminatu). Praktycznie zweryfikowano technologię „sekwencyjnego trawienia” projektując topologie płytki i wykonując filtry dolnoprzepustowe na częstotliwości z zakresu od 0,5 MHz do 50 MHz.

W rozdziale ósmym analizowano możliwość wbudowywania elementów indukcyjnych w dowolną warstwę wewnętrzną płytki obwodu drukowanego. W tym celu zaprojektowano 9 wariantów topologicznych i cztery technologiczne cewek wbudowanych w podłoże z laminatu FR-4. Ocenę rozwiązań oparto na badaniach parametrów każdego z badanych rozwiązań, a także pomiarów tych parametrów po narażeniach termicznych i termiczno-wilgotnościowych.

Kwintesencją rozprawy jest rozdział dziewiąty, w którym zweryfikowano poprawność rozwiązań opracowanych w rozdziałach od 3 do 8. I tak przydatność poszczególnych rozwiązań z wbudowanymi elementami potwierdzono na podstawie badań parametrów:

- tensometru, logarytmicznego przetwornika rezystancji na częstotliwość, oraz modułu urządzenia sterującego pracą rozdzielni - w odniesieniu dla zastosowań rezystorów cienkowarstwowych NiP,
- dolnoprzepustowych filtrów LC dla kondensatorów planarnych i elementów indukcyjnych,
- wielowyprowadzeniowej płytki z obudowami typu BGA dla rezystorów cienkowarstwowych i kondensatorów z połączeniami typu micro-via oraz otworami przelotowymi,
- układu RFID dla materiału dwufunkcyjnego: rezystory cienkowarstwowe + kondensatory planarne na wspólnym rdzeniu oraz elementy indukcyjne,

- generatora kwarcowego dla rezystorów cienkowarstwowych, rezystorów grubowarstwowych oraz kondensatorów planarnych.

W świetle przedstawionych powyżej wyników badań weryfikujących **uwzględniłem, że teza rozprawy** „Elementy bierne zintegrowane z płytką obwodów drukowanych są alternatywą dla standardowego montażu oraz że 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 dla zastosowań konsumenckich jak i specjalnych” **została udowodniona**.

2. *Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł /w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?*

W pracy dokonano obszernego przeglądu literatury, składającego się ze 153 pozycji. Warto dodać, że wśród cytowanych pozycji jest 29 pozycji współautorskich Doktoranta z czego w 13 pozycjach jest on pierwszym autorem. Podsumowanie stanu wiedzy w tematyce doktoratu zawarto w rozdziale 2. Przedstawiono w nim aktualne osiągnięcia w zakresie dostępnych technologii wbudowywania elementów biernych w wielowarstwową płytkę obwodów drukowanych. Opis teoretyczny oparto o dostępną literaturę z ostatniego dwudziestolecia, z naciskiem na ostatnie pięćdziesiąt lat. Doktorant wykazał się wiedzą ogólną z zakresu podstawowych i specjalizowanych parametrów technicznych rezystorów, kondensatorów planarnych oraz cewek indukcyjnych wbudowywanych w PCB oraz znajomością technik pomiarowych służących do tych pomiarów. Dla każdego z analizowanych elementów dokonano przeglądu dostępnej bazy materiałowej, stosowanych potencjalnie technik wytwarzania wraz z opisem dostępnego w literaturze wpływu geometrii elementów na parametry użytkowe.

Treść Rozdziału nr 2 wyczerpuje znamiona uznania, że w szeroko rozumianej tematyce podzespołów biernych, ich technologii oraz metod badań ich parametrów fizycznych i eksploatacyjnych Doktorant posiada wiedzę teoretyczną oraz dysponuje umiejętnością jej praktycznego wykorzystania.

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

Autor rozprawy z właściwą starannością opisał stosowane technologie wbudowywania elementów R, C i L w płytce obwodów drukowanych oraz stosował odpowiednie metody do pomiarów parametrów elektrycznych badanych elementów R, L, C. I tak kontrolę wymiarów geometrycznych prowadzono na mikroskopie stereoskopowym firmy NIKON o dokładności pomiarowej $\pm 1 \mu\text{m}$. Rezystancje mierzono metodą czteropunktową korzystając z multimetru cyfrowego firmy Agilent o dokładności pomiarowej $\pm 6 \text{ m}\Omega$ dla rezystancji do 100Ω i $\pm 2,5 \Omega$ dla zakresu $100 \text{ k}\Omega$. Do szybkiego pomiaru dużej liczby rezystorów rozmieszczonych na powierzchni wykorzystano testera palcowego. Pomiar impedancyjne prowadzono na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej korzystając z precyzyjnego analizatora impedancji firmy Agilent w zakresie częstotliwości od 40 Hz do 110 kHz. Do badań

temperaturowych „in situ” Doktorant opracował i wykonał stanowisko z płytą grzejącą z modułem Peltiera, z dokładną regulacją i kontrolą temperatury stolika korzystając z odpowiedniego oprogramowania. Pomiarów szumów wykonano we współpracy z Katedrą Podstaw Elektroniki Politechniki Rzeszowskiej w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 1 kHz. Pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych cewek wykonywano korzystając z mostka pomiarowego LCR firmy Agilent z odpowiednim oprogramowaniem. Podsumowując stwierdzam, że Autor rozprawy użył właściwych metod do oceny właściwości wbudowanych elementów R, L, C w płytce obwodów drukowanych.

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

Rozprawa wpisuje się we współczesny trend montażu i scalania urządzeń elektronicznych polegający na integracji we wspólnym podłożu elementów biernych i czynnych. Podkreślenia wymagają dwa aspekty: naukowo-badawczy czyli zbadanie i uwzględnienie wpływu operacji technologicznych na parametry elektryczno-funkcjonalne wytwarzanych struktur zintegrowanych z płytką odvodu drukowanego oraz aspekt wdrożeniowy. Jej wyniki umożliwiły modernizację istniejącej w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Tele- i Radiotechnicznym linii technologicznej płytki obwodów drukowanych oraz wyposażenia laboratoriów badawczych przystosowując ITR do powtarzalnej laboratoryjnie produkcji płytek ze zintegrowanymi elementami biernymi. W Rozprawie pokazano uporządkowany metodycznie ciąg działań prowadzący do tego celu:

- analiza dostępnych na rynku materiałów,
- zaprojektowanie płytek testowych i weryfikacja rozwiązań technologicznych (poprzez pomiary międzyoperacyjne) elementów przeznaczonych do integracji (wbudowanych rezystorów cienkowarstwowych, zintegrowanych z warstwami wewnętrznymi płytki rezystorów grubowarstwowych i elementów pojemnościowych oraz ścieżek indukcyjnych),
- weryfikacja parametrów finalnych elementów (R, L, C) poprzez ocenę tuż po otrzymaniu i po różnych narażeniach: termicznych, starzeniowych, klimatycznych w szerokim zakresie częstotliwości,
- finalna weryfikacja w wykonanych rzeczywiście układach elektronicznych wdrożonych w innych projektach współautorskich, gdzie wykorzystano zaprojektowane i zweryfikowane przez Doktoranta rozwiązania.

Publikacje współautorskie Doktoranta dotyczące tematu rozprawy, gdzie często jest pierwszym Autorem, pochodzą z lat 2011-2021. Tematyka rozprawy wpisuje się w aktualnie rozwiązywane problemy związane z miniaturyzacją urządzeń poprzez wbudowywanie elementów R, L, C w podłoża. Wykorzystanie pomiarów międzyoperacyjnych do sterowania przebiegiem dalszych operacji technologicznych jest ważnym wkładem w zrozumienie procesów i uzyskaniem efektu końcowego.

5. *Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników/ zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy ?*

Doktorant wyczerpująco z odpowiednimi opisami i schematami przedstawił ciągi operacji technologicznych stosowanych do wbudowywania elementów R, L, C w płytki wielowarstwowych obwodów drukowanych. Dzięki temu opisy te mogą być użyteczne dla innych producentów wielowarstwowych obwodów drukowanych. Zastosowany aparat badawczo-pomiarowy jest adekwatny do rozwiązywanych zagadnień. Tam gdzie było to niezbędne skorzystano z możliwości pomiarów w innych ośrodkach. Formułowane wnioski są poparte wcześniejszą analizą.

6. *Jakie są słabe strony rozprawy ?*

Elementy R, L, C są przeznaczone do wbudowywania w wielowarstwowe płytki obwodów drukowanych. Zatem, laminaty płytek definiują potencjalnie maksymalną dopuszczalną temperaturę ich pracy. Tymczasem zakresy maksymalnych temperatur dla narażeń są różne: dla rezystorów cienkowarstwowych jest to 160°C, dla rezystorów grubowarstwowych to 130°C, dla kondensatorów podobnie też 130°C, ale dla elementów indukcyjnych to 150°C.

Mam też uwagę do części edytorskiej pracy. Rozdziały poświęcone kondensatorom oraz elementom indukcyjnym kończą się podsumowaniem, tymczasem w rozdziałach poświęconym rezystorom brak jest takiego podsumowania. Jest to najobszerniejsza część rozprawy i rozproszonych wniosków należy szukać w poszczególnych punktach. Te rozważania można byłoby skończyć krótką analizą, kiedy zaleca się stosować rezystory cienkowarstwowe, a kiedy grubowarstwowe.

Recenzent w pełni rozumiejąc wagę rozdziału dziewiątego (modele funkcjonalnych pakietów elektronicznych) dla treści rozprawy, ma trudność w określeniu tych badań i analizy, które są udziałem Doktoranta. W szczególności dotyczy to tych fragmentów w których analizowano układy RFID oraz generator kwarcowy. Publikacje nr 128 i 129 wskazują, że powstałe rozwiązania są wynikiem pracy zespołowej. Domyślam się, że wkładem Doktoranta jest część dotycząca projektu topologii i technologii wbudowywanych elementów R, L, C oraz ich pomiarów finalnych.

W podsumowaniu brak jest akapitu poświęconego badaniom kompozytu R/C, czyli analizy możliwości formowania rezystorów i kondensatorów na tym samym rdzeniu.

7. *Jaka jest przydatność rozprawy?*

Rozprawa stanowi istotny wkład w opanowanie technologii wbudowywania elementów R, L, C w wielowarstwowe płytki obwodów drukowanych. Ma aspekt wdrożeniowy, gdyż jej wyniki zostały wykorzystane w modernizacji linii produkcyjnej płytek obwodów drukowanych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Tele- i Radiotechnicznym. Zebrane doświadczenie i wyniki powinny być wykorzystane w dalszych badaniach nad ulepszaniem tej technologii.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) ~~Nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy~~
- b) ~~Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- c) ~~Spełniająca wymagania~~
- d) **Spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem**
- e) ~~Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

W podsumowaniu **stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania** stawiane przez „art.179 ust.1 i ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 t., poz.1669) w związku art.13, art.14 ust.1 pkt1, ust.2 pkt 1i ust.4 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz.595 z późn.zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora - Rozdział 1 - Szczegółowy tryb przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich (Dz. U. z 2011 r., poz.1200) ” **i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Grzegorz Kiciński