

dr hab. inż. Maciej Sibiński, prof. uczelni.
Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
ul Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

Łódź 13.03.2025

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Katarzyny Wasilewskiej

Opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania termokurczliwego typu SSL z drukowanym sensorem temperatury

Promotor:

prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Jarosław Szusta, prof. PB

1. Aktualność i oryginalność tematyki oraz teza i cel rozprawy.

Przedstawiona do oceny dysertacja dotyczy ważnego naukowo problemu opracowania technologii drukowanych układów elektronicznych, przeznaczonych do wykorzystania na podłożach termokurczliwych. Jednocześnie problem ten jest niezwykle istotny ze względu na olbrzymi rynek wyrobów wykorzystujących termoobkurczalne etykiety barwne, których funkcja może zostać rozszerzona poprzez wprowadzenie dodatkowych układów elektronicznych. Funkcjonalność tego typu elementów może obejmować zarówno odczyt danych dotyczących wyrobu, jego okres i zakres przydatności, czy szczegółowe parametry jak również bezprzewodową komunikację radiową, sygnalizację świetlną, dźwiękową i wiele innych. Warunkiem koniecznym poprawnego funkcjonowania tego rodzaju rozwiązań jest nie tylko odpowiednie zaprojektowanie elastycznych elementów i układów elektronicznych lecz również właściwa ich integracja z etykietą produktu oraz opracowanie technologii produkcji kompatybilnej z procesem wyrobu i nakładania etykiet.

W związku z tym celem jaki postawiła sobie Autorka było opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania poprzez integrację elementów drukowanej elektroniki z etykietą termokurczliwą. Istotnym elementem nowości zaproponowanym

w pracy było połączenie funkcji komercyjno–estetycznej z funkcjonalnością, komunikacji bezprzewodowej oraz pomiaru temperatury realizowanego przez elastyczny układ elektroniczny. Autorka jako dodatkowy warunek określiła możliwość przemysłowej produkcji tego typu układów przy wykorzystaniu standardowych procesów stosowanych do nadruku etykiet tradycyjnych. Cel ten został zdefiniowany opisowo na początku rozdziału 2 dysertacji oraz uzupełniony w sposób graficzny z podaniem zakresu funkcjonalności opracowywanej etykiety. Nie zdefiniowano też pracy naukowej co jednak nie jest bezwzględnym wymogiem w przypadku prac doktorskich.

2. Ocena przyjętego układu oraz poprawności edycyjnej rozprawy doktorskiej.

Przedstawiona praca składa się z pięciu rozdziałów numerowanych oraz spisu wykorzystanej literatury i załącznika w postaci produkcyjnej karty technologicznej. Posiada ona układ właściwy dla dysertacji doktorskich. Jej podział umożliwia jasną prezentację celu, przyjętej metodyki badawczej, przebiegu eksperymentów a wreszcie analizy i interpretacji uzyskanych wyników. Dysertacja została również opatrzona wykazem stosowanych skrótów i oznaczeń.

Pomimo to w treści przedstawionej pracy widoczne są usterki techniczne. Do podstawowych błędów edytorskich zaliczyć można:

- Pojawiające się w pracy określenia żargonowe, bardzo liczne błędy gramatyczne, interpunkcyjne oraz kalki z języka angielskiego. Ponadto zamieszczone w tekście obiekty graficzne są niejednokrotnie skanami o niskiej rozdzielczości.
- Tok rozumowania nie zawsze jest klarowny a w tekście pracy występują powtórzenia całych akapitów np. stwierdzenie: *Zastosowanie SSL pozwala również na zmniejszenie grubości ścianki plastikowych i szklanych pojemników, eliminuje konieczność barwienia ich w masie, co doskonale wpisuje się w politykę zrównoważonego rozwoju.* występuje zarówno na str. 16 jak na str. 29
- Wykorzystywane skróty nie są wyjaśniane przy ich pierwszym użyciu (np. skrót NFC wykorzystywany w pracy wielokrotnie a rozwinięty dopiero na stronie 33 w rozdziale 3, podobnie skrót PET – wyjaśniony na str. 35).
- Stosowane są różne oznaczenia i nazwy jednostek tych samych wielkości fizycznych – np. rezystancja powierzchniowa jest na ogół opisywana poprzez $[\Omega/\text{kw}]$ jednak np. na rys 3.11 poprzez $[\Omega/\text{sq}]$.
- Staranność przygotowania tekstu pracy nie zawsze odpowiada standardom przyjętym dla dysertacji naukowych.

Tego typu drobne błędy techniczne nie umniejszają znaczenia prezentowanych wyników, lecz nie powinny mieć miejsca w publikowanej rozprawie doktorskiej.

3. Rozwiązanie postawionego zadania – metody badawcze i samodzielność autora.

Autorka w przedstawionej dysertacji prezentuje właściwą metodykę i sposób prowadzenia badań naukowych o charakterze aplikacyjnym. Na podstawie nabytej wiedzy doświadczalnej i przeglądu literatury Autorka rozpoczęła swoje prace technologiczne od próby dopasowania komercyjnie dostępnych past i materiałów do określonych potrzeb aplikacyjnych. Po negatywnej weryfikacji tej koncepcji podjęła ona samodzielne eksperymenty zmierzające do uzyskania i weryfikacji odpowiednich materiałów i procedur technologicznych.

W trakcie prac wytworzono autorską kompozycję pasty przewodzącej na bazie nośnika z roztworu laroflexu w mieszaninie OKB:CB i fazy funkcjonalnej opartej o płatki srebrne. Pasta ta ze względu na swoje właściwości jest dostosowana do wykorzystania na warstwach termokurczliwych. Tak opracowany skład pasty został opatentowany a na liście autorów wynalazku występuje zarówno Autorka dysertacji jak i pani prof. Małgorzata Jakubowska pełniąca funkcję promotora rozprawy. Uzyskane parametry elektryczne i reologiczne autorskiej kompozycji pasty odpowiadają wyrobom komercyjnym, jednak oryginalnym osiągnięciem badań Autorki jest zmniejszona wrażliwość nadrukowanych ścieżek na skurcz podłoża polimerowego. Uzyskana pasta została pozytywnie zweryfikowana w procesie nadruku ścieżek metodą [REDACTED]

Ostateczny układ wykonano w postaci drukowanej, elastycznej anteny nadawczej, uzyskanej z wykorzystaniem opracowanej pasty przewodzącej, podłączonej do układu mikroelektronicznego ST25TV02K AD6H9 w obudowie UFDFPN5 dołączonego do elastycznego podłoża dzięki technologii flip-chip. Warto zaznaczyć że do tego celu użyto autorskiej receptury kleju przewodzącego, opracowanego ze względu na brak odpowiednich wyrobów, dostępnych na rynku. Również w tym przypadku prowadzone badania zakończone zostały sukcesem w postaci uzyskania trwałych połączeń elektrycznych o pomijalnie małej rezystancji przejścia i wysokiej odporności na zginanie, co jest szczególnie ważne ze względu na specyfikę przewidzianej aplikacji.

W ramach badań opracowano także właściwą technologię obkurczania wytworzonych etykiet. [REDACTED]

[REDACTED] procesie tunelu parowego. Tak wykonany układ wyposażony został w sensor temperatury wykonany również za pomocą [REDACTED] termoczułej farby komercyjnej [REDACTED]. Proces nakładania tej warstwy został również zoptymalizowany pod kątem uzyskania optymalnych parametrów elektrycznych, czułości i odporności na warunki obkurczania folii. Jednocześnie Autorka dowiodła możliwości wykonania układów elektronicznych wspólnie ze standardowym nadrukiem informacyjno-dekoracyjnym prowadząc eksperymenty nadruku warstw przewodzących na barwnej farbie drukarskiej. Elementy te zostały również zweryfikowane w termicznym procesie obkurczania folii.

Podsumowując należy zauważyć, że podstawowy cel pracy został osiągnięty a opracowana technologia posiada znaczne walory aplikacyjne. Do głównych osiągnięć pracy należy zaliczyć opracowanie autorskich składów past, technologii ich nakładania

a szczególnie niskotemperaturowy proces suszenia, zapewniający kompatybilność z reżimem wykonania etykiet termokurczliwych. Możliwość praktycznego wykorzystania przedstawionych wyników badań została zweryfikowana poprzez wykonanie demonstratora wyposażonego w pełną zakładaną funkcjonalność. Wyniki badań posłużyły również do opracowania produkcyjnej karty technologicznej, stanowiącej załącznik do przedstawionej dysertacji oraz wniosły wkład do zgłoszenia patentowego z udziałem Autorki.

Pomimo to przedstawiona praca nie jest wolna od drobnych mankamentów. Zrozumiałym jest, że eksperymenty technologiczne Autorki prowadzone były wraz z zespołem badawczym, którego doświadczenie było znaczną pomocą w realizacji procesów produkcyjnych, jednak wkład Doktorantki na niektórych etapach zadań nie został wyraźnie wyodrębniony w treści dysertacji. Ostateczny wynik pracy nie został również zweryfikowany poprzez wykonanie etykiety termokurczliwej, przeznaczonej dla konkretnego wyrobu oraz przetestowanie jej funkcjonalności.

4. Wiedza autora z zakresu dyscypliny naukowej oraz umiejętność prezentacji wyników.

Na podstawie przedstawionych wyników pracy oraz publikacji Doktorantki można stwierdzić, że uzyskała ona szeroką wiedzę z omawianego zakresu oraz posiadała następujące umiejętności badawcze i technologiczne:

- Planowanie eksperymentów naukowych i analiza danych pomiarowych.
- Znajomość rodzajów, składu i funkcji past służących do wywarzania elementów elektrycznych metodami drukarskimi.
- Biegłość w zakresie technologii drukarskich wykorzystywanych w elektronice elastycznej w skali laboratoryjnej i przemysłowej.
- Umiejętność wykorzystania technik pomiaru wielkości elektrycznych warstw przewodzących i rezystywnych.
- Znajomość metod charakteryzacji morfologii warstw nałożonych na płytkach drukowanych.
- Znajomość parametrów, zastosowań oraz metod obróbki materiałów polimerowych wykorzystywanych w elektronice elastycznej.
- Przygotowanie publikacji naukowych.
- Opracowanie specyfikacji technicznych materiałów wykorzystywanych do produkcji elastycznych elementów i układów elektronicznych.

5. Uwagi krytyczne i zastrzeżenia do treści rozprawy doktorskiej

Złożony zakres tematyczny pracy jak również jej wdrożeniowy charakter stawiają wysokie wymagania wobec Doktorantki i stwarzają okazję do popełnienia błędów. Do podstawowych uchybień przedstawionej pracy zaliczyć można następujące zagadnienia i wątpliwości, które powinny zostać wyjaśnione przez Autorkę:

- Można polemizować ze stwierdzeniem (tabela 3), że technika sitodruku charakteryzuje się małą prędkością nadruku. Technologia ta jest z powodzeniem stosowana w produkcji przemysłowej, natomiast prędkość nadruku rzędu kilkudziesięciu metrów na minutę jest w wielu zastosowaniach zadowalająca nawet dla dużej skali produkcji.
- Cel pracy nie został formułowany w sposób precyzyjny. W tekście nie określono ani wybranych typów opakowań, ich materiału ani zakresu badań (opracowanie określonych elementów elektronicznych, ich integracja, technika nakładania/przenoszenia na opakowanie czy osiągnięcie założonych parametrów/standardów). Również schematyczny rysunek nie definiuje które z przedstawionych warstw wchodzi w przyjęty zakres badań (np. czy warstwa zabezpieczająca jest przedmiotem eksperymentów).
- W pracy brak jest głębszej analizy z zakresu składu stosowanych podłoży oraz farb i past drukarskich a także zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących w procesie nakładania i obróbki termicznej tych warstw.
- Krzywa kurczliwości zmierzona przez Autorkę i zaprezentowana na Rys 3.1 przedstawia badania w zakresie od temp 50°C do 60°C. W badanym zakresie obserwowany skurcz folii wynosił od ok -0,5% do +7%. Na podstawie tych wyników Autorka stwierdza, że temperatura w jakiej materiał PET jest jeszcze stabilny wymiarowo to 50°C Nie można potwierdzić ani zaprzeczyć tej tezie nie mając wyników poniżej temperatury 50°C, których Autorka nie prezentuje.
- Rys 3.3 Nie zgadza się z opisem prezentowanego eksperymentu i prawdopodobnie przedstawia błędne dane. Dla przykładu farba S1, która wedle opisu posiada rezystancję na poziomie 0,26 Ω/kw na wykresie 3.3 prezentuje rezystancję powyżej 5 Ω/kw czyli o ok 2000% wyższą.
- W jaki sposób elastyczność podłoża utrudniała wykonanie profili nakładanych ścieżek za pomocą profilometru optycznego? Czy do tego typu analizy nie można było wykorzystać 3D uzyskanego za pomocą mikroskopu konfokalnego?
- Czym różnią się wielkości rezystancji powierzchniowych farb komercyjnych przebadane w rozdziale 3.18 od rezystancji badanych w punkcie 3.12? Jaki dokładnie był cel badań przeprowadzonych w rozdziale 3.18 i czy nie należało przeprowadzić ich łącznie z badaniami dotyczącymi wpływu prędkości nadruku na

rezystancję powierzchniową ścieżek dla pełnego zobrazowania wpływu wszystkich parametrów technologicznych?

- W jak dużym stopniu zastosowanie dwóch technik drukarskich (sitodruk, fleksografia) do wytworzenia gotowego wyrobu komplikuje, wydłuża i zwiększa koszt procesu produkcyjnego? Czy jest to akceptowalne z komercyjnego punktu widzenia?
- Jaki jest udział Autorki w zaprojektowaniu i wykonaniu demonstratora technologii wyposażonego w układ NFC RF430FRL15xH?

6. Ocena końcowa

Pomimo przedstawionych pytań i uwag krytycznych należy podkreślić, że postawiony przez Autorkę dysertacji cel badawczy został zrealizowany a opracowane materiały i technologie ich obróbki mogą posłużyć do wdrożenia nowej metody produkcyjnej. Doniosłość uzyskanych wyników potwierdza również olbrzymia potencjalna skala aplikacyjna oraz szerokie możliwości dalszego rozwoju podjętych prac badawczych i wdrożeniowych.

Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane w art. Art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do obrony.

