

Kraków, 1.06.2025r.

Prof. dr hab. Tomasz Stapiński
Instytut Elektroniki
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pani mgr Tatiany Nowickiej

Pt.:

**Opracowanie technologii wytwarzania na skalę
przemysłową drukowanych czujnika lub grupy czujników na
podłożach elastycznych do bezprzewodowego
monitorowania wybranych parametrów fizycznych
mających zastosowanie w Internecie rzeczy (IoT)**

Promotor: prof dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jarosław Szusta, prof. PB



Problematyka rozprawy

Problematyka rozprawy związana jest z zagadnieniami z obszaru szeroko rozumianej elektroniki i jej obecnie szybko rozwijającego się segmentu jakim jest elektronika drukowana. W rozprawie Autorka zajęła się opracowaniem wytwarzania wielowarstwowej struktury drukowanego czujnika wilgotności z elementem umożliwiającym bezprzewodową rejestrację pomiarów. Pani mgr Tatiana Nowicka skoncentrowała się na użyciu nisko kosztowej techniki druku jaką jest fleksografia. Pani mgr Tatiana Nowicka opracowała nowe materiały elektroniczne dostosowane do przemysłowego procesu druku fleksograficznego. Finalnym etapem badań było opracowanie konstrukcji drukowanego czujnika (demonstratora) do pomiaru wilgotności względnej. Wyniki prac są chronione dwoma patentami i zostały opisane w 2. publikacjach w czasopismach z listy JCR.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa ukazała się w formie książkowej zwartej i posiada oryginalny układ. Językiem rozprawy jest język polski, jednakże zamieszczono szereg angielskojęzycznych pojęć i akronimów. Wskazano publikacje Pani mgr Tatiany Nowickiej oraz Patent stanowiące dorobek Autorki. Rozprawa doktorska składa się ze 212 stron i ma prawidłowy układ edytorski, a jej struktura jest przejrzysta. Przytoczona bibliografia jest w pełni wystarczająca dla naświetlenia problematyki i zawiera pozycje, w większości z kilku ostatnich lat wydanych w liczących się czasopismach naukowych, z czego Pani mgr Tatiana Nowicka powołuje się na 2 własne współautorskie publikacje. Bibliografia świadczy o dobrym rozeznaniu literaturowym Autorki w uprawianej przez Nią dyscyplinie naukowej oraz o dorobku naukowym. Rozprawa zawiera 9 rozdziałów, spis treści, streszczenie, wykaz skrótów

i oznaczeń. Na końcu pracy zamieszczono podsumowanie i wnioski, spis literatury oraz załączniki.

Pani mgr Tatiana Nowicka przyjęła następujący układ swojej rozprawy: Rozdziały 1 i 3 dotyczą wprowadzenia w tematykę rozprawy oraz postawienie celu i zakresu pracy. Autorka zredagowała bardzo obszerne wprowadzenie dotyczące metod druku i elektroniki drukowanej poparte bardzo bogatą i właściwie dobraną bibliografią zawierającą ponad 60 pozycji literaturowych. Rozdział 2 to szczegółowy przegląd metod druku w elektronice ze wstępem historycznym oraz opis problemu wilgotności i metod jej pomiaru. Ten stosunkowo obszerny rozdział dotyczy przeglądu różnych rozwiązań w zakresie konstrukcji stosowanych urządzeń (czujników) wilgotności (kilkadziesiąt pozycji literaturowych) i kończy się istotną dla celowości badań Autorki konkluzją, iż nie odnaleziono przykładów wykonania sensorów drukowanych z zastosowaniem fleksografii. W rozdziale 3 jasno sprecyzowano **cel pracy jakim jest opracowanie technologii wytworzenia sensora do pomiaru wilgotności względnej na podłożu papierowym przy użyciu przemysłowych technik druku**. Obszerny Rozdział 4 dotyczy zagadnień opracowania technologii druku warstw przewodzących. Pani mgr Tatiana Nowicka skoncentrowała się analizie podłoży do druku i testach zadruku komercyjnych farb przewodzących oraz badań ich właściwości mechanicznych, elektrycznych i wpływu temperatury i czasu suszenia na przewodnictwo elektryczne wydruków. Autorka stworzyła własną recepturę farby przewodzącej i badała jej właściwości fizykochemiczne. Dla realizacji planowanego sensora konieczne było opracowanie technologii druku warstwy dielektrycznej (Rozdział 5) i opracowanie technologii druku warstwy rezystywnej (Rozdział 6). W rozdziale 7 Pani mgr Tatiana Nowicka opisała kolejne kroki w celu opracowania konstrukcji drukowanego czujnika wilgotności a w rozdziale 8 skoncentrowała się na opracowaniu konstrukcji układu bezprzewodowego pomiaru wilgotności. Rozdział 9 dotyczy badania zadruku opracowanych farb i konstrukcji z użyciem przemysłowej fleksograficznej linii

produkcyjnej. Rozdział 10 to podsumowanie i wnioski. Po wykazie literatury Autorka w swojej rozprawie doktorskiej zamieściła szereg załączników takich jak: Przegląd rynku komercyjnych farb przewodzących, Odchylenie szerokości ścieżek drukowanych [REDACTED], Zależność rezystancji wydrukowanej ścieżki przewodzącej od transferu surowca farbowego i podłoża, Zależność rezystancji wydrukowanej ścieżki przewodzącej od temperatury suszenia, Przykładowe skany profilometryczne ścieżek przewodzących wydrukowanych [REDACTED] [REDACTED], Pomiary rezystancji sensorów wydrukowanych według projektu 1 A podczas testów zalania oraz w komorze klimatycznej, Pomiary rezystancji sensorów wydrukowanych według projektów 2 A, B, C podczas testów zalania oraz w komorze klimatycznej, Montaż drukowy A, B. Załączniki dokumentują i potwierdzają przeprowadzenie kolejnych etapów opracowanej przez Panią mgr Tatianę Nowicką technologii.

Oryginalne osiągnięcia Autorki

Należy zauważyć, iż Pani mgr Tatiana Nowicka podjęła się trudnego zadania w warstwie technologiczno-eksperymentalnej. Opracowała technologię wytwarzania drukowanego czujnika wilgotności przy użyciu fleksograficznej techniki druku. Autorka przeprowadziła dogłębną charakteryzację drukowanych warstw funkcjonalnych przy użyciu fleksograficznej techniki druku na podłożach elastycznych. Istotnym osiągnięciem Pani mgr Tatiany Nowickiej było opracowanie autorskiej heterofazowej kompozycji farby przewodzącej. Na uwagę zasługuje całościowe opracowanie wielowarstwowych konstrukcji drukowanych sensorów wilgotności do przewodowego i bezprzewodowego odczytu danych. Sensory te wykonano zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych.

Dalszymi istotnymi osiągnięciami Pani mgr Tatiany Nowickiej są zdaniem recenzenta krytyczna ocena komercyjnych farb elektronicznych i elastycznych podłoży drukowych wynikająca z wykonanych kompleksowych badań wpływu parametrów procesu druku, transferu farby, czasu, temperatury i sposobu suszenia na właściwości elektryczne i mechaniczne drukowanych ścieżek przewodzących. Krytyczna analiza wskazała, że komercyjnie farby nie posiadają odpowiednich parametrów reologicznych i nie spełniają warunków suszenia do druku na standardowych maszynach fleksograficznych. Pani mgr Tatiana Nowicka opracowała recepturę przewodzącej farby na bazie płatków srebra dedykowaną do fleksograficznej techniki druku i niskotemperaturowego przemysłowego procesu aplikacji. Wybrano płatki srebrowe stanowiące fazę funkcjonalną kompozycji i ich zawartość, by zoptymalizować parametry elektryczne. Dobrano skład nośnika polimerowego i rozpuszczalnika w celu uzyskania wymagań reologicznych, odporność mechaniczną, chemiczną i elastyczność, możliwość suszenia w temperaturach poniżej 100 °C oraz właściwą przyczepność do tworzyw sztucznych.

Pani mgr Tatiana Nowicka dokonała interesującego porównania właściwości elektrycznych ścieżek wydrukowanych i wysuszonych w laboratorium ze ścieżkami wykonanymi w warunkach produkcyjnych. Autorka zaproponowała dla warunków produkcyjnych modyfikację procesu suszenia poprzez zastosowanie [REDAKTOWANO] [REDAKTOWANO]. Dzięki badaniom Autorki potwierdzono możliwość użycia farb dielektrycznych [REDAKTOWANO] i węglowych warstw rezystywnych w technice fleksografii, co prowadzi do oszczędności finansowych ponieważ zużycie surowców farbowych jest niższe niż w przypadku sitodrukowych farb dielektrycznych przy znacznie niższej (dziesięciokrotnie) cenie jednostkowej.

Autorka opracowała konstrukcje rezystancyjnych czujników wilgotności zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i w warunkach przemysłowych, a funkcjonalność czujników została potwierdzona w testach zalania oraz testach w komorze klimatycznej. Długoczasowe badania starzeniowe w warunkach

rzeczywistych wskazywały na pewne odchylenia parametrów wyjściowych [REDACTED], co jednak nie wyklucza ich praktycznego wykorzystania. W ramach współpracy z PW zaprojektowano [REDACTED] z możliwością bezprzewodowej komunikacji [REDACTED].

Opracowane przez Panią mgr Tatianę Nowicką rozwiązanie otwiera możliwości wielorakich praktycznych zastosowań takich jak jednorazowe czujniki zalania do zastosowań domowych, czujniki wilgotności wydrukowane bezpośrednio na podłożu do produkcji tapet umożliwiające monitoring wilgotności względnej w pomieszczeniu, czujniki wilgotności zintegrowane z opakowaniem produktów wrażliwych na zmiany wilgotności otoczenia. Przekładowe przyszłe zastosowania to czujniki zalania, czujniki szczelności instalacji wodociągowych, sprzętów AGD, monitorowanie wilgotności powietrza w budynkach, w opakowaniach w łańcuchu dostaw, przemyśle spożywczym, farmaceutycznym itp.

Mocne strony rozprawy

Nie ulega wątpliwości, iż fakt opublikowania wyników części badań składających się na doktorat Pani Mgr Tatiany Nowickiej w czasopiśmie ściśle związanym ze specjalizacją Doktorantki świadczy o randze prowadzonych badań. Dodatkowym atutem jest opatentowanie kompozycji (Heterophasic conductive polymer composition for printing on heat-shrinkable substrates and method of its preparation, PL243416B1, 2023) oraz metody otrzymania produktu (Method of obtaining a label having a printed humidity sensor, PL442413A1, 2024)

Aktywny udział w opracowaniu koncepcji eksperymentów jak i ich wykonaniu, świadczy o przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia badań na wysokim poziomie. Zdaniem recenzenta wyniki badań Autorki mogą się przyczynić do rozwoju elektroniki drukowanej i techniki sensorowej. Recenzent zauważył nieliczne

nieścisłości natury redakcyjnej w przedstawionej do oceny pracy, lecz nie ulega wątpliwości, iż mocne strony rozprawy są dominujące.

Wnioski końcowe

Recenzent wysoko ocenia przedłożoną rozprawę doktorską. Autorka w czasie realizacji swojej pracy doktorskiej wykazała się dużym wkładem w prowadzone badania i intuicją jako naukowiec oraz wiedzą teoretyczną i doświadczeniem praktycznym. Na podkreślenie zasługuje możliwość wykorzystania wyników badań dla rozwoju konstrukcji sensorów wykonanych metodami elektroniki drukowanej.

Cel pracy został osiągnięty a recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom naukowy i stanowi znaczący wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Dojrzałość naukową Autorki potwierdza fakt, iż częściowe wyniki prac były już opublikowane w czasopiśmie (Materials, Journal of Materials Research) i dwóch patentach (PL442413A1, PL243416B1).

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr Tatiany Nowickiej posiada wysoki poziom naukowy i spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na podstawie stosownej Ustawy (prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – z dnia 20 lipca 2018) wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Tomasz Stapiński



