

Wrocław, 16.06.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Rafał Walczak
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Ul. Janiszewskiego 11/17
50-372 Wrocław

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. 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)”

1. Wstęp

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne z dnia 18 marca 2025 r. Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr inż. 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)”, która została przygotowane pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Małgorzaty Jakubowskiej i promotora pomocniczego dra hab. inż. Jarosława Szusta, prof. PB.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Elektronika drukowana stanowi rewolucyjną zmianę w podejściu do wytwarzania urządzeń elektronicznych, odchodząc od tradycyjnych metod subtraktywnych na rzecz procesów addytywnych. Umożliwia to efektywne kosztowo i wielkoseryjne produkowanie komponentów elektronicznych na różnorodnych, często elastycznych i ekologicznych podłożach. Technologia ta rewolucjonizuje przemysł poprzez integrację funkcjonalności elektronicznych z przedmiotami codziennego użytku. Druk fleksograficzny, będący ugruntowaną, wysokowydajną techniką druku rotacyjnego typu "roll-to-roll", tradycyjnie stosowaną w przemyśle opakowaniowym i etykietowym, jest coraz częściej adaptowany na potrzeby elektroniki drukowanej, w tym do produkcji czujników. Jego zdolność do zadrukowywania zróżnicowanych materiałów oraz potencjał w produkcji masowej czynią go atrakcyjną opcją w tej dziedzinie. W tym kontekście istotne staje się pojęcie "Elastycznej Elektroniki Hybrydowej", która często łączy elementy drukowane z konwencjonalnymi układami scalonymi opartymi na krzemie, aby wykorzystać zalety obu technologii. Fleksografia może odgrywać kluczową rolę w wytwarzaniu drukowanej części systemów elastycznej elektroniki hybrydowej.

Adaptacja dojrzałej, wysokowydajnej technologii, jaką jest fleksografia, do zaawansowanych technologicznie zastosowań, takich jak produkcja czujników, sygnalizuje szerszy trend zmierzający ku demokratyzacji produkcji elektroniki. Fleksografia jest znana ze swojej szybkości i efektywności kosztowej w branży graficznej. Zastosowanie jej w produkcji czujników sugeruje dążenie do uniezależnienia produkcji sensorów od drogich, specjalistycznych procesów fabrykacji półprzewodników w sterylnych warunkach (tzw.

cleanroom). Może to obniżyć barierę wejścia dla nowych podmiotów na rynek i umożliwić integrację czujników w znacznie szerszej gamie produktów, zwłaszcza jednorazowych lub niskokosztowych. Konsekwencją tego może być potencjalny, gwałtowny wzrost wszechobecności "inteligentnych" obiektów.

Czujniki drukowane fleksograficznie oferują szereg korzyści, takich jak elastyczność, niski koszt produkcji, kompatybilność z różnorodnymi podłożami (w tym ekologicznymi, np. papierem) oraz możliwość miniaturyzacji i integracji w złożonych geometriach, gdzie sztywne czujniki są nieodpowiednie. Czujniki te odgrywają kluczową rolę w rozwoju takich dziedzin jak technologie noszone (*wearables*), inteligentne opakowania, diagnostyka medyczna, monitorowanie środowiska oraz Internet Rzeczy (IoT), dostarczając informacji w czasie rzeczywistym i oferując rozszerzoną funkcjonalność. Korzyści środowiskowe płynące z zastosowania fleksografii (np. użycie farb wodnych, możliwość druku na podłożach nadających się do recyklingu, takich jak papier) są zgodne z rosnącymi globalnymi trendami zrównoważonego rozwoju. Może to dać czujnikom drukowanym fleksograficznie przewagę nad metodami produkcyjnymi mniej przyjaznymi dla środowiska. Tradycyjna produkcja elektroniki często wiąże się z użyciem niebezpiecznych materiałów i generowaniem znacznych ilości odpadów. Możliwość stosowania farb wodnych w fleksografii oraz drukowania na papierze bezpośrednio odpowiada na te obawy. W miarę zaostrzania się przepisów dotyczących ochrony środowiska i wzrostu zapotrzebowania konsumentów na produkty zrównoważone, nieodłączny "zielony" potencjał fleksografii może stać się głównym motorem jej adaptacji w produkcji czujników, szczególnie w przypadku czujników jednorazowego użytku lub stosowanych na przykład w opakowaniach żywności.

Przedstawiona do recenzji praca dotycząca technologii fleksograficznie drukowanych czujników na podłożach elastycznych (w tym na papierze) na potrzeby IoT mieści się zatem w ogólnościowym nurcie badawczym związanym z wykorzystaniem fleksografii do druku elektroniki i czujników.

2.1. Ocena ogólna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, liczy 212 stron wraz z załącznikami, zawiera 10 rozdziałów oraz 10 załączników. Praca ma charakter badawczo-doświadczalny. Teza rozprawy nie jest sformułowana, natomiast Doktorantka na początku rozdziału 3 podaje cel pracy. Cel ten (str. 47) sformułowany jest nieco inaczej niż w streszczeniu (str. 7). **Należy jednak stwierdzić, że cel ten został dostatecznie jasno sformułowany.**

W pierwszym rozdziale Autorka wprowadza czytelnika w zagadnienie badawcze poruszane w rozprawie oraz przedstawia motywację do podjęcia tematu.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury przedmiotu. Doktorantka omawia w skrócie techniki druku w elektronice ze szczególnym uwzględnieniem fleksografii – konstrukcji drukarek i rodzajów wykorzystywanych farb. Porównuje również fleksografię z sitodrukiem oraz wskazuje na wady i zalety fleksografii. W drugiej części tego rozdziału Autorka omawia drukowane czujniki wilgotności jako wybrany rodzaj czujnika wielkości fizycznych. Strony 42 – 45 zawierają opis rezystancyjnych czujników wilgotności, a ten kilkustronicowy przegląd warto byłoby podsumować/zestawić w tabeli. Rozdział ten zakończony jest ważnym stwierdzeniem, że „nie odnaleziono jednak przykładów wykonanie sensorów drukowanych z

zastosowaniem fleksografii”, a opisane w literaturze przykłady drukowanych czujników wykonane zostały z wykorzystaniem laboratoryjnych urządzeń drukujących.

Zarówno rozdział pierwszy jak i drugi stanowi wystarczające wprowadzenie do tematyki badawczej, umożliwiające zrozumienie wyzwań badawczych jak i problemu jakim jest druk, w szczególności fleksograficzny, elektroniczny.

Rozdział trzeci to obszerny opis celu i zakresu pracy. Określono w nim, że w badaniach wykorzystane zostaną maszyny przemysłowe, a obiektem badań będzie rezystancyjny czujnik wilgotności. Szereg badań zostanie przeprowadzonych na podłożach papierowych. Wytworzenie działającego elementu/układu elektronicznego wymagać będzie przeprowadzenia badań projektowych, konstrukcyjnych, materiałowych, technologicznych i wreszcie metrologicznych. Wytworzona (wydrukowana) zostanie struktura zarówno czujnika jak i anteny (fragment tekstu dotyczący anteny chyba powinien znaleźć się zaraz po rysunku 3.1, str. 49). Doktorantka zarysowała również kontekst zapotrzebowania rynkowego co jest jak najbardziej uzasadnione i celowe ze względu na wdrożeniowy charakter doktoratu.

Rozdział czwarty to pierwszy rozdział zawierający opis wyników badań własnych Autorki, poświęcony technologii druku warstw przewodzących. Doktorantka omówiła wyniki badań związanych z doбором podłoża do druku, drukowalnością i geometrią wydruków, wpływem podłoża i rodzaju farby na właściwości mechaniczne i elektryczne (przewodność) wydruków. Na podstawie tych badań Autorka zdecydowała się na opracowanie i badania własnej receptury farby przewodzącej. Farba ta zawiera fazę funkcjonalną - komercyjnie dostępne płatki srebra o średnicy 3 μm lub 10 μm . Określono właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną drukowanych ścieżek przewodzących i określono optymalny skład własnej farby drukarskiej oraz warunki druku na podłożach PET oraz papierze. Warto podkreślić, że wyniki tych badań zostały opisane w opublikowanym artykule naukowym (*Journal of Materials Research*), a sposób wykonania farby opatentowany.

Rozdział piąty to kontynuacja opisu wyników badań własnych, tym razem nad technologią druku warstwy dielektrycznej. Doktorantka wykorzystwała komercyjnie dostępne farby dielektryczne i określiła ramy ich praktycznego wykorzystania do izolacji ścieżek przewodzących, wskazując na ekonomiczne korzyści płynące z wykorzystania tych farb i druku fleksograficznego.

Rozdział szósty, kolejny opisujący wyniki prac własnych, poświęcony został technologii druku warstwy rezystywnej jako technologii niezbędnej do późniejszego druku czujnika wilgotności. W tym celu wybrano farby na bazie sadzy i grafitu kompatybilne z wcześniej badanymi farbami na bazie srebra.

Rozdziały od 4 do 6 opisywały badania nad technologią komponentów składowych elektroniki drukowanej (warstwy przewodzące, dielektryczne i rezystywne), natomiast rozdziały 7 i 8 to opis opracowania konstrukcji i badania drukowanego czujnika wilgotności (rozdział 7) oraz konstrukcji układu bezprzewodowego do pomiaru wilgotności (rozdział 8). Doktorantka przeprowadziła kompleksowy cykl badań nad technologią czujnika wilgotności opracowując wiele konstrukcji czujników drukowanych na papierze i PET, badając odpowiedź czujników na zalanie i w komorze klimatycznej (zmienna wilgotność) oraz wpływ dodatków adsorpcyjnych i rodzaju podłoża. Opracowała również, przy współpracy z zespołem dra D. Janczaka, układ bezprzewodowego pomiaru wilgotności wykorzystujący drukowaną antenę

NFC i hybrydowo montowane na powierzchni podłoża nośnego elementy półprzewodnikowe. Wreszcie bazując na opracowanej technologii wydrukowano serię prototypowych wielowarstwowych i elastycznych tagów NFC z czujnikiem wilgotności i wstępnie potwierdzono działanie wydrukowanego systemu.

Rozdział dziewiąty to opis wyników prac nad drukiem z wykorzystaniem przemysłowej fleksograficznej linii produkcyjnej R2R (w tym druku rezystancyjnych czujników wilgotności) i suszeniem farb promieniowaniem bliskiej podczerwieni. Efektem tych prac są karty technologiczne produktu umożliwiające przemysłowe wytwarzanie drukowanych czujników.

W ostatniej części dysertacji (rozdział 10) Autorka podsumowuje wyniki swojej pracy, stwierdzając, że **cel pracy został osiągnięty z czym Recenzent dysertacji w pełni zgadza się**. Autorka wskazuje również dalsze kierunki badań nad zaproponowaną technologią. Przedstawione przez Doktorantkę dyskusja nad opracowaną technologią jest wyczerpująca i potwierdza znajomość Autorki tematyki badawczej i przemysłowej.

Autorka w rozprawie odnosi się do 221 pozycji literaturowych – artykułów naukowych, materiałów konferencyjnych, patentów i specyfikacji technicznych. Znakomita większość z nich powstały w ostatnich 10 – 15 latach. Są to więc pozycje aktualnie i odnoszą się do bieżącego stanu wiedzy i techniki. **W rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.**

Tematyczny układ rozprawy jest prawidłowy, przejrzysty i logiczny. Praca napisana jest zwięzłym technicznym językiem bez istotnych błędów edytorskich. Rysunki przygotowane są prawidłowo, są one w większości czytelne i prawidłowo opisane. Uzupełnieniem treści są również tabele zawarte zarówno w zasadniczej części dysertacji jak i w załącznikach. **Autorka wykazała się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawionych przez siebie wyników.**

Doktorantka realizowała badania w ramach programu doktoratu wdrożeniowego. Postawiła sobie użyteczny cel, do osiągnięcia którego konsekwentnie dążyła. Rozwiązywała częściowe problemy badawcze (druk warstw przewodzących, dielektrycznych, rezystywnych, struktury czujnika, anteny NFC, montaż hybrydowy elementów elektronicznych) z wykorzystaniem narzędzi/metod badawczych adekwatnych do rozwiązania danego problemu, bez przesadnej „fontanny” metod badawczych i analizy/interpretacji otrzymanych wyników. Każde z zagadnień opisanych w rozdziałach od 4 do 6 mogło stanowić bazę do osobnego doktoratu jeśli przeprowadzone zastałyby dogłębne badania i interpretacje. Tylko wówczas osiągnięcie zdefiniowanego na początku użytecznego celu byłoby bardzo trudne (ograniczony czas na realizację doktoratu i zasoby finansowe). W opinii Recenzenta należy zatem docenić konsekwencje i dyscyplinę prowadzenia przez Doktorantkę badań, inspirowanych i użytecznych z przemysłowego punktu widzenia, co jest celem głównym doktoratu wdrożeniowego. **Doktorantka rozwiązała postawione zagadnienia, użyła właściwych do tego metod, a przyjęte założenia były prawidłowe.**

2.2. Oryginalne elementy rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera rezultaty stanowiące oryginalny wkład Autorki do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne zarówno w obszarze technologii druku, metod badawczych jak i przetwarzania oraz interpretacji wyników badań. Za najważniejsze osiągnięcie Doktorantki uważam opracowanie oryginalnej technologii

drukowanego czujnika wilgotności z wykorzystaniem przemysłowej techniki druku – fleksografii oraz opracowanie autorskiej, dedykowanej dla fleksografii, heterofazowej kompozycji farby drukarskiej przewodzącej.

2.3.Uwagi i komentarze merytoryczne oraz edytorskie

W trakcie lektury rozprawy doktorskiej nie stwierdzono błędów merytorycznych czy wniosków dyskusyjnych natomiast moje komentarze/uwagi są następujące:

1. W którym miejscu na rysunku 2.5 przedstawiający fleksograficzny zespół drukowy znajduje się jeden z najważniejszych elementów – podłoże, na którym drukowany jest wzór?
2. Określenie "na przeciągu godzin" (str. 29) nie jest poprawne gramatycznie. Poprawną formą jest "w ciągu godzin" lub "w przeciągu godzin". Podobnie „na przeciągu ostatnich dekad” (str. 31).
3. Zdanie na stronie 36 „Wyróżniają sensory fizyczne, chemiczne i biosensory” jest niepoprawne składniowo. Chyba powinno być „Wyróżnia się sensory”. Warto tutaj również odnieść się do pozycji literaturowej, która wprowadza taki podział czujników.
4. Opisując na stronie 56 wzory testowe drukowanych ścieżek przewodzących warto podać długość tych wzorów tak, aby opis ten był kompletny.
5. Na stronie 62 Autorka pisze o wielkości najmniejszych elementów. Proszę o doprecyzowanie czy chodzi tutaj o szerokość, długość.
6. Czy testy zginania (opis na stronie 65) przeprowadzono zgodnie z odpowiednią normą, jeśli taka istnieje?
7. Jaka wartość rezystancji na kwadrat jest akceptowalna z aplikacyjnego punktu widzenia (na podstawie np. tabeli 4.9, danych z rysunku 4.19 i 4.21)?
8. W tabeli 4.15 opis kolumny „Ilość warstw” powinien być raczej „Liczba warstw”. Podobnie w tabeli 6.1 i innych.
9. W tabeli 7.1 kolumna „Ilość warstw” (powinno być „liczba”) ma stałą wartość i może być pominięta.
10. Proszę o podanie wymiarów projektu graficznego czujnika wilgotności przedstawionego na rysunku 7.1, 7.7, 7.10.
11. Rysunek 7.14 jest praktycznie nieczytelny.
12. Dlaczego punkty pomiarowe na przykład na rysunkach 7.15 i 7.16 nie połączono i nie dodano linii trendu. Tak przedstawione dane sugerują nieciągłość zależności rezystancji/czułości od wartości wilgotność. Brak jest opisu osi X na rysunku 7.15b.
13. Warto uzupełnić opis graficzny rysunku 8.1 o wskazanie elementów składowych anten zgodnie z opisem w tekście poniżej rysunku.
14. Na rysunku 8.3 brak jest informacji, że podane wymiary są w mm.
15. Czy jest możliwe zaproponowanie jednej optymalnej konstrukcji drukowanego czujnika wilgotności czy należy ją dobierać każdorazowo do aplikacji np. czujnik zalania lub czujnik na opakowaniu żywności?
16. Jaki jest szacowany jednostkowy koszt drukowanego taga z czujnikiem wilgotności i bezprzewodową transmisją danych?

3. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. 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)” **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz spełnia wymagania z nadmiarem stawiane rozprawom doktorskim**, opisane w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (art. 187, ust 1-2).

W oparciu o lekturę ocenianej rozprawy doktorskiej mgr Tatiany Nowickiej stwierdzam, że posiada ona usystematyzowaną wiedzę ogólną z zakresu wchodzącego w obszar dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz kompetencje do prowadzenia badań naukowych (co potwierdzone jest między opublikowanym innymi jednym artykułem naukowym). Niezwykle aplikacyjny wymiar przeprowadzonych badań, zwieńczony kartami technologicznymi produktu oraz patentem, w pełni wpisuje się w charakter programu doktoratu wdrożeniowego. **Przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych została więc wykazana i jest istotna.**

Biorąc pod uwagę przedstawione w rozprawie wyniki badań moja końcowa ocena rozprawy doktorskiej Pani mgr Tatiany Nowickiej jest pozytywna. Wnioskuję zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

