

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ dla RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI
I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

„Opracowanie konstrukcji i parametrów technologicznych zintegrowanego detektora punktu rosy wykonanego w technice druku strumieniowego”
magistra inżyniera **Michała Marka Marzęckiego**

Recenzja ma charakter odpowiedzi na pytania kwestionariusza RW ETI PW.

Ad.1.

Doktorant zdefiniował *explicite* jako główny **cel rozprawy** „*opracowanie optymalnej konstrukcji zintegrowanego detektora punktu rosy (ZDPR) w oparciu o komputerowe modelowania i symulacje pracy jego elementów składowych oraz opracowanie optymalnych parametrów technologicznych składających się na cały proces wytwarzania.*”

Ponadto zdefiniował cele poboczne:

- *opracowanie modelu numerycznego ZDPR na potrzeby optymalizacji konstrukcji oraz analizy rozkładu temperatury i transportu ciepła;*
- *opracowania procedur technologicznych do wytwarzania zaprojektowanych elementów – detektora molekuł wody, termorezystora i grzejnika na ceramicznej powierzchni ogniwa Peltiera;*
- *określenie parametrów i zakresu działania opracowanego higrometru punktu rosy.*

Podjął się udowodnienia następującej tezy rozprawy:

Przy zastosowaniu druku strumieniowego można wykonać wielowarstwową strukturę zintegrowanego detektora punktu rosy bezpośrednio na ogniwie Peltiera.

Zdefiniował też tezy pomocnicze – *możliwe jest wykonanie drukowanych w technologii druku strumieniowego:*

- *detektora molekuł wody;*
- *czujników temperatury;*
- *elementów grzewczych.*

Rozprawa omawia istotne problemy nowoczesnych technologii czujników pomiarowych, a uwaga skupiona jest na technologii elektroniki drukowanej. Zdefiniowane cele rozprawy i tezy są sformułowane jasno i jednoznacznie. Praca ma charakter konstrukcyjno-technologiczny, zawiera też elementy badań analitycznych w postaci opracowania numerycznych modeli podzespołów przetwornika pomiarowego i analiz symulacyjnych pracy tych podzespołów, w celu optymalizacji ich konstrukcji.

Ad. 2.

Wprowadzenie do tematyki pracy oparte na przeglądzie literatury jest omówione na około trzydziestu stronach rozdziału trzeciego, zawierających opis znanych technik drukarskich w elektronice drukowanej, przegląd stosowanych materiałów i zastosowań elektroniki drukowanej. Kolejne dziesięć stron rozdziału czwartego poświęcono omówieniu stanu wiedzy w zakresie działania i konstrukcji higrometrów punktu rosy. W tym zakresie doktorant miał uproszczone zadanie, gdyż laboratorium prof. Jachowicza, w którym realizowana jest praca doktorska, jest uznanym światowym liderem w zakresie takich przetworników, a konstrukcja będąca przedmiotem rozprawy całkowicie opiera się na wcześniejszym higrometrze ze scaloną strukturą MEMS oraz na drukowanym układzie prototypowym, którego konstrukcję opisano w 2015 roku. Literatura światowa dotycząca technologii czujników i elektroniki drukowanej obejmuje wiele set pozycji, a Doktorant skupił uwagę na przeglądzie jedynie wybranych z nich, reprezentujących nie wszystkie najważniejsze cytowania, można jednak uznać, że ograniczony wybór jest uzasadnionym rozwiązaniem, gdyż tekst rozprawy powinien być zawarty w rozsądnej objętości. Prezentowany w rozprawie przegląd literatury obejmuje 73 pozycje bibliograficzne z okresu głównie ostatnich dziesięciu lat, a więc pokazuje aktualny stan badań oraz 12 oryginalnych, współautorskich prac własnych, z których dwie najważniejsze, bo opisujące wyniki prac zrealizowanych w trakcie badań doktorskich, są sygnowane na pierwszym miejscu nazwiskiem autora dysertacji. Cytowana literatura świadczy o dostatecznej wiedzy autora, a przedstawione wnioski są prawidłowo wykorzystane w części badawczej rozprawy. W bazie WoS przy nazwisku Michał Marzęcki wymieniono 11 prac, 20 cytowań; h=3.

Ad. 3.

Odpowiedź na zadane pytania brzmi – tak, autor rozwiązał postawione zadania i osiągnął założone cele stosując właściwe metody, przy prawidłowo przyjętych założeniach. Doktorant skupił uwagę na następujących problemach:

1. opracował model numeryczny zintegrowanego detektora punktu rosy na potrzeby optymalizacji konstrukcji zawierającej struktury: ogniwo Peltiera, grzejnik, termorezystor i detektor molekuł wody oraz przeprowadził szereg analiz pracy tych podzespołów na drodze symulacji rozkładu temperatury i transportu ciepła w warunkach ustalonych i dynamicznych, w różnych konfiguracjach geometrycznych i strukturalnych; modelowanie i badania symulacyjne wykonał z wykorzystaniem chyba najbardziej obecnie popularnej platformy COMSOL Multiphysics;
2. opracował projekt grzejnika na podstawie symulacji różnych jego powierzchni, kształtów, w tym szerokości elektrod, na drodze analizy rozkładów potencjału, rozkładów temperatury i prędkości nagrzewania i chłodzenia; najlepsze wyniki uzyskał dla grzejnika wykonanego na samodzielnej warstwie pokrywającej całą powierzchnię ogniwa Peltiera;
3. opracował projekt termorezystora; najkorzystniejsze właściwości metrologiczne ma rozwiązanie z rozdzielonymi w różnych płaszczyznach czujnikami; prawdziwym problemem jest stabilność czasowa parametrów drukowanego termorezystora, co dotyczy dalszych badań;
4. opracował projekt konstrukcji detektora molekuł wody, optymalnym okazał się klasyczny symetryczny czujnik impedancji elektrycznej;

5. najistotniejszym z punktu widzenia praktycznego wykonania higrometru o parametrach nadających się do wdrożenia było opracowanie procedur technologicznych do wytwarzania zaprojektowanych elementów – detektora molekuł wody, termorezystora i grzejnika na ceramicznej powierzchni ogniwa Peltiera; doktorant sprawdził w eksperymentach laboratoryjnych szereg opcji technologicznych, jak wydruk grzejnika na ceramice, wpływ orientacji wydruku, procedury utwardzania tuszu, wydruk warstw dielektrycznych, wydruk termorezystora, wreszcie wydruk detektora molekuł wody. Sprawdził stabilność wydrukowanych struktur i przeprowadził kompleksowe pomiary ich właściwości, m.in. badając termograficznie rozkłady temperatury jak i właściwości elektryczne czujników. Wykazał przydatność praktyczną skonstruowanego prototypu zintegrowanego detektora punktu rosy;
6. określił parametry i zakres działania opracowanego higrometru punktu rosy.

Ad. 4.

Przeprowadzone badania wykazują, że cel pracy, jakim było *opracowanie optymalnej konstrukcji zintegrowanego detektora punktu rosy (ZDPR) w oparciu o komputerowe modelowanie i symulacje pracy jego elementów składowych oraz opracowanie optymalnych parametrów technologicznych składających się na cały proces wytwarzania* został osiągnięty. Problem jest aktualny i ważny z praktycznego punktu widzenia potencjalnych aplikacji diagnostycznych metody w tanich i masowo produkowanych drukowanych higrometrach punktu rosy. Zaproponowane podejście jest nowatorskie i ważne, w związku z możliwością zastosowania opracowanej metody do szybkich pomiarów wilgotności, np. w domowych stacjach hydrologicznych. Udowodnienie praktycznej przydatności zaproponowanej technologii drukowanej do wytwarzania higrometrów punktu rosy wystarcza z punktu widzenia uznania rozprawy doktorskiej. Przeprowadzone prace niewątpliwie mają charakter badań naukowych o charakterze doświadczalnym i technologicznym, popartym stosownymi konstrukcjami i rozważaniami analitycznymi. Zastosowane metody badań odpowiadają aktualnemu poziomowi prac na świecie.

Niewątpliwie ciągłe pomiary wilgotności należą do nowoczesnej dziedziny metod pomiarowo-diagnostycznych, mają szerokie aplikacje praktyczne m.in. w określaniu komfortu w środowisku pracy i w domu i są w ostatnich latach intensywnie rozwijane. Zastosowane środki techniczne jak i opracowane procedury okazały się efektywne i jak wykazano w części eksperymentalnej, z powodzeniem mogą być zastosowane w praktyce pomiarowej. Warto podkreślić, że opracowanie technologii wytwarzania elektroniki drukowanej i wymienionych procedur testowych wiązało się z koniecznością zestawienia zaawansowanych technicznie stanowisk technologiczno-pomiarowych, jak i wykonania szeregu badań z użyciem opracowanego, zaawansowanego i nowoczesnego sprzętu. Wykonanie badań wymagało też poznania i zrozumienia procesów zachodzących w testowanych układach w warunkach statycznych i dynamicznych. Dla przeprowadzenia stosownej analizy Doktorant opracował modele badanych struktur i dokonał analizy ich pracy w celu doboru zoptymalizowanych parametrów procedur testowych. Podsumowanie rozprawy obejmuje dyskusję wyników i jest zakończone wnioskami, co do praktycznej przydatności przeprowadzonych badań.

Reasumując, stosując prawidłowe metody analizy, w tym opracowane własne modele cyfrowe i badania symulacyjne, Autor udowodnił zasadność postawionych założeń i wartość zaproponowanych technologii, jak i możliwość praktycznej aplikacji zaproponowanej metody,

a więc rozwiązał postawiony problem naukowy, który ma odniesienie do praktyki pomiarów wilgotności w wielu zastosowaniach praktycznych i w diagnostyce, np. meteorologicznej.

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia uważam następujące elementy rozprawy:

1. udowodnienie tezy rozprawy: *Przy zastosowaniu druku strumieniowego można wykonać wielowarstwową strukturę zintegrowanego detektora punktu rosy bezpośrednio na ogniwie Peltiera.*
2. opracowanie modeli numerycznych i przeprowadzenie badań symulacyjnych podzespołów ZPDP w celu optymalizacji ich konstrukcji;
3. opracowanie i wykonanie specjalistycznej aparatury technologicznej i pomiarowej umożliwiających przeprowadzenie badań laboratoryjnych i praktyczną weryfikację zaproponowanych rozwiązań;
4. określenie warunków optymalizacji pobudzeń dla pomiarów sondy higrometru punktu rosy;
5. udowodnienie tez pomocniczych – *możliwe jest wykonanie drukowanych w technologii druku strumieniowego:*
 - *detektora molekuł wody;*
 - *czujników temperatury;*
 - *elementów grzewczych.*

Warto podkreślić znaczenie praktyczne rozprawy, gdyż jej wyniki mogą być bezpośrednio wdrożone w produkcji nowoczesnych systemów i tanich aplikacji elektroniki strumieniowej.

Ad. 5.

Warto odpowiedzieć na pytanie, czy rozprawa napisana jest poprawnie językowo i stylistycznie? Generalnie, praca jest napisana starannie, szata graficzna rozprawy jest przejrzysta, a zaprezentowane rysunki, fotografie i wykresy są w zasadzie starannie opracowane i czytelne. Język pracy jest poprawny. Usterki edycyjne są typowe i nie odbiegają poziomem od innych dysertacji doktorskich. Zaproponowaną metodologię można uznać za prawidłową. Niedosyt budzi momentami zbyt zwięzła, jak na rozprawę doktorską prezentacja wyników prowadzonych badań i prezentacji wyników eksperymentów, o czym w kolejnym punkcie.

Ad.6.

Odpowiedź jakie są wady i słabe strony rozprawy poniżej.

- Opis nie uwzględnia jasnego wskazania jaki jest wkład własny Autora rozprawy w wykonanie poszczególnych fragmentów pracy. Wszystkie cytowania prac własnych wskazują na zespołowy charakter pracy, a na podstawie cytowanych pozycji nie wiadomo, gdzie wkład Doktoranta jest rzeczywiście autorski. Proszę o jednoznaczne deklaracje, które pomysły i badania są autorstwa Doktoranta, które uważa za oryginalne i ważne badawczo.

- Warto było jasno wskazać w założeniach projektowych 5.1, które konstrukcje wcześniej opracowanego w zespole prof. Jachowicza scalonego higrometru stanowią inspirację pracy i jak wygląda algorytm cyklu pomiarowego. Obecnie opis wygląda sztucznie, rysunki 40 i 41 to nie są schematy ilustrujące wpływ błędu, a po prostu przebiegi czasowe temperatury i pojemności w trakcie pracy higrometru. Powinny one być jednoznacznie związane z obszarami konstrukcyjnymi, co ułatwiłoby czytanie tekstu.
- Punkt 5.2.2 i kolejne – proszę o podanie szczegółów opracowanych modeli cyfrowych.
- Nie opisano procedury kalibracji pomiaru ani nie porównano uzyskanych parametrów z oryginałem scalonego higrometru punktu rosy. Kiedy zastosować technologię strumieniową, a kiedy scalony higrometr?
- Brakuje szczegółów pozwalających na pełną ocenę wartości proponowanej technologii – ile czasu trwają poszczególne fazy wytwórcze, jakie są praktyczne ograniczenia metody itd?
- Tab. 2 – czy to rzeczywiście psychometr?

Przedstawione uwagi mają znaczenie drugorzędne i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej.

Ad.7.

Rozprawa stanowi raport z przeprowadzonych badań i pozwala na stwierdzenie, że Doktorant wykazał, iż cel rozprawy, jakim było *Opracowanie konstrukcji i parametrów technologicznych zintegrowanego detektora punktu rosy wykonanego w technice druku strumieniowego* jest ważny i możliwy do osiągnięcia w rozwiązaniach praktycznych, a weryfikacja metody na drodze symulacji eksperymentów w celu optymalizacji podzespołów konstrukcji i praktyczne wykonanie prototypowych konstrukcji potwierdzają osiągnięcie założonego celu i udowodnienia tez rozprawy, a więc **potwierdzają możliwość wdrożenia taniej technologii elektroniki strumieniowej do produkcji higrometru punktu rosy.**

Ad.8.

Biorąc pod uwagę opublikowanie wyników badań w czasopiśmie Sensors and Actuators B-Chemical – pierwszy autor doktorant i promotorzy, IF 5,4, rozprawę zaliczam do kategorii e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej, pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej Pana Michała Marzęckiego wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Antoni Nowakowski

