

Prof. dr hab. inż. Katarzyna Zakrzewska

.....
tytuł, stopień, mię i nazwisko

14.09.2019

.....
data

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie, Wydział Informatyki, Elektroniki
i Telekomunikacji, Katedra Elektroniki
miejsce pracy

**KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY
DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU
ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

**„Opracowanie konstrukcji i parametrów technologicznych zintegrowanego
detektora punktu rosy wykonanego w technice druku strumieniowego”**

Autor rozprawy: **mgr inż. Michał Marek Marzęcki**
Promotor: **prof. dr hab. inż. Ryszard Jachowicz**
Promotor pomocniczy: **dr inż. Grzegorz Tarapata**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało on dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska porusza istotne z praktycznego punktu widzenia zagadnienie wykonania wielowarstwowego czujnika punktu rosy do detekcji molekuł wody. Autor wybrał w tym celu technologię druku strumieniowego. Celem naukowym tej rozprawy według Autora jest „*opracowanie optymalnej konstrukcji zintegrowanego detektora punktu rosy (ZDPR) w oparciu o komputerowe modelowanie i symulacje pracy jego elementów składowych oraz opracowanie optymalnych cząstkowych parametrów technologicznych wytwarzania tych detektorów poprzez wielokrotne modyfikowanie procesów technologicznych składających się na cały proces wytwarzania*”. Autor osiąga ten cel poprzez opracowanie modelu numerycznego drukowanych detektorów i ich elementów składowych, opracowanie procedur technologicznych prowadzących do wytworzenia detektora na ceramicznej powierzchni ogniwa Peltiera, określenie parametrów pracy i zakresu działania urządzenia. Zasadnicza teza pracy została jasno sformułowana przez Autora w brzmieniu: „*Przy zastosowaniu druku strumieniowego można wykonać wielowarstwową strukturę zintegrowanego detektora punktu rosy bezpośrednio na ogniwie Peltiera*”. Autor rozprawy wyszczególnia również tezy (hipotezy) pomocnicze rozróżniając trzy zasadnicze elementy zintegrowanego higrometru tj. detektor H₂O, czujnik temperatury i element grzewczy. W mojej opinii tak postawiona teza rozprawy została udokumentowana badaniami przedstawionymi w dalszej części rozprawy.

2. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny)?

Rozprawa ma zasadniczo charakter konstrukcyjny. Jednak opiera się na dogłębnej analizie teoretycznej i nie brak jej elementów stanowiących o jej aspekcie doświadczalnym. Wynika to z układu pracy, która składa się z części wprowadzającej i literaturowej (Rozdz. 1-4), części projektowej (Rozdz. 5), części technologicznej (Rozdz. 6) oraz części eksperymentalnej opisującej testowanie skonstruowanego urządzenia (Rozdz. 7). Część projektowa obejmuje zarówno założenia przyjęte przez Doktoranta jak i symulacje numeryczne zarówno grzejnika, jak i termorezystora oraz detektora molekuł wody przeprowadzone przez Autora pracy. W części technologicznej opisano szczegółowo trudności jakie towarzyszą wydrukowi elementów składowych ZDPR i podano przyjęte rozwiązania. Część eksperymentalna została potraktowana dość skrótowo i obejmuje badania właściwości cieplnych (7.1), pomiarowych detektora molekuł wody (7.2) i funkcjonalnych ZDPR (7.3). Taki układ pracy świadczy o kompleksowym podejściu Doktoranta do rozwiązania postawionego problemu.

3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczących o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Bibliografia rozprawy obejmuje 73 referencje w tym odnośniki do istotnych dla tematu pracy publikacji w czasopismach o zasięgu międzynarodowym jak i do materiałów dostępnych na stronach internetowych. Prawidłowa analiza źródeł świadczy o odpowiedniej wiedzy Autora rozprawy w tej dziedzinie. Wnioski z przeglądu literatury zostały przedstawione w sposób czytelny i uzasadniony.

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

Bazując na wcześniejszych doświadczeniach z zastosowaniem technologii drukowanej do konstrukcji higrometru punktu rosy na elastycznej folii (praca G. Tarapata, M. Marzęcki, R. Selma, D. Paczesny, and R. Jachowicz, *Novel dew point hygrometer fabricated with inkjet printing technology*, *Procedia Eng.*, vol.120, pp. 1099-1102, 2015) Doktorant podjął próbę wykorzystania druku strumieniowego do wykonania ZDPR bezpośrednio na podłożu ceramicznym. Motywacją do podjęcia tych działań były, jak opisano w § 4.3 pt. *Drukowany higrometr punktu rosy*, niezadawalająca dokładność pomiaru punktu rosy i długi czas odpowiedzi pierwszego detektora wykonanego w 2015 r. na podłożu elastycznym. Technologia drukowana została zastosowana przez Autora rozprawy jako alternatywa do technologii półprzewodnikowych, wykorzystywanych w czujnikach MEMS z powodu prostoty i niższego kosztu. W rozdziale 1 Wstęp czytamy: „*W niniejszej pracy autor stara się wyjść naprzeciw tym trendom, adaptując konstrukcję mikrosystemu zaprojektowanego dla technologii półprzewodnikowej do produkcji w technologii drukowanej. Technologia drukowana, choć z definicji przeznaczona do produkcji nieskomplikowanych elementów i układów, użyta została do wytworzenia złożonego i precyzyjnego urządzenia pomiarowego*”. Doktorant używa określenia „*ambitny plan*” w odniesieniu do realizacji tego zadania z czym można się w pełni zgodzić. Trudnością była „*konieczność opracowania całego ciągu technologicznego i zastosowanie nietypowego w technologii drukowanej podłoża ceramicznego*”. Autor rozprawy opisuje szczegółowo założenia projektowe, model struktury detektora, przeprowadzone symulacje komputerowe, realizację rzeczywistego detektora oraz jego testowanie. Metody i założenia przyjęte w pracy są uzasadnione.

5. 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.

Oryginalność rozprawy polega na wykorzystaniu metody druku strumieniowego do wytworzenia skomplikowanego detektora punktu rosy złożonego z trzech elementów na podłożu ceramicznym. Podłoże to stwarza wiele problemów w przypadku tego typu technologii nanoszenia ze względu na procesy wnikanania osadzanego materiału do wnętrza podłoża i rozpyływanie się po powierzchni. Tego

typu trudności Autor rozprawy napotkał, przeanalizował i znalazł pewne optymalne rozwiązania. Samodzielny i oryginalny wkład Autora to rozwiązanie problemu konstrukcji detektora nie metodami „prób i błędów” jak to często można zaobserwować lecz w sposób metodyczny prowadząc analizę numeryczną każdego elementu detektora. Tematyka rozprawy mieści się w głównym nurcie badań w tej dziedzinie prowadzonych w renomowanych ośrodkach naukowych na świecie. Pewnym niedociągnięciem przygotowanej rozprawy jest brak bezpośredniego porównania wyników własnych z obecnymi osiągnięciami tych ośrodków. Odniesieniem dla Doktoranta jest działalność naukowa grupy, z którą pracuje czyli szeroko cytowane prace Profesora Ryszarda Jachowicza. To podejście jest zrozumiałe lecz oczekiwałoby się od Doktoranta szerszej analizy porównawczej.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie szczegółowych symulacji (przy użyciu oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych COMSOL Multiphysics) pracy grzejnika, termorezystora i detektora molekuł wody analizując wpływ wielu parametrów w tym przede wszystkim geometrii elektrod, na rozkład temperatury i błędy pomiarowe.
- Opracowanie teoretyczne trzech modeli (konstrukcji) ZDPR powiązane z analizą ich przydatności do pracy w warunkach rzeczywistych
- Wykonanie detektora ZDPR i przeprowadzenie testów jego pracy w warunkach laboratoryjnych. Uzyskanie wystarczająco dobrych parametrów pracy: zakres pomiaru punktu rosy od -4°C do 20°C z dokładnością $0,5\text{ K}$ i czasem odpowiedzi $0,5\text{ s}$.

6. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjną rozprawy)?

Autor rozprawy w jej pierwszej części skupił się na uzasadnieniu podjętych działań w zakresie technologii drukowanej w tym metod i materiałów oraz zastosowań. Należy przyznać, że zrobił to w sposób przekonujący lecz znacznie wykraczający poza zakres tematyczny rozprawy. Dla przykładu, w § 3.3 pt. „Zastosowania elektroniki drukowanej” oprócz czujników Autor analizuje w moim odczuciu zbyt szczegółowo ogniwa fotowoltaiczne, wyświetlacze i anteny. W ten sposób praca traci zwięzłość lecz przyznać należy, że układ rozprawy jest prawidłowy i jasny dla czytelnika. Strona redakcyjna rozprawy wymaga dopracowania. Uważne przeczytanie pracy przed jej ostatecznym złożeniem pozwoliłoby uniknąć wielu „literówek”. Podpisy pod rysunkami nie są czytelne ze względu na przyjęty format. W podpisach nie zawsze znajdujemy źródło np. Rys.3-5, Rys.12, Rys. 33-34. Wydaje się, że legenda dotycząca P_g na Rys.114 została błędnie przypisana danym. Na tym samym rysunku początkowa temperatura wynosi 40°C a w tekście mamy informacje o 20°C (str. 132). Drobne błędy redakcyjne nie obniżają jednak wartości merytorycznej rozprawy.

7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Każda praca naukowa ma swoje słabsze i mocniejsze strony. Ich ocena jest często subiektywna lecz stwarza możliwość dyskusji merytorycznej. Moje uwagi mają zatem charakter polemiczny.

- Na etapie projektowania (§ 5.1.6. Konstrukcja ZDPR) Doktorant zaproponował trzy konstrukcje ZDPR (Rys. 43). Poszczególne konstrukcje różnią się rozmieszczeniem podstawowych elementów detektora na podłożu ceramicznym. Jedynie w przypadku wariantu 2 termorezystor i grzejnik są bezpośrednio naniesione na podłoże ceramiczne realizując tezę pracy. Którą konstrukcję wybrał Autor rozprawy ostatecznie do wykonania? Nie jest dla mnie jasne, której konstrukcji dotyczą wyniki przedstawione w Rozdz. 7.
- W szczegółowych podsumowaniach do projektów: grzejnika § 5.3.7 i termorezystora § 5.4.4 znajdujemy informacje dotyczące zalet i wad różnych wariantów konstrukcji. Podsumowania do projektu detektora molekuł wody (§ 5.5) brak. W przypadku projektu grzejnika § 5.3.7 wybór wydaje się być oczywisty: najbardziej optymalne są konstrukcje 2 i 3 ze względu na równomierny rozkład temperatury w obszarze lustra. Jednak brak takiego wniosku w pracy. W przypadku projektu termorezystora § 5.4.4 Doktorant jednoznacznie wskazuje na konstrukcję 3 ze względu na rozkład temperatury. Brak globalnego porównania i jednoznacznego wskazania jaka konstrukcja ZDPR jest optymalna według Autora pracy.

- O ile część pracy dotycząca symulacji parametrów ZDPR została bardzo wnikliwie potraktowana przez Doktoranta, odnoszę wrażenie, że pozostałe części w tym technologia i badania parametrów ZDPR nie zostały w wystarczający sposób opracowane. W przypadku badań eksperymentalnych detektora punktu rosy brak jest wyraźnie sprecyzowanego protokołu pomiarów. Zestawione stanowisko pomiarowe do charakteryzacji parametrów funkcjonalnych ZDPR nie zostało w wystarczający sposób opisane. Brak informacji nt. poziomu wilgotności testowanych próbek. Brak odniesienia do koncentracji molekuł wody. Brak weryfikacji uzyskanych wyników w oparciu o pomiary przy pomocy referencyjnego detektora wilgotności.
- Istotne wydaje się być opisanie metodologii wyznaczenia punktu rosy na podstawie pomiaru impedancji w przypadku IDE § 7.2. Ze względu na szczegółową dyskusję dotyczącą analizy teoretycznej w § 5.5 *Projekt detektora molekuł wody*, interesujące byłoby porównanie czy do wyznaczenia charakterystyk rezystancyjnej i pojemnościowej przedstawionych na Rys. 116-117 użyto tego samego schematu zastępczego jak na Rys. 78? Jak zdefiniowano punkt, dla którego obserwuje się największą zmianę parametrów elektrycznych?
- Autor rozprawy stwierdza na str. 135, że „*najmniej regularne są charakterystyki dla modułu impedancji $|Z|$ i rezystancji detektora R* ”. Nie jest to dla mnie oczywiste co oznacza w tym kontekście słowo „regularne”. Wszystkie charakterystyki wyglądają podobnie w sensie ciągłości i szumów.
- Na Rys. 114 przedstawiającym temperaturę lustra w czasie cyklicznej pracy, obserwujemy wyraźny, skokowy wzrost T_1 w momencie wyłączenia zasilania grzejnika. Dlaczego?
- We wzorze na graniczny błąd pomiaru temperatury lustra (32) znajdujemy 4 przyczynki. Porównanie ze wzorami 10 i 12 wskazuje na brak zgodności. Wydaje się, że powinno się podać wzór ogólny a później uwzględnić przypadki szczególne.

8. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Czy i jaka jest przydatność praktyczna rozprawy dla gospodarki narodowej?

Praktyczna przydatność rozprawy dla nauk technicznych i gospodarki nie budzi wątpliwości. Wykorzystanie sensorów substancji chemicznych i wielkości fizycznych w tym detektorów wilgotności do kontroli stanu środowiska stało się w ostatnich latach zadaniem priorytetowym dla rządów wielu państw. Ograniczenie poziomu zanieczyszczeń powietrza oraz koncepcja Internetu Rzeczy motywują naukowców do poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie budowy nowych detektorów w tańszych technologiach. Praca Doktoranta dobrze wpisuje się w ten nurt.

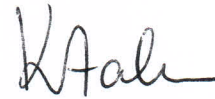
9. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

- 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

Wniosek końcowy:

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi cenny i oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej jaką jest automatyka, elektronika i elektrotechnika. W szczególności, wyniki uzyskane w ramach tej pracy wpisują się w rozwijany obecnie na świecie nurt badań nad materiałami funkcjonalnymi dla sensoryki i elektroniki drukowanej. Rozprawa spełnia wymagania określone Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i

tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.). Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr inż. Michała Marka Marzęckiego do dalszych etapów procedury doktorskiej. Praca spełnia wymagania z wyraznym nadmiarem ze względu na jej merytoryczną zawartość jak również z powodu dobrego dorobku publikacyjnego Autora (przynajmniej 3 publikacje w czasopismach o wysokim IF, Sensors and Actuators B, A, and Optics Letters). Nie wykluczam, że w przypadku pozytywnego przebiegu obrony pracy, przy zadawalającej odpowiedzi na recenzje, będzie można postawić wniosek o wyróżnienie.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'K. A. A.', is positioned in the upper right quadrant of the page.