

dr hab. inż. Jerzy Weremczuk, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Systemów Elektronicznych
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

Warszawa, 25.11.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: *„Opracowanie instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych”*

Autor rozprawy: **mgr inż. Jakub Aniulis**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Politechnika Wroclawska z dnia 03.10.2024 r.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel, teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Powszechnie dostępne różnorodne techniki wytwarzania addytywnego stały się motorem rozwoju metod i narzędzi szybkiego prototypowania. Techniki druku 3D są bardzo użyteczne w pracach projektowych gdyż umożliwiają szybką weryfikację koncepcji oraz pozwalają konstruktorom na wprowadzanie w modelu wymaganych poprawek bezpośrednio na miejscu. Również w przyszłości myśli się o zastąpieniu magazynów części zamiennych przez możliwość samodzielnego wydruku niezbędnych komponentów przez użytkownika. Podstawą do rozwoju tej gałęzi są tanie materiały (filamenty) o oczekiwanych właściwościach fizycznych i chemicznych oraz urządzenia technologiczne pozwalające na ich wytwarzanie w sposób gwarantujący zachowanie deklarowanych parametrów technicznych w całej partii produkcyjnej.

Prowadzone w ramach rozprawy badania, które znalazły odzwierciedlenie w tytule rozprawy, wpisują się więc w bardzo ważny nurt rozwoju narzędzi produkcyjnych filamentów i technik druku 3D. Rozprawa ma charakter doświadczalno-teoretyczny. Duży nacisk został położony na praktyczne aspekty wykorzystania wyników co jest wymagane dla doktoratów wdrożeniowych.

Autor postawił następującą tezę rozprawy:

„Na podstawie enkodowanych pomiarów filamentu: średnicy mierzonej metodą optyczną i kompresyjnymi łożyskami, wieloosiowej pojemności, analizy widma ultradźwiękowego oraz optycznej spektroskopii transmisyjnej i emisyjnej, możliwa jest wzdluzna charakteryzacja filamentu produkowanego do druku 3D osadzania topionego materialu i pomiar jego istotnych parametrów: względnej przenikalności elektrycznej, krągłości, defektów strukturalnych, poziomu zawilgocenia materialu, proporcji składników, współczynnika Poissona, a także możliwa jest klasyfikacja materialu.”

Oprócz tezy Autor wprowadza cele szczegółowe rozprawy którymi są:

- Przygotowanie instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych takich jak druk 3D typu FDM
- Zaprojektowanie, budowa i optymalizacja aparatury pomiarowej do charakteryzacji materiałów aktywowanych chemicznie w formie filamentu zarówno podczas procesu wytwarzania jak i po jego zakończeniu
- Opracowanie i weryfikacja eksperymentalna przygotowanych autorskich układów elektronicznych odpowiadających za działanie poszczególnych modułów pomiarowych
- Zbadanie własności materiałów w formie filamentu i ich porównanie z metodami referencyjnymi
- Praktyczne wykorzystanie powstałej instalacji przy wytwarzaniu materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych w formie filamentu dla drukarek 3D typu FDM/FFF
- Realizacja i charakteryzacja autorskiej metody redukcji średnicy filamentów użytej w instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie.

Przyjęty zakres prac jest bardzo obszerny i wielowątkowy. Rozpatrywane w rozprawie zagadnienia naukowe i techniczne mieszczą się w głównym nurcie rozwoju technologii druku 3D i są aktualne. Teza została postawiona w sposób klarowny. Mimo iż jest rozbudowana to w opinii recenzenta, może przydałoby się jakieś doprecyzowanie określenia „*klasyfikacja materiału*”, chociażby jej celu, przyjętych kryteriów czy użytych metod.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Zamieszczona bibliografia dotyczy dziedzin związanych z obszarem tematycznym rozprawy. Bibliografia jest aktualna i obszerna. Obejmuje 181 pozycji gdzie większość z nich to są odesłania do artykułów opublikowanych w czasopiśmie naukowych i do abstraktów konferencyjnych oraz rozdziałów w książkach. Zdecydowana większość pozycji bibliografii została zaczerpnięta z najnowszej literatury światowej.

Dobór literatury jest prawidłowy. Szeroko cytowane pozycje świadczą o dobrej orientacji Autora w kierunkach prowadzonych nas świecie prac badawczych i technologicznych. Wyniki prac opisanych w literaturze (dane, wykresy, rysunki) zostały porównane w różnych fragmentach rozprawy z wynikami własnymi. Literatura została więc użyta w sposób właściwy. Wnioski z przeglądu źródeł, które podsumowują rozdział wstępny, zasadniczo zostały sformułowane w sposób jasny i przekonujący.

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

Postawione zagadnienia zostały rozwiązane poprzez realizację szeregu zadań szczegółowych. Autor opracował unikalne stanowisko (sprzęt i oprogramowanie) do monitorowania parametrów technicznych filamentu w czasie rzeczywistym (R-FQM) to znaczy w czasie przebiegu materiału (typowo w formie żyłki o średnicy 1,75mm) przez stanowisko produkcyjne lub drukarkę 3D. Do jego budowy Autor opracował specjalizowane czujniki: czujnik do pomiaru właściwości elektrycznych filamentu w formie rurki z elektrodami

umieszczonymi w wielu osiach, czujnik do wieloosiowych pomiarów średnicy filamentu, czujnik od spektroskopii ultradźwiękowej oraz enkoder do pomiaru położenia wzdłużnego filamentu.

Autor przeprowadził badania symulacyjne i kalibracyjne czujników i układów pomiarowych. Opisał metodykę fuzji zebranych danych i metodyki kalibracji poszczególnych modułów stanowiska. Przeanalizował wpływ wybranych czynników na błędy pomiarowe oraz zaproponował metody ich zmniejszenia.

Zbierane na bieżąco dane pomiarowe umożliwiły wprowadzenie poprawek na odczyty czujników a w trakcie dalszej obróbki stosując zaproponowane modele empiryczne i teoretyczne na efektywne monitorowanie między innymi takich parametrów jak wilgotność filamentu, względna przenikalność elektryczna, odstępstwa od krągłość przekroju poprzecznego filamentu, wartość współczynnika Poissona oraz na monitorowanie defektów wynikających z miejscowych zaburzeń w proporcjach składników filamentu. Autor opisał również pomiary wykonane modułami ultradźwiękowym i optycznym. Na podstawie zebranych danych (przebadano kilkaset próbek) wykazano, że możliwa jest klasyfikacja nieznanego materiału do określonych wcześniej kategorii wyznaczonych dla wybranych typów materiałów stosowanych w filamentach.

W ostatnim rozdziale Autor opisał wyniki działania zbudowanej przez siebie instalacji (z R-FQM) do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie która umożliwia utrzymanie wysokiej jakości filamentu w całej jego długości stosując opracowane metody kontroli i korekcji parametrów technicznych filamentu. Przetestowano monitorowanie jakości filamentu w czasie rzeczywistym w czasie redukcji średnicy filamentu za pomocą jego wytłaczania w stanie stałym (SSE).

Praca jest wielowątkowa i bardzo obszerna tematycznie stąd zrozumiałe jest, że pewne zagadnienia nie były opisywane bardzo szczegółowo. Mimo to, w mojej opinii, można mieć następujące uwagi/pytania:

1. Autor opracował i poddał weryfikacji układy elektroniczne odpowiadające za działanie poszczególnych modułów pomiarowych. W rozprawie znajduje się jedynie wizualizacja PCB (rys. 3.15) i zdjęcie obudowanego prototypu (rys. 3.17) oraz widoki oprogramowania sprzętowego (rys. 3.18) i aplikacji komputerowej (rys. 3.19). Wskazane byłoby zamieszczenie schematów elektrycznych układów (np. w dodatku) lub gdyby byłoby to kłopotliwe ze względu na obszerność dokumentacji to chociaż zamieszczenie schematów blokowych elektroniki z podaniem oznaczeń kluczowych elementów elektronicznych, diagramów działania opracowanych aplikacji komputerowych i sprzętowych.
2. Czy nie byłoby możliwe połączenie funkcji enkodera ruchu wzdłużnego (rys. 3.2 a) i pomiaru średnicy (rys. 3.3 a) w jednym czujniku ?
3. Nie znalazłem w rozprawie informacji jaka jest zasada pracy modułu pomiarowego czujnika pojemności (jest tylko podana częstotliwość pobudzenia czujnika pojemnościowego 1,12 MHz)? Ile czasu zajmuje konwersja (CDC) pojemności na wartość cyfrową?
4. Czy przyjęta metoda pomiarowa stałej dielektrycznej filamentu będzie działała poprawnie w przypadku pomiarów filamentu o dużych stratach dielektryka np. mocno zawilgoconego lub filamentu z domieszką grafenu (filamentu przewodzącego prąd)?

Reasumując, uważam, że przedstawione przez Autora zagadnienia, dobierając odpowiednie narzędzia i metody badawcze, zostały w pełni rozwiązane a Autor wykazał

szeroką wiedzę z obszaru problematyki obejmującej technologię wytwarzania materiałów do druku 3D oraz dedykowanych jej układów i systemów pomiarowych. Wymienione powyżej uwagi nie umniejszają wysokiej wartości przedłożonej rozprawy.

4. 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?

Zaproponowane przez Autora rozwiązanie problemu jest oryginalne. Do najważniejszych osiągnięć zaliczam:

- opracowanie (w tym badania symulacyjne) i weryfikację eksperymentalną czujników i autorskich układów elektronicznych składających się na system R-FQM,
- budowę i optymalizację (np. w celu redukcji błędów pomiarowych) instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych,
- wykazanie, że zaproponowana metodyka działania R-FQM jest efektywnym narzędziem do automatycznej charakteryzacji wzdłużnej własności filamentów w trakcie przebiegu wytwarzanego materiału przez instalację co umożliwi uzyskanie sygnału zwrotnego niezbędnego do działania automatyki zapewniającej utrzymanie zadanych parametrów filamentu w trakcie jego produkcji.

Prowadzone przez Autora prace mają bardzo duży potencjał wdrożeniowy. W przyszłości opisana metodyka może zostać użyta w komercyjnych instalacjach do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie lub do kontroli parametrów filamentu podawanego w czasie pracy drukarki 3D.

Należy też podkreślić, że Autor rozprawy w swoim dorobku posiada dwa artykuły współautorskie, wydane w topowym dla tej tematyki międzynarodowym czasopiśmie z listy JCR. W obu z nich Autor występuje na pierwszym miejscu:

1. Jakub Aniulis, Grzegorz Dudzik, and Krzysztof M. Abramski. “Automated non-destructive 3D printing filament material properties monitoring based on electric permittivity, longitudinal encoding and diameter multi-axes real-time measurements” *Additive Manufacturing* 84 (2024): 104103. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104103

2. Jakub Aniulis, Bartosz Kryszak, Michał Grzymajło, Grzegorz Dudzik, Krzysztof Marek Abramski, Konrad Szustakiewicz, “Characterisation and manufacturing methods of material extrusion 3D printing composites filaments based on polylactide and nanohydroxyapatite”, *Additive Manufacturing* 94 (2024): 104514. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104514

Uzyskane rezultaty były podstawą do przygotowania zgłoszenia patentowego pt. „Układ do pomiaru względnej przenikalności dielektrycznej materiału stosowanego w urządzeniu wytwarzania przyrostowego”, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 2024, P.442152,

Autor prezentował wyniki badań (przygotowanie i wygłoszenie referatów) na czterech międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych.

Należy też wspomnieć o uzyskaniu Nagrody PRIMUS przyznawanej przez Dział Nauki Politechniki Wrocławskiej w ramach premiowania publikacji najwyższej punktowanych na całej uczelni w roku 2024.

Reasumując, bez najmniejszych wątpliwości, oceniana rozprawa stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora oraz posiada bardzo wysoką pozycję w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej przez literaturę światową.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa przedstawiona jest na 122 stronach i jest napisana zwięźle. Po krótkim wprowadzeniu w zagadnienie na stronie 10 postawiona jest teza a wcześniej cel pracy. Kolejne rozdziały (2-6) stanowią zasadniczą częścią rozprawy. Po każdym z rozdziałów Autor zamieszcza krótkie podsumowanie. Całość rozprawy kończy rozdział 7 (strony 102-104) i rozdziały pomocnicze takie jak streszczenie, bibliografia i wykaz osiągnięć.

Od strony redakcyjnej można mieć następujące zastrzeżenia:

- Autor stosuje nadmiernie rozbudowany spis treści (są zastosowane trzy poziomy) co skutkuje, że są wykazywane podrozdziały które zawierają jeden akapit złożony z 5-10 linijek tekstu.

- Prezentowane są nieczytelne zestawy małych wykresów (nie są widoczne opisy i jednostki osi) np. rys. 3.24 – składa się z 16 wykresów zamieszczonych na połowie strony A4,

- Są zamieszczane powtórzone obok siebie identyczne wykresy np. rys. 4.3 a i b. Czy dla czytelności nie należało zrezygnować z powtórzenia i wszystkie wykresy z rys. 4.3 umieścić bezpośrednio następujące po sobie?

- Atrakcyjne wizualnie rys.3.18, 3.19 zawierają nieczytelne zrzuty z ekranu.

- Zakończenie (Rozdział 7) w dużej mierze powiela informacje prezentowane we wstępie (str.10-11) opisujące zawartości kolejnych rozdziałów.

Praca generalnie napisana jest dobrym językiem i czyta się ją z dużą przyjemnością. Przedstawione dyskusje literatury i uzyskanych wyników są wyczerpujące i świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki rozprawy. Niewielka liczba potknięć nie wpływa na ogólną dobrą ocenę strony redakcyjnej rozprawy.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca ma duże znaczenie poznawcze i wdrożeniowe w obszarze technologii wytwarzania materiałów do druku 3D. Wykorzystując zgromadzoną wiedzę technologiczną i projektową opracowano autorską konstrukcję instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych. Prace eksperymentalne przedstawione w rozprawie potwierdzają, że zastosowane metody liniowych pomiarów wytwarzanego filamentu mogą być użytecznym narzędziem w dalszej perspektywie produkcyjnej.

7. 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

8. Podsumowanie

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Jakuba Aniulisa p.t.: "Opracowanie instalacji do wytwarzania materiałów aktywowanych chemicznie do zastosowań w technikach addytywnych" spełnia wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemów oparciu o pogłębioną wiedzę Autora w zakresie czujników, metod pomiarowych i elektronicznych układów pomiarowych dedykowanych technologii wytwarzania materiałów do zastosowań w technikach addytywnych. Stwierdzam, że rozprawa stanowi zbiór oryginalnych rozwiązań problemów naukowych i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i inżynierskiej a także potwierdza umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Autora. Tę opinię wspiera fakt posiadania bardzo dobrego dorobku publikacyjnego Autora. Przedstawione osiągnięcia rozprawy lokują ją w pełni w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Jakuba Aniulisa do publicznej obrony rozprawy.

