

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

Warszawa, 04.09.2023

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: „*Technologia i właściwości mikrosystemów wytwarzanych technikami druku 3D i 4D*”

Autor rozprawy: **mgr inż. Bartosz Kawa**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Politechnika Wroclawska z dnia 27.06.2023 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)?**

Autor jako zasadniczy cel badawczy pracy przyjął przeprowadzenie kompleksowych badań nad technologią strumieniowego druku 3D/4D i wykazaniu jej przydatności do budowy drukowanych mikrosystemów zawierających struktury mikromechaniczne. Cel ten zrealizowano poprzez opracowanie i przebadanie dwóch przykładowych drukowanych mikrosystemów wraz z wymaganymi do ich działania urządzeniami elektronicznymi i systemami pomiarowymi - miniaturowego przetwornika energii mechanicznej na elektryczną (ang. energy harvester) oraz mikro doniczki do badania wzrostu nasion w warunkach grawitacji ziemskiej oraz mikro grawitacji. Rozprawa ma więc charakter technologiczno-konstrukcyjny.

Mikrosystemy (Micro-Electro-Mechanical-Systems) jest to obszar intensywnej działalności badawczej i aplikacyjnej. Mikrosystemy są obecne właściwie w każdym urządzeniu elektronicznym jakie nas otacza lub z jakim mamy styczność na co dzień. Nieustany wzrost popytu na mikrosystemy jest generowany rosnącą potrzebą gromadzenia jak największej ilości informacji z każdego fragmentu procesu przemysłowego (Przemysł 4.0) lub naszego życia (Internet Rzeczy, IoT). Barię dalszego rozwoju jaką należy pokonać jest cena wytworzenia pojedynczego mikrosystemu. Dotychczas stosowane technologie subtraktywne lub transformacyjne nie rokują istotnego obniżenia kosztów produkcji w najbliższej przyszłości dlatego technologie addytywne, jakim jest poświęcona przedłożona do recenzji praca, są przedmiotem dużego zainteresowania rynku.

Rozprawa nie ma postawionej tezy, zawiera natomiast sformułowany w sposób ogólny cel prowadzonych prac, którym jest: przeprowadzenie kompleksowych badań nad technologią drukowanych strumieniowo 3D mikrosystemów zawierających struktury mikromechaniczne i wykazanie przydatności tej techniki przez wytworzenie i badanie właściwości przykładowych

RDN AEETK/144/2023

mikrosystemów wykonanych techniką strumieniowego druku 3D/4D. Przyjęty zakres prac jest obszerny i wielowątkowy. Autor wprowadza więc trzy cele pomocnicze którymi są:

- Optymalizacja parametrów strumieniowego druku 3D elementów mikromechanicznych jako elementów składowych mikrosystemów,
- Określenie właściwości mechanicznych drukowanych mikrostruktur, w różnych warunkach środowiskowych, tak aby możliwe było wykorzystanie tej wiedzy do opracowania struktur typu 4D
- Opracowanie i badania metodologii projektowania mikrosystemów z uwzględnieniem cech charakterystycznych techniki druku 3D i właściwości drukowanych mikrostruktur (druk 4D)
- Opracowanie i badania modelowych mikrosystemów wykonanych technikami druku 3D/4D oraz specjalistycznych układów elektronicznych, optoelektronicznych i narzędzi informatycznych współpracujących z opracowanymi drukowanymi mikrosystemami.

Rozpatrywane w rozprawie zagadnienia mieszczą się w głównym nurcie rozwoju technik wytwarzania mikrosystemów (metody addytywne, minimalizacja kosztu wytwarzania, wysoka precyzja i szybkość druku, stosowanie materiałów o różnych właściwościach bez ograniczeń na kształty), były i nadal są aktualne.

## **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 74 wybrane pozycje. Zdecydowana większość pozycji bibliografii została zaczerpnięta z najnowszej literatury światowej.

Dobór literatury jest prawidłowy. Cytowane pozycje świadczą o dobrej orientacji Autora w kierunkach prowadzonych nas świecie prac badawczych. Wyniki prac opisanych w literaturze zostały porównane na licznych rysunkach i w tabelach. Literatura została użyta w rozprawie 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?**

Przyjęty cel prac został zrealizowany poprzez przebadanie dostępnej technologii druku 3D/4D, w tym dobranie optymalnych ustawień drukarki dla poszczególnych materiałów. Następnie przy pomocy struktur testowych mikrobelek wyznaczano właściwości mechaniczne wydrukowanych materiałów konstrukcyjnych, które to wielkości były niezbędne do poprawnego zaprojektowania struktur mikromechanicznych. Autor przeprowadził prace symulacyjne opracowywanych struktur a następnie wykonał i przebadał dwie konstrukcje mikrosystemów (w kilku wariantach) - przetwornik energii mechanicznej na elektryczną i mikro doniczkę do zastosowań w technikach kosmicznych. Przyjęte w rozprawie założenia i metody są właściwe. Autor opisuje rozwiązane zagadnienia w zamieszczonych w rozprawie czterech artykułach naukowych, po dwa dla każdego z mikrosystemów.

Praca jest wielowątkowa i bardzo obszerna stąd pewne zagadnienia nie były opisywane bardzo szczegółowo. Mimo to warto by było szerzej przedstawić następujące problemy:



1. Autor w pracach dotyczących modelowania drgań przetwornika energii mechanicznej na elektryczną przedstawia tylko wartość częstotliwości drgań w modzie podstawowym. Zgadzam się, że praca przetwornika przy tej częstotliwości jest pożądana. W warunkach rzeczywistych mamy jednak do czynienia z szerokim spektrum częstotliwości drgań obiektu z którego chcemy pozyskać energię. W mojej ocenie brakuje wyznaczenia (modelowania) kolejnych modów drgań które to drgania najprawdopodobniej przy tak złożonej strukturze 3D mikrosystemu będą odbywały się nie tylko w osi prostopadłej do cewki odbiorczej. Jakie są częstotliwości charakterystyczne i amplitudy tych drgań? Jak te drgania w wielu płaszczyznach będą wpływały na uzyski energetyczne przetwornika?
2. Podstawą prac projektowych sprężyn mikrosystemów przetwornika energii jest znajomość rzeczywistych współczynników Younga stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Autor wyznaczą te wartości wykonując badania wytworzonych struktury testowych mikro belek. Jak należało się spodziewać wartości te różnią się od danych katalogowych podawanych przez producenta. Jakie były obserwowane rozrzuty wartości współczynników Younga w serii testowej? Jak ustawienia parametrów procesu drukowania wpływają na wartości współczynników Younga?
3. Przedstawiając wynik dotyczące mikro doniczki Autor zauważa, że długotrwały kontakt belek pomiarowych z wodą dostarczaną do kiełkującego nasiona zmienia parametry mechaniczne belek mikrosystemu (w konsekwencji wyniki pomiarów siły kiełkowania). Czy eksperymenty biologiczne odbywały się również przy zastosowaniu standardowych pożywek wodnych lub nasion otoczkowanych? Jeżeli tak lub jeżeli takie prace są planowane to wskazane byłoby przebadanie czy długotrwały kontakt mikro belek z pożywką w sposób istotny wpływa na zmianę ich sprężystości.
4. Układy elektroniczne / mechaniczne dopuszczone do lotów kosmicznych przechodzą wszechstronne badania kwalifikacyjne w tym testy odporności na długotrwałe przeciążenia. Czy Autor prowadził testy zmęczeniowe - wibracje rzędu 10g o losowo dobieieranym spektrum częstotliwości w zakresie do około 10kHz i badał wpływ przeciążeń na zmianę właściwości mechanicznych belki mikrosystemu doniczki?

Reasumując, uważam, że przedstawione przez Autora zagadnienia, dobierając odpowiednie narzędzia i metody badawcze, zostały w pełni rozwiązane a Doktorant wykazał szeroką wiedzę z obszaru zagadnień obejmujących problematykę technologii druku 3D/4D i konstrukcji mikrosystemów oraz konstrukcji układów 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 konstrukcje mikrosystemów i sposób ich wytworzenia za pomocą druk 3D/4D jest oryginalne. Do najważniejszych osiągnięć zaliczam:

- opracowanie technologii i konstrukcji wieloczęstotliwościowego przetwornika energii,
- opracowanie technologii i konstrukcji unikalnego mikrosystemu oraz układu pomiarowego mikro doniczki do badań w warunkach mikro grawitacji.



Warto również podkreślić, że prace Autora nie zakończyły się jedynie na badaniach laboratoryjnych. Mikrosystem drukowanej doniczki wraz ze specjalizowanym układem pomiarowym został zintegrowany i umieszczony jako ładunek nanosatelity Lab Sat, który w dniu 13 stycznia 2022 roku został wystrzelony w przestrzeń kosmiczną. Przeprowadzony na orbicie eksperyment biologiczny potwierdził prawidłowe działanie mikrosystemu. Z literatury nie są mi znane doniesienia o wykorzystaniu w przestrzeni kosmicznej podobnych konstrukcji do których wytworzenia zastosowano technologię druku.

Autor rozprawy, w dorobku który stal się podstawą przygotowania przedłożonej do oceny rozprawy, posiada cztery artykuły współautorskie wydane w bardzo dobrych międzynarodowych czasopismach z listy JCR:

1. B. Kawa, K. Śliwa; V.C. Lee, Q. Shi, R. Walczak, Inkjet 3D Printed MEMS Vibrational Electromagnetic Energy Harvester. *Energies*, 13, 2800, 2020.
2. B. Kawa, C. Lee, R. Walczak, Inkjet 3D Printed MEMS, Electromagnetic Multi-Frequency Energy Harvester. *Energies*, 15, 4468, 2022.
3. R. Walczak, B. Kawa, K. Adamski, Inkjet 3D printed microfluidic device for growing seed root and stalk mechanical characterization, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 297, 2019,
4. Kawa, B.; Śniadek, P.; Walczak, R.; Dziuban, J. Nanosatellite Payload for Research on Seed Germination in a 3D Printed Micropot. *Sensors*, 23, 1974, 2023.

W trzech z nich Autor występuje na pierwszym miejscu a w jednym na drugim. Na podstawie oświadczeń złożonych przez współautorów przedłożonych publikacji należy uznać udział Autora rozprawy w wymienionych pracach za kluczowy.

Na podkreślenie zasługuje też udział Autora rozprawy w projektach naukowych (OPUS, POIR) i popularyzacja wyników na 10 znaczących, międzynarodowych konferencjach naukowych (min. takich jak  $\mu$ TAS, Eurosensors, czy PowerMEMS).

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

Rozprawa przedstawiona jest na 120 stronach i jest napisana zwięźle. Składa się z dwóch zasadniczych części. Pierwszą z nich stanowi obszerne wprowadzenie w tematykę (40 stron). Następnie jest zamieszczony cel pracy. Drugą, zasadniczą częścią rozprawy, są przedruki opublikowanych czterech artykułów wraz z rozdziałem podsumowującym który zawiera wnioski i dyskusję (52 strony). Na końcu rozprawy zamieszczono bibliografię, spisy rysunków i oświadczenia współautorów publikacji.

Decydując się na taką formę rozprawy jakim jest zbiór artykułów Autor osiągnął zwięzłość pracy. Należy to uznać za właściwy wybór ze względu na obszerność i interdyscyplinarność tematyki. Autor w zamieszczonych czterech artykułach przekonująco przedstawił uzyskane przez siebie wyniki. Biorąc pod uwagę, że zamieszczone artykuły, zgodnie z wymogami redakcji, są pisane w układzie dwóch kolumn drobną czcionką wyniki stanowią zdecydowanie największą część rozprawy co nie jest bezpośrednio widoczne w spisie treści.

Przedstawione dyskusje literatury i uzyskanych wyników są wyczerpujące i świadczą o dobrej znajomości przez Autora problematyki rozprawy. Praca napisana jest dobrym językiem.

Niewielka liczba potknięć (np. powtórzenia pewnych fragmentów) nie wpływa na ogólną dobrą ocenę strony redakcyjnej rozprawy.

## 6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca ma znaczenie poznawcze w tematyce technologii wytwarzania mikrosystemów za pomocą druku 3D/4D z uwzględnieniem specyficznych wymagań wynikających z zastosowania tych konstrukcji w technologiach kosmicznych. Wykorzystując zgromadzoną wiedzę technologiczną i projektową opracowano autorskie konstrukcje mikrosystemów. Prace eksperymentalne przedstawione w rozprawie potwierdzają, że technologia druku może być użytecznym narzędziem badawczym a w dalszej perspektywie również produkcyjnym.

## 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. Bartosza Kawę p.t.: " Technologia i właściwości mikrosystemów wytwarzanych technikami druku 3D i 4D " spełnia wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemów oparciu o pogłębioną wiedzę Autora w zakresie konstrukcji mikrosystemów. 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 bardzo dobrego dorobku publikacyjnego Autora. Przedstawione osiągnięcia rozprawy lokują ją w pełni w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (wg. nowej klasyfikacji).

Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Bartosza Kawy do publicznej obrony rozprawy.

