

Gliwice, 4 IV 2023 r.

prof. dr hab. inż. Marian Kampik
Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice
tel. 32 237 1241
email: marian.kampik@polsl.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Soleckiego
pt. „Konstrukcja komparatora masy o rozdzielczości 10 ng
ze zmodyfikowanym elektromagnetycznym przetwornikiem siły”**

I. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na zlecenie Rektora Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, prof. dr. hab. Sławomira Bukowskiego (pismo PK-042/12/8-1/dr-r/2023 z dnia 2. lutego 2023 r.). Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. UTH.

Doktorant uzyskał tytuł magistra inżyniera w dniu 8 lipca 2009 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej (kierunek „Mechanika i budowa maszyn”, specjalność „Komputerowe wspomaganie projektowania i wytwarzania”)

Przebieg pracy naukowo-zawodowej Doktoranta jest następujący:

2019 - do dziś – menadżer produktu w firmie Radwag Wagi Elektroniczne,

2015 - 2019 – główny specjalista do spraw komparatorów masy w firmie Radwag Wagi Elektroniczne,

2011- 2015 – konstruktor w firmie Radwag Wagi Elektroniczne,

2010 - 2011 – operator maszyn CNC w firmie Precision Machine Parts Poland,

2017- 2022 – studia doktoranckie III stopnia, Dyscyplina naukowa „Budowa i eksploatacja Maszyn” na Uniwersytecie Technologiczno – Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

Z oświadczenia zamieszczonego na wstępie rozprawy wynika, że Doktorant nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

II. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Pomiary masy mają fundamentalne znaczenie dla rozwoju gospodarki, nauki, techniki i innych dziedzin ludzkiej działalności. W celu zapewnienia dużej dokładności tych pomiarów niezbędne jest bardzo dokładne odtworzenie jednostki masy przez wzorce pierwotne i zachowanie spójności pomiarowej między wzorcami pierwotnymi, wzorcami wtórnymi oraz narzędziami pomiarowymi służącymi do pomiaru i porównywania mas.

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień związanych z poprawą parametrów metrologicznych komparatora masy o rozdzielczości wyższej niż dotychczas spotykane rozwiązania. Komparator jest przeznaczony do wzorcowania wzorców masy w przedziale od 50 ng do 0,5 kg z dużą rozdzielczością, sięgającą 10 ng. Szczególnym obszarem zastosowań opracowanego urządzenia jest pomiar masy wzorców o masie mniejszej od 1 mg z niepewnością mniejszą od niepewności uzyskiwanej za pomocą komparatorów masy dostępnych na rynku. Wyższą rozdzielczość oraz dokładność urządzenia Doktorant uzyskał dzięki opracowaniu i zastosowaniu odpowiednich cewek siłownika komparatora, uszczelnieniu konstrukcji w celu zmniejszenia sorpcji wilgoci, oraz oryginalnej konstrukcji obwodu magnetycznego. Opracowany komparator umożliwia również automatyzację procesu komparacji, co jest istotne dla zwiększenia dokładności i powtarzalności wyników pomiaru.

Z zaprezentowanych w rozprawie wyników badań wynika, że opracowany i zbudowany przez Doktoranta prototyp komparatora umożliwia pomiar masy z rozdzielczością 10 ng, co jest osiągnięciem na skalę światową. Rozrzut wyników komparacji dla różnych wzorców masy charakteryzuje się odchyleniem standardowym z 6 cykli ABBA nie większym niż 50 ng, a niepewność pomiaru jest mniejsza o około 75% od niepewności uzyskiwanej za pomocą komparatora UMA-5 produkowanego przez firmę Radwag Wagi Elektroniczne z Radomia, za pomocą którego i jemu podobnych urządzeń, wzorcowano dotychczas, w kraju i na świecie, wzorce o masach od 0,05 do 500 mg. Powtarzalność pomiarów, wyznaczona stosowaną w przemyśle metodą EV (*equipment variation*) jest równa 0,115 µg, tj. o około 65% lepsza od powtarzalności pomiarów wspomnianym wyżej komparatorem UMA-5. Z przedstawionych w pracy wyników badań stabilności prototypu, realizowanych w ciągu 7 miesięcy w odstępach co 14 dni, można wywnioskować, iż rozrzut wyników pomiaru nie przekracza dopuszczalnej założonej niepewności (50 ng).

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty uważam, iż tematyka rozprawy jest aktualna i posiada istotne znaczenie z punktu widzenia naukowego, technicznego oraz ekonomicznego, gdyż dokładność wzorców masy posiada istotny wpływ na gospodarkę państwa.

Rozprawa posiada duży walor aplikacyjny, czego dowodem jest to, iż opisany w niej komparator został włączony do oferty komercyjnej firmy Radwag.

III. Przegląd i ocena treści rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska, o objętości 175 stron, zawiera w kolejności: spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz najważniejszych oznaczeń, wprowadzenie, przegląd stanu wiedzy, dwa zasadnicze rozdziały, podsumowanie i wnioski, kierunki dalszych prac, bibliografię zawierającą 115 prawidłowo dobranych pozycji literaturowych i linków internetowych, wykaz dorobku

naukowego, wykaz rysunków, spis tabel oraz załączniki.

We wprowadzeniu Autor przedstawia zagadnienia związane z pomiarem masy, zawarte w źródłach historycznych, a następnie wykazuje, że o jakości nowoczesnych wag i komparatorów masy decyduje ich zdolność do dokładnych pomiarów wzorców o masie mniejszej od 1 mg. Na końcu tego rozdziału Doktorant prezentuje cel i zakres pracy.

W pierwszym podrozdziale rozdziału drugiego Doktorant omówił podstawowe pojęcia związane z pomiarem masy, m.in. równanie pomiaru masy, główne parametry wag oraz spójność pomiarową. W drugim podrozdziale Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące niepewności wyniku wzorcowania wzorców masy: m.in. omówił standardową niepewność typu A procesu ważenia, składową niepewności związaną ze wzorcem referencyjnym, składową związaną z wyporem powietrza, składową związaną z komparatorem masy, całkowitą niepewność standardową komparatora masy oraz rozszerzoną niepewność masy konwencjonalnej wzorca badanego. W kolejnym podrozdziale przedstawione zostały systemy pomiarowe wag elektronicznych: tensometryczny, magnetoelektryczny i wibracyjny z przetwornikiem piezoelektrycznym. Na końcu omówione zostały systemy z ograniczonym zakresem równoważenia oraz równoważeniem w całym zakresie pomiarowym. W kolejnym podrozdziale najpierw opisane zostały wzorce masy (w tym narodowy wzorzec kilograma), a następnie dokonano przeglądu komparatorów masy: manualnych, automatycznych, robotycznych i próżniowych, służących do wyznaczania gęstości i objętości ciał stałych oraz podatności magnetycznej wzorców masy. Na końcu drugiego podrozdziału Autor przedstawił urządzenie, któremu przeznaczono do odegrania bardzo ważną rolę we współczesnym układzie SI: wagę prądową Watta-Kibble'a.

W trzecim, zasadniczym rozdziale Doktorant zaprezentował konstrukcję komparatora masy o rozdzielczości 10 ng, przedstawił sposób, w jaki optymalizował elementy składowe jego mechanizmu oraz opisał konstrukcję cewki i siłownika magnetoelektrycznego.

W pierwszym podrozdziale rozdziału czwartego Autor zamieszcza wyniki badań parametrów metrologicznych komparatora, w tym rozrzut wyników pomiaru w postaci odchyień standardowych wyników uzyskanych dla mas o wartościach 2; 1; 0,5; 0,2 oraz 0,1 mg. Następnie Doktorant przedstawia analizę niepewności i obliczenie powtarzalności uzyskanych wyników metodą EV. W drugim podrozdziale Autor prezentuje porównanie wyników pomiaru, uzyskanych przy wykorzystaniu komparatora NANO.AK-4/500, względem wyników pomiaru uzyskanych przy wykorzystaniu komparatora UMA-5. Porównania dokonano dla mas o wartościach 2; 1; 0,5; 0,2 oraz 0,1 mg. W trzecim podrozdziale Doktorant przedstawia wyniki badań stabilności wyników pomiaru uzyskanych za pomocą opracowanego przez siebie urządzenia.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie i wnioski, natomiast w rozdziale szóstym Doktorant przedstawił kierunki dalszych prac.

Oceniając merytorycznie całą rozprawę stwierdzam, iż jest ona napisana na dobrym poziomie. Zawiera właściwie sformułowany i ważny problem naukowo-techniczny i prezentuje jego poprawne rozwiązanie, które Doktorant uzyskał samodzielnie i z zastosowaniem poprawnej metodologii naukowej.

Z przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej wynika, że jej Autor wykazał się dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania.

IV. Oryginalne osiągnięcia

Do oryginalnych osiągnięć naukowych i technicznych Autora rozprawy zaliczam przede wszystkim:

1. Opracowanie i zbadanie mechanizmu do komparacji wzorców masy z bardzo dużą rozdzielczością (10 ng).
2. Zmniejszenie błędu niecentryczności przez opracowanie systemu robotycznego z wiszącą szalką samocentrującą.
3. Zwiększenie powtarzalności wyników pomiaru przez opracowany system robotyczny, posiadający zalety komparatora automatycznego i robotycznego.
4. Wykonanie dużej liczby badań, w tym porównawczych, właściwości metrologicznych komparatorów manualnych, automatycznych oraz robotycznych.
5. Opracowanie i zbadanie nowego typu siłownika, wykonanego ze stali ARMCO, umożliwiającego uzyskanie lepszych parametrów mikrowag i ultra-mikrowag produkowanych seryjnie.
6. Opracowanie urządzenia, które umożliwić będzie w przyszłości realizowanie oraz utrzymanie wzorców o małej masie, np. 1 g (tzw. „mała waga Watta-Kibble’a”).

Na ponowne podkreślenie zasługuje fakt, że właściwości opracowanego przez Doktoranta komparatora okazały się na tyle dobre, iż został on wdrożony do produkcji przez firmę Radwag Wagi Elektroniczne z Radomia.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe i techniczne uważam, że Doktorant zrealizował założony cel badawczy oraz uzasadnił słuszność sformułowanych tez. Ponadto wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na poziomie naukowym odpowiadającym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim z obszaru nauk technicznych.

V. Uwagi i komentarze

Zachowując dobrą ocenę całej rozprawy doktorskiej można sformułować następujące uwagi natury ogólnej i szczegółowej:

1. Przedstawiony w rozprawie komparator, który ma służyć do wzorcowania wzorców masy poniżej 1 mg, charakteryzuje się zakresem aż 500 mg. Dlaczego urządzenie ma aż tak duży maksymalny zakres pomiarowy? Czy komparator o mniejszym maksymalnym zakresie nie zapewniłby mniejszej niepewności pomiaru?
2. W rozdziale trzecim powinno być zawartych więcej informacji związanych z konstrukcją, technologią i optymalizacją prototypu komparatora. Czyżby – wobec wdrożenia urządzenia do produkcji – Autor został zobowiązany do niepublikowania pewnych informacji rozprawie?
3. W jaki sposób nowy komparator wpisze się w metrologię masy po redefinicji kilograma, a zwłaszcza po zastosowaniu wag Watta-Kibble’a?

4. Na stronie 37. rozprawy jej Autor określa błąd systematyczny jako rodzaj błędu, który „zmienia się stale lub/i w sposób przewidywalny”. Czy błąd systematyczny może być niezmienny? Jeśli tak, to w jaki sposób można go wykryć?
5. Na str. 39. Doktorant definiuje pojęcie „dysyminacji” jako „podziału wzorca”. Proszę o wyjaśnienie co Autor rozumie przez „podział wzorca”.
6. Na str. 43. Autor pisze „Przy małej liczbie cykli pomiarowych oszacowanie wartości odchylenia standardowego może być obarczone dużym błędem. Z tego powodu dla dokładniejszej klasy wzorca, który jest wyznaczany, liczba cykli pomiarowych powinna być większa, np. dla klasy E1 powinno być minimum 5 cykli.” Czy przy tak małej liczbie cykli nie należało by zastosować rozkładu Studenta w celu lepszego estymowania niepewności pomiaru?
7. Na str. 46. Autor podaje ciśnienie 101325 Pa. Czy utrzymanie tej wartości z tak dużą precyzją ma sens wobec współwystępujących w równaniu (21) wartości wilgotności względnej powietrza oraz temperatury, podanych z zaledwie dwucyfrową rozdzielczością?
8. Czy zależność (22) jest czułością (jak podaje Doktorant), czy też jej niepewnością?
9. Na stronie 46. w opisie zmiennych występujących w równaniu (22) widnieje następujący zapis:
„ m_s - masa wzorca w wyniku zmian czułości.”
Czy Autorowi rzeczywiście chodzi o zmianę masy, czy też o zmianę wyniku jej pomiaru?
10. Co reprezentuje współczynnik $\sqrt{2}$ w równaniu (23)?
11. Z czego wynika zależność (24)?
12. Na str. 76. Autor pisze „gdzie f_1 i f_2 , to częstotliwości mierzone na złączach Josephsona odpowiednio w statystycznym i dynamicznym trybie pracy wagi.” Czy te częstotliwości rzeczywiście są mierzone na złączach Josephsona?
13. W rozdziale 3.2 Doktorant opisuje modernizację dźwigni przełożenia, polegającą na zmniejszeniu wpływu chłonności wilgoci przez ten element. Proszę o opisanie szczegółów tej technologii (sposobu polerowania, jaki uzyskano współczynnik chropowatości itp.).

W pracy zauważyłem sporo drobnych błędów o charakterze edytorskim: tzw. literówek, niewłaściwie ponumerowanych niektórych rysunków, braku „ogonków” w polskich znakach diakrytycznych, jednej błędnie wydrukowanej strony itp. Doktorant używa również niekiedy niepoprawnych sformułowań, jak np. na str. 18, gdzie pisze o „zjawisku działania wag elektronicznych”, lub na następnej stronie, gdzie wzmiankuje o „niesamowitej dokładności”. Symbole wymiarów jednostek fizycznych nie powinny być umieszczane w nawiasach kwadratowych. Poza tym rozprawa jest starannie opracowana pod względem redakcyjnym i napisana poprawną polszczyzną.

Uwagi wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

VI. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowo-technicznego. Zaprezentowane w niej wyniki badań potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna oraz umiejętności w zakresie projektowania mechanicznych układów pomiarowych o dużej dokładności, szacowania niepewności pomiaru i realizacji badań eksperymentalnych. Autor rozprawy wykazał się również wiedzą i doświadczeniem w zakresie wykorzystania współczesnych technik pomiarowych, potwierdzając umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych na poziomie naukowym odpowiadającym rozprawom doktorskim z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych. Oceny tej nie podważają przedstawione uwagi i komentarze.

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że:

- 1. Opiniowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**
- 2. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

