

dr hab. inż. Jarosław Molenda
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut
Technologii Eksploatacji
26-600 Radom, ul. Pułaskiego 6/10

RECENZJA

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

promotor pracy: dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. UTH

1. Podstawa formalna wykonania recenzji

Pismo rektora Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu nr PK-042/14/8-3/dr-r/2023 z dn. 2 lutego 2023 r., w związku z Uchwałą Senatu uczelni nr 000-1/4/2023, zawierające prośbę o wykonanie recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Michała Soleckiego.

2. Ocena struktury pracy doktorskiej oraz sposobu edycji

Przedłożona do recenzji praca doktorska liczy 124 strony oraz 50 stron załączników, zawierających: wykaz dorobku naukowego doktoranta (5 publikacji oraz 5 wystąpień seminaryjnych/konferencyjnych), wykaz rysunków, spis tabel oraz wyników wskazań komparatora masy i odchyłeń standardowych zarejestrowanych wyników pomiarów. Zasadnicza część pracy składa się z sześciu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu najważniejszych oznaczeń oraz spisu bibliografii.

Przyjęta struktura pracy jest poprawna i zawiera wszystkie istotne elementy rozprawy doktorskiej. Przegląd stanu wiedzy stanowi rozdział 2, obejmujący 54 strony. Opisowi prac konstrukcyjno-badawczych poświęcono dwa rozdziały, tj. rozdział 3 („Konstrukcja komparatora masy o ulepszonej rozdzielczości 10 nanogram”) i rozdział 4 („Wyniki badań parametrów metrologicznych komparatora”), które łącznie zajmują 35 stron. Czytelność materiału byłaby zapewne większa, gdyby jeden z rozdziałów dotyczył wyłącznie metodyki pracy, zarówno w obszarze konstrukcyjnym, jak i metrologicznym. Poszczególne opisy metodyczne znajdują się jednak w rozdziałach, poświęconych pracom doświadczalnym. Zidentyfikowano jedynie drobne nieścisłości w numeracji podrozdziałów (jest podrozdział 4.2, a powinien być 4.2.5). Występują także pewne rozbieżności pomiędzy oznaczeniami, przyjętymi w „wykazie najważniejszych oznaczeń” (str. 12) a stosowanymi w tekście głównym i/lub opisach osi na wykresach (przykładowo, w wykazie najważniejszych oznaczeń symbol „L” zdefiniowano jako długość drutu cewki, a na rys. 21 oś rzędnych wykresu, opisana tym symbolem, oznacza obciążenie).

W pracy zamieszczono 63 rysunki i 30 tabel. Numeracja od rysunku 40 jest niewłaściwa, tzn. podpisy rysunków są o jeden zawyżone w porównaniu z przywoływanymi w tekście. Zdarza się także brak przywołania w tekście zamieszczonego rysunku (np. rys. 16 na str. 51) lub tabeli (np. tabela 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28). Niektóre wykresy nie posiadają opisów osi (np. rys. 10 na str. 31, rys. 52 na str. 94), a część tabel – wiersza nagłówkowego, właściwie definiującego zamieszczane dane (np. w tabeli 23 liczbie porządkowej „Lp” przypisano jednostkę [μg], natomiast w tabeli 26 brak nagłówka pierwszej kolumny). Nie

wszystkie tytuły tabel są adekwatne do ich zawartości, np. w tabeli 5 zatytułowanej „Skład chemiczny stali ARMCO 2” brakuje danych, dotyczących udziału procentowego głównego składnika, czyli żelaza. Poprawny tytuł mógłby więc brzmieć: „Udział procentowy pierwiastków domieszkowych w materiale ARMCO 2”. W wielu przypadkach dane są powielane w tabelach i na wykresach, co nie powinno mieć miejsca w opracowaniach naukowych (np. tabela 14 i rys. 55, tabela 15 i rys. 56, tabela 16 i rys. 57; ponadto tabele 20, 22, 24, 26, 28 i odpowiednio rysunki 58-62).

Wykaz bibliografii obejmuje 115 pozycji. Jeden materiał źródłowy wymieniono w wykazie trzykrotnie (pozycje 100, 101 i 102). Nie wszystkie pozycje literaturowe zostały przywołane w tekście pracy (np. pozycje 81, 83, 94, 105, 112). Warto zaznaczyć, iż Doktorant zacytował stosunkowo nowe doniesienia literaturowe (około 60% z nich opublikowano w ostatnich dziesięciu latach). W tekście nie jest przywoływana pozycja z wykazu bibliograficznego, lecz nazwisko pierwszego autora i rok publikacji. Taki sposób cytowania jest właściwy, pod warunkiem możliwości jednoznacznego zidentyfikowania różnych publikacji tego samego autora wiodącego, wydanych w tym samym roku (pozycje bibliograficzne nr 73 i 75 oraz 106 i 107 nie spełniają tego wymogu).

W recenzowanej pracy znajdują się nieprecyzyjne sformułowania, nieprzystające do rangi opracowania naukowego, zwłaszcza metrologicznego, w szczególności: „niesamowita dokładność” (str. 19, wiersz 2 od góry), „bardzo duża rozdzielczość” (str. 25, wiersz 11 od góry), „lepsze właściwości” (str. 55, wiersz 9 od dołu), „poprawiono powtarzalność” (str. 103, wiersz 2 od dołu), „niezbyt wysoka odporność na korozję” (str. 81, wiersz 4 od dołu). Zdarzają się również literówki i błędy interpunkcyjne (np. str. 41 wiersz 3 od dołu powinno być „optymalizację”, str. 45 wiersz 4 od dołu powinno być „skali”, str. 82 wiersz 8 od dołu powinno być „chłonięcie”), spójniki i przyimki na końcu wierszy, a także kropki na końcu tytułu pracy i tytułów tabel (np. tabela 1, 5, 6, 16) oraz rysunków (np. rysunek 7, 8, 9 10, 11, 13). Ogólny poziom edycyjny pracy oceniam jako dobry.

3. Ocena wyboru tematyki pracy, analizy stanu wiedzy, postawionego celu oraz hipotezy badawczej

Tematyka pracy, dotycząca opracowania komparatora masy o rozdzielczości 10 ng, przeznaczonego do wzorcowania odważników (wzorców masy) o masie poniżej 1 mg, jest nowatorska. Zagadnienia metrologii wagi są kluczowe w wielu obszarach nauki, przemysłu i handlu, dlatego też wybór tematu jest trafny, zwłaszcza w kontekście zainteresowań zawodowych Doktoranta. Rozwiązanie problemów technicznych, dotyczących wzorcowania wzorców masy z wysoką rozdzielczością, stanowi znaczący postęp w dostępności wysokiej klasy aparatury metrologicznej. We wprowadzeniu zabrakło jednak genezy podjętego tematu, która wskazywałaby na potrzebę wzorcowania z proponowaną rozdzielczością. Zamiast tego zamieszczono popularno-naukowe informacje, zaczerpnięte ze źródeł internetowych, dotyczące np. sposobów wagi w starożytności oraz historycznie wykorzystywanych wagach (waga rzymska, waga sprężynowa, waga prostodźwigniowa). Jedyne podkreślono w pracy, iż dotychczas nie są dostępne urządzenia o nanogramowej rozdzielczości pomiarowej, co wynika z przeglądu oferty handlowej kluczowych firm, produkujących wagi i komparatory masy, zamieszczonego w rozdziale 2.5.2. Brak krytycznego odniesienia do zagadnień konstrukcji współczesnych wag/komparatorów uniemożliwia jednak obiektywne spojrzenie na problemy ograniczeń w osiągnięciu wysokiej rozdzielczości oraz możliwości ich rozwiązania.

W mojej opinii stosowanie nanometrycznej rozdzielczości pomiarowej ma sens w przypadku wzorcowania odważników mikrogramowych, a nie miligramowych. Wzorcowanie odważnika miligramowego, jak to zaproponował Doktorant w swej pracy, z rozdzielczością nanogramową wydaje się nadmiarowe. Nasuwa się więc pytanie czy są lub

będą w najbliższej przyszłości dostępne wzorce masy o takich charakterystykach metrologicznych, aby można było je wykorzystać podczas weryfikacji prawidłowości wskazań nowo opracowanego komparatora masy. Sam Doktorant w rozdziale 1.3 „Cel i zakres pracy” na str. 21 stwierdza, że aktualnie dostępne są wzorce o masie nie niższej niż 1 mg, a pojawiające się wzorce o masie 0,05 mg mają wyznaczaną niepewność przy użyciu urządzeń o działce odczytowej 0,01 μ g. Nie ma mowy o wzorcach mikrogramowych. Doktorant stosował w swojej pracy wzorce o minimalnej masie 0,1 mg, których masa jest dwukrotnie wyższa niż deklarowany dolny zakres pomiarowy nowo opracowanego komparatora, czyli 0,05 mg. Nie można w tym przypadku zweryfikować wskazań w newralgicznym punkcie pomiarowym, tj. na końcu deklarowanego przedziału obciążania komparatora.

Autor rozprawy, w przywołanym wyżej rozdziale 1.3, określił cel poznawczy i użyteczny jako: „*Opracowanie innowacyjnego komparatora o rozdzielczości 10 ng, większej niż dotychczas osiągnięte w metrologii masy, który będzie służył do wzorcowania wzorców masy poniżej 1 mg z mniejszą niepewnością niż dotychczas stosowane urządzenia.* Doktorant sformułował także tezę naukową o następującym brzmieniu: „*Odpowiednia modyfikacja cewki siłownika komparatora oraz jej uszczelnienie w celu zmniejszenia sorpcji wilgoci, jak również zastosowanie nowatorskiej konstrukcji obwodu magnetycznego z materiału ARMCO, pozwoli na redukcję błędów pomiaru masy, a tym samym na znaczne zwiększenie dokładności komparatora*”. Tak sformułowana teza definiuje przede wszystkim problem konstrukcyjny, a problem naukowy jest w niej jedynie zarysowany w postaci stwierdzenia o planowanej redukcji błędów pomiarowych. Jednak po zapoznaniu się z całą pracą doktorską można znaleźć wyniki prac eksperymentalnych, pozwalające na zakwalifikowanie ich jako nowa wiedza. Niemniej, niezbędne jest uwypuklenie podczas obrony pracy problemów naukowo-badawczych, rozwiązywanych podczas realizacji prac empirycznych i scharakteryzowanie ich jako wpływu konkretnego czynnika (opisywanego przez odpowiednio dobraną wielkość fizyczną) na parametry metrologiczne nowo opracowanego urządzenia. Badania takie powinny poprzedzać prace konstrukcyjne, ponieważ dopiero wnioski, wyciągnięte z badań eksperymentalnych, stanowią podstawę wyboru materiału konstrukcyjnego, sposobu uszczelnienia cewki oraz określenia zakresu modyfikacji obwodu magnetycznego.

W związku z powyższym, celowe jest odniesienie się przez Doktoranta podczas obrony pracy do następujących kwestii:

- **przedstawienie genezy tematu, np. na podstawie określenia zapotrzebowania rynkowego na komparatory masy do wzorcowania z rozdzielczością 10 ng, z podaniem obszarów nauki, przemysłu, handlu lub konkretnych aplikacji,**
- **określenie kontekstu wyboru zakresu obciążania komparatora masy od 0,05 mg do 500 mg,**
- **wskazanie efektów naukowych pracy doktorskiej.**

4. Ocena przyjętej metodyki i planu pracy

Doktorant poprawnie zidentyfikował problemy konstrukcyjne, które należy rozwiązać, w celu uzyskania zakładanych parametrów metrologicznych komparatora. Prawidłowo zostały także zaplanowane prace badawcze, weryfikujące efekty modyfikacji kluczowych elementów konstrukcyjnych nowo opracowanego urządzenia pomiarowego. Opisy metodyczne znajdują się w różnych rozdziałach pracy, dotyczących określonych działań, związanych z opracowaniem konstrukcji komparatora oraz oceny jego parametrów metrologicznych. Ujęcie tych zagadnień w sposób zwarty, w jednym rozdziale, zwiększyłoby przejrzystość planu pracy. Pewne niedoskonałości metodyczne wynikają najprawdopodobniej

z przyjętego założenia o braku konieczności prezentowania informacji, które są oczywiste dla Doktoranta i wynikają z jego wieloletniego doświadczenia w zakresie konstrukcji wag.

Wielokrotnie w rozdziałach, dotyczących prac badawczo-rozwojowych, stosowany jest niepoprawnie termin „optymalizacja”, bez zdefiniowania jej kryteriów jakościowo-ilościowych. Nawet w najprostszym, potocznym ujęciu, termin „optymalizacja” oznacza wybór najlepszego rozwiązania spośród kilku innych, na podstawie przyjętych wcześniej kryteriów. Przykładowo, w rozdziale 3.2, zatytułowanym „Optymalizacja części mechanizmu komparatora”, zostały poruszone zagadnienia konstrukcyjne, istotne przy dokładnym ważeniu, np. bezwładność mechanizmu ważenia. Wybór materiału konstrukcyjnego (stopu aluminium PA9), stosowanego w pracy, nie jest jednak uzasadniony wynikami badań doświadczalnych lub literaturowych. Innym przykładem jest brak metodyki i wyników badań, będących podstawą wyboru „optymalnych” wymiarów przewężenia zawieszki, zapewniających odpowiednią jej sztywność. Ograniczono się jedynie do zamieszczenia w rozdziale 3.2 informacji, iż istotnym problemem jest sztywność zawieszek (elementów sprężystych), a następnie wskazania, iż po wielu badaniach udało się dobrać odpowiednią sztywność i wymiary przewężenia zawieszki. Nie jest więc jasne czy te badania były przedmiotem prac w ramach realizacji doktoratu, czy też stanowiły wyniki wcześniejszych eksperymentów, które nie zostały jednak opisane w części pracy, poświęconej analizie stanu wiedzy. Podobne podejście zastosowano podczas „optymalizacji” dźwigni przełożenia, bez podania kryterium oraz charakterystyki i oceny innych rozwiązań poza tym, które zastosowano w opracowanym komparatorze. Na str. 83 (tego samego rozdziału) znajduje się jedynie informacja o następującej treści: *„optymalizacja dźwigni komparatora polegała na dobraniu odpowiedniego przełożenia, wypolerowaniu jej powierzchni, zmniejszeniu masy bez utraty sztywności, jak również zaprojektowaniu w taki sposób, aby dało się ją wytworzyć monolitycznie bez wykonania połączeń śrubowych i klejonych.”* W tabeli 4 przedstawiono wartości liczbowe, które są opisane jako „Wyniki wpływu zmian wilgoci na dźwignię mechanizmu”. W tabeli zamieszczono 5 wyników pomiarów „zmian zera” dla dwóch różnych mechanizmów dźwigni wraz ze średnią arytmetyczną z tych wartości bez powiązania ich z wilgotnością. Przed tabelą opisano warunki realizacji pomiaru, z których wynika, że wilgotność początkowa wynosiła 52%, a końcowa – 62%, przy czasie trwania testu 20 godzin. Taka prezentacja metodyki nie daje jednoznacznej informacji o sposobie odczytu wyników, w szczególności o przyroście wilgotności w czasie, sposobie jej stabilizacji i kontroli (np. w komorze klimatycznej). Nie sprecyzowano również kryteriów oceny zamieszczonych wyników. Trudno więc stwierdzić czy „zmiana zera” o 5,1324 mg przy stosowaniu dźwigni monolitycznej jest dopuszczalna, czy też nie, w porównaniu z 21,1216 mg dla dźwigni skręcanej, zwłaszcza, że deklarowana rozdzielczość nowo zaprojektowanego urządzenia wynosi 10 ng. Doktorant arbitralnie stwierdza: *„W ten sposób została potwierdzona słuszność obranego kierunku optymalizacji elementów komparatora”*.

Niejasności w zakresie metodyki badawczej dotyczą także wyboru obiektów oraz sposobu prowadzenia badań cewki. W rozdziale 3.3 („Budowa cewki i siłownika magnetoelektrycznego”) na str. 84 znajduje się informacja, iż *„dla budowanego urządzenia zaprojektowana została specjalna cewka, oznaczona symbolem S10, której schemat pokazano na rysunku 48”*. Nie opisano jednak założeń konstrukcyjnych, które stały u podstaw jej zaprojektowania, a także nie podano dlaczego porównywano następnie cewkę S10 z inną cewką oznaczoną jako S20, która została scharakteryzowana wyłącznie wymiarami na rysunku 49 (poprawnym numerem rysunku powinien być 48) i posiada pierścień uszczelniający, o którym nie było wcześniej mowy. W pracy przedstawiono wyniki badania chłonności wilgoci przez różne rodzaje cewek, tj. S10 w dwóch wariantach (chronionej i niechronionej przez pierścień uszczelniający) i S20 tylko w jednym wariantcie (tj. chronionej pierścieniem uszczelniającym). Nie określono jednak kryterium akceptowalności

poziomu chłonności wilgoci przez zmodyfikowaną cewkę, tym samym nie jest jasne czy średni poziom 0,0565 mg (czyli 56500 ng) podany w tabeli 9 dla cewki S10 z pierścieniem uszczelniającym jest wystarczająco niski w projektowanym rozwiązaniu technicznym, które ma charakteryzować się rozdzielczością 10 ng. Nie jest także jasne dlaczego zmniejszono wymiary cewki S10 w porównaniu z S20 do przedstawionych w pracy wymiarów. **Kwestia przyjętych kryteriów „optymalizacji poszczególnych elementów konstrukcyjnych komparatora” powinna zostać wyjaśniona podczas obrony pracy.**

Cel pracy zakłada, iż opracowany komparator będzie służył do wzorcowania wzorców masy poniżej 1 mg. W tym kontekście nie jest więc zrozumiałe konstruowanie komparatora o zakresie obciążania do 500 mg, a więc znacznie przewymiarowanego względem planowanej aplikacji. Ponadto, komparator ma służyć do wzorcowania w przedziale od 0,05 mg do 500 mg, a do badania rozrzutu wskazań komparatora stosowano wzorce referencyjne o masie 2 mg, 1 mg, 0,5 mg, 0,2 mg oraz 0,1 mg (tabela 11). Trudno zatem uzasadnić taki wybór odważników wzorcowych (brak wzorców masy, odpowiadających krańcowym wartościom zakładanego przedziału obciążania), a także wykorzystanie wzorca o masie 2 mg dla komparatora o planowanym zakresie wzorcowania poniżej 1 mg. **Wymienione aspekty przyjętej metodyki weryfikacji parametrów metrologicznych nowego komparatora powinny zostać wyjaśnione podczas obrony pracy.**

5. Ocena opisu merytorycznego zrealizowanych prac oraz formułowanych wniosków

W pracy prawidłowo opisano podjęte działania projektowo-konstrukcyjne, które w założeniu mają pozytywnie wpłynąć na parametry metrologiczne opracowywanego komparatora masy. W szczególności scharakteryzowano modyfikacje mechanizmu ważącego (zawieszki, szalka, dźwignia przełożenia), a także układu elektromagnetycznego (cewka, siłownik magnetoelektryczny). Wraz z opisem efektów prac konstrukcyjnych przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych, prezentujące wpływ zastosowanych modyfikacji np. na chłonność wilgoci, a w konsekwencji na błędy pomiarowe. Pewnym mankamentem jest sposób przedstawienia wyników prac badawczych. Połączenie opisów przeprowadzonych eksperymentów i efektów prac konstrukcyjnych powoduje, iż część badawcza jest nieco rozmyta, a główny nacisk jest położony na prace konstrukcyjne. Pewne wątpliwości budzi także sposób prezentowania niektórych wyników badań, np. na rys. 52 (poprawny numer rysunku przywołany w tekście na str. 90 to 51). Zamieszczono pod nim podpis o treści: *„Zarejestrowana temperatura, wilgotność i ciśnienie atmosferyczne podczas typowego cyklu kalibracji, powtórzonego 10 razy”*, a na rysunku widnieją ciągle wykresy „zależności” temperatury, wilgotności, lub ciśnienia atmosferycznego (osie rzędnych odpowiednich wykresów) od numeru powtórzenia (oś odciętych). Taki sposób prezentacji wskazuje, iż na wartość parametrów środowiskowych ma wpływ kolejny pomiar (nawet nie liczba pomiarów). Wykresy te nie powinny być prezentowane jako linie ciągłe, tylko histogramy, pokazujące wartość danego parametru podczas wykonywania kolejnego cyklu kalibracji. Poza tym omówienie tych wyników ogranicza się do wskazania procentowej różnicy wartości parametrów środowiskowych pomiędzy ostatnim a pierwszym powtórzeniem. **Konieczne jest wyjaśnienie podczas obrony pracy celowości przeprowadzenia monitoringu warunków środowiska, których wyniki przedstawiono na rys. 52 i sposobu wykorzystania zarejestrowanych wyników w pracach konstrukcyjno-eksperymentalnych, a także odniesienie się do stosunkowo mało przejrzystego podsumowania rozdziału, zawartego w ostatnim akapicie na str. 91, o treści: *„Ponieważ wzrost wilgotności względnej z 50% do 70% po 23 godzinach stabilizacji spowodował wzrost masy odpowiednio o 57 µg i 149 µg dla zabezpieczonych cewek S10 i S20, można przyjąć, że wpływ zmiany wilgotności o 0,12% w ciągu kilkunastu minut jest znikomy. W trakcie pracy komparatora zmienność masy spowodowana tą niewielką wartością przesunięcia wilgotności można traktować jako***

składową zmienności urządzenia EV”. Podsumowanie to odnosi się jedynie do wilgotności otoczenia, a nie podejmowana jest kwestia pozostałych monitorowanych parametrów środowiskowych, tj. ciśnienia i temperatury. Doktorant w swojej pracy przedstawia także wyniki badań eksperymentalnych, które miały na celu zweryfikowanie parametrów metrologicznych nowo zbudowanego komparatora NANO.AK-4/500 i porównanie ich z najlepszym pod względem rozdzielczości pomiarowej, dostępnym komercyjnie, komparatorem firmy Radwag (typ UMA-5). Niemniej opisy wyników badań parametrów metrologicznych nowego komparatora (zamieszczonych w rozdziale 4 pracy pt.: „Wyniki badań parametrów metrologicznych komparatora”), są stosunkowo lakoniczne i sprowadzają się np. do informacji, że rozrzuty, opisywane odchyleniem standardowym pomiarów dokonanych za pomocą nowego komparatora, są mniejsze (np. 3-4 krotnie) od rozrzutów wyników zarejestrowanych za pomocą komparatora odniesienia, który był urządzeniem gorszej rozdzielczości. Istotnym elementem przeprowadzonych badań weryfikacyjnych (badania periodyczne, prowadzone na przestrzeni 30 tygodni) jest długoterminowa ocena stabilności wskazań komparatora. Zestawienie i omówienie tych wyników na podstawie średniej różnicy wskazań znajduje się w rozdziale 4.3 „Badanie stabilności”. W rozdziale tym na rys. 63 prezentowany jest wykres punktowy średniej różnicy wskazań, zarejestrowanej w określonym czasie. Wyniki te uzupełnione są słupkami błędów. Nie wskazano jednoznacznie w opisie metodycznym, na wstępie tego rozdziału, jakim parametrem są opisywane błędy uzyskiwanych pomiarów. Można jednak przyjąć na podstawie analizy danych z załącznika 11 do pracy doktorskiej, że jest to odchylenie standardowe. Zauważalna jest jednak różnica pomiędzy danymi z załącznika 1, a załącznika 11. W przypadku danych z załącznika 1 wartość średniej różnicy wskazań kształtuje się na poziomie $-0,000009828$ g, natomiast z załącznika 11 – na poziomie $-0,000005425$ g. Wydaje się, iż obciążanie komparatora masą 2 mg powinno dawać podobne wartości średnich różnic wskazań, bez względu na cel wykonanych pomiarów. Być może różnice te wynikają z zastosowania różnych wzorców masy, jednak to zagadnienie spójności pomiarowej nie jest opisane w pracy. **Niezbędne jest więc wyjaśnienie podczas obrony pracy zarejestrowanych różnic w wynikach tych pomiarów.** Ocena stabilności wskazań komparatora została zaprezentowana na przykładzie pomiarów wzorca o masie 2 mg (rys. 63). Bardziej interesującym przykładem byłaby jednak analiza stabilności pomiarów masy 1 mg, czyli dla górnego zakresu obciążania komparatora, zdefiniowanego w celu pracy.

W pracy sporadycznie stosowane są inne jednostki miar niż wymaga tego system SI (np. mbar – piąty wiersz od dołu na str. 68). Na str. 53 wskazano niepoprawną jednostkę zmian temperaturowych modułu Young’a, tj. ppm/°C. Moduł Young’a opisuje odkształcenie materiału i jest podawany w paskalach, a jednostka ppm określa liczebność materii (parts per million). Błędą jednostką lub błędny zakres mas wzorców zastosowano przy podawaniu przedziału wzorcowania, w rozdziale 5 („Podsumowanie i wnioski”, str. 114), w którym wskazano, że: „Badanie rozrzutu wskazań wykonano w porównaniu do automatycznego komparatora masy, który jest używany do wzorcowania wzorców mikrogramowych (50 μ g – 500 μ g)” – pierwsze zdanie w czwartym akapicie od góry. Natomiast podczas prac badawczych stosowano m. in. wzorce o masach 1 mg i 2 mg, czyli przewyższających wskazany zakres.

Całość pracy została podsumowana w rozdziale 5 „Podsumowanie i wnioski”, w którym wskazano kluczowe efekty poznawcze i konstrukcyjne, uzyskane podczas realizacji pracy, które pozwalają na potwierdzenie postawionej hipotezy oraz wykazanie, iż cel pracy został osiągnięty. W trzecim akapicie rozdziału stwierdzono, że: „Badanie rozrzutu wskazań komparatora dla różnych wzorców masy – opisane w punkcie 4.2.1 – wykazało, że komparator osiąga odchylenia z 6 cykli ABBA nie większe niż 50 ng (5 działek odczytowych)”. Przywołany rozdział zawiera wyniki porównań wyłącznie dla masy 2 mg, a z krótkiego ich

opisu nie wynika wprost wniosek o wielkości odchylenia na poziomie nie większym niż 50 ng. **Przywołany wniosek powinien zostać szerzej omówiony podczas obrony doktoratu.**

6. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu technicznego, polegającego na opracowaniu innowacyjnego komparatora masy o wysokiej rozdzielczości pomiarowej, co zrealizowano na podstawie przeprowadzonych prac konstrukcyjnych, poprzedzonych rozważaniami naukowymi i pracami eksperymentalnymi. Przedłożona praca potwierdza odpowiednie kompetencje Doktoranta w zakresie wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych, dotyczących systemów pomiaru masy, konstruowania urządzeń kontrolno-pomiarowych oraz samodzielnego prowadzenia prac naukowych w dyscyplinie: inżynieria mechaniczna. Należy podkreślić, iż praktycznym rezultatem zrealizowanej pracy doktorskiej jest opracowanie i wytworzenie komparatora masy NANO.AK-4/500, charakteryzującego się rozdzielczością pomiarową na poziomie 10 ng, który został włączony do oferty handlowej wiodącego, polskiego producenta wag. Ponadto, Doktorant jest współautorem pięciu publikacji naukowych i technicznych, w tym jednej w prestiżowym czasopiśmie *Precision Engineering* (wydawany przez Elsevier). Wskazane w recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają wartości merytorycznej wykonanej pracy, którą oceniam pozytywnie.

W związku z powyższym, rozprawa doktorska mgr inż. Michała Soleckiego, pt.: „Konstrukcja komparatora masy o rozdzielczości 10 ng ze zmodyfikowanym elektromagnetycznym przetwornikiem siły” spełnia wymagania stawiane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, a tym samym wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



.....
Jarosław Molenda