

dr hab. inż. Bogusław Butryło, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr. inż. Michała Herbko
pt. „Elektromagnetyczne struktury mikropaskowe do monitorowania kierunku
oraz wartości odkształceń w elementach konstrukcyjnych”**

1. Podstawa prawna, przedmiot i zakres recenzji

Recenzja została opracowana w związku z uchwałą Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (uchwała nr 45 z dnia 29 marca 2021 r.) ws. powołania recenzenta w przewodzie doktorskim mgr. inż. Michała Herbko, wszczętym w dniu 25 października 2018 r. w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie *elektrotechnika*.

Przewód doktorski Pana mgr. inż. Michała Herbko został wszczęty w dniu 25 października 2018 r., tzn. po wejściu w życie Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.). Zgodnie z zapisami ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669, art. 179 ust. 3), przewody doktorskie wszczęte od dnia 1 października 2018 r. do dnia 30 kwietnia 2019 r. i niezakończone przed dniem wejścia ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668), są przeprowadzane na zasadach dotychczasowych.

Zgodnie z § 6 ust. 4 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniach habilitacyjnych oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261), przedłożona recenzja zawiera ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Herbko pod względem spełnienia warunków określonych w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.).

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Herbko zatytułowana *Elektromagnetyczne struktury mikropaskowe do monitorowania kierunku oraz wartości odkształceń w elementach konstrukcyjnych* (ang. *Electromagnetic microstrip structures for monitoring direction and deformation values in structural elements*). Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Przemysław Łopato, prof. ZUT. Przedłożona recenzja zawiera ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Herbko sformułowaną w odniesieniu do dyscypliny naukowej *elektrotechnika*, w dziedzinie *nauk technicznych*.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozwiązanie problemu rozpatrywanego przez mgr. inż. Michała Herbko w ramach rozprawy doktorskiej zostało przedstawione w formie cyklu artykułów naukowych oraz innych udokumentowanych wyników prac. Ze względu na brak spisu treści i ciągłej numeracji stron, w przedłożonej rozprawie wyróżniono następujące części.

- 1) Wyszczególnienie i opis osiągnięć przedłożonych w ramach rozprawy doktorskiej zamieszczone w 24 stronicowym autoreferacie (str. 3 – 26).
- 2) Streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim (str. 27 – 30).
- 3) Zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie ośmiu artykułów naukowych, patent oraz zgłoszenie patentowe, zgodnie z zestawieniem zamieszczonym na stronach 3 i 4 autoreferatu, składające się na rozwiązanie problemu naukowego, osiągnięcie przedstawione przez Kandydata do oceny. W ramach przedłożonych opracowań można wyróżnić:
 - a) 4 artykuły w czasopismach naukowych, które zgodnie z rokiem publikacji znajdowały się na liście czasopism punktowanych MNiSW, w tym 1 artykuł z listy B MNiSW z roku 2017 oraz 3 artykuły w czasopismach umieszczonych w wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych ogłaszanych przez ministra właściwego ds. nauki na podstawie art. 267 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.);
 - b) 3 artykuły indeksowane w bazie Scopus, zamieszczone w materiałach międzynarodowych konferencyjnych naukowych (2 artykuły w ramach konferencji skierowanej do doktorantów oraz 1 artykuł przedstawiony w ramach specjalistycznej konferencji dotyczącej pól elektromagnetycznych), które odbyły się w okresie 2017 – 2019;
 - c) 1 artykuł w czasopiśmie nieujęty w roku publikacji na liście ogłaszanej przez MNiSW;
 - d) patent PL 233085 B1 (2019 r.) na rozwiązanie techniczne pt. *Mikrofalowy czujnik do monitorowania kierunku oraz wartości naprężeń* (opis patentowy wraz z opisem wynalazku, 5 stron);
 - e) zgłoszenie patentowe P.431119 (2019 r.) pt. *Mikropaskowy czujnik do badania odkształceń* (potwierdzenie zgłoszenia wraz z opisem, 9 stron).
- 4) Kopia oświadczeń o udziale autorów w poszczególnych osiągnięciach (3 strony).

Przedstawiony patent oraz zgłoszenie patentowe dotyczą rozwiązań technicznych omawianych w publikacjach naukowych i pozostają w ścisłym związku z tematyką rozprawy doktorskiej oraz wynikami prac prezentowanych w publikacjach naukowych.

Składające się na rozprawę doktorską artykuły, patent oraz zgłoszenie patentowe zostały opublikowane lub zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP w latach 2017 – 2019.

3. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Herbko dotyczy zagadnień związanych z opracowaniem konstrukcji planarnych elementów mikrofalowych oraz zastosowaniem technologii mikrofalowych w układach pomiarowych. Uzyskanie zadowalających parametrów technicznych tego typu elementów, porównywalnych z klasycznymi czujnikami pomiarowymi (m.in. tensometry oporowe, czujniki laserowe), wiąże się z rozwiązaniem szeregu zadań obejmujących m.in. geometrię elementów, dobór materiałów, konstrukcję układu pomiarowego. Technika mikrofalowa daje w tym zakresie duże możliwości kształtowania parametrów technicznych i cech użytkowych proponowanych rozwiązań, dostosowania budowy elementów, doboru pasma częstotliwości oraz formowania charakterystyk widmowych pod kątem specyficznych wymagań związanych z zastosowaniem.

Analiza wyników prac przedstawionych w rozprawie doktorskiej pozwala na wyróżnienie dwóch, ściśle powiązanych obszarów działań Kandydata.

- 1) Konstrukcja układów mikropaskowych o dobranej geometrii w celu uzyskania czujników o zakładanych właściwościach oraz ocena parametrów technicznych elementów pod kątem ich zastosowania w pomiarach odkształceń mechanicznych.

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy projektowania elementów mikropaskowych do zastosowania w budowie czujników naprężeń mechanicznych oraz odkształceń geometrii konstrukcji. Kandydat przedstawił rozwiązanie techniczne, które daje możliwość monitoringu parametrów konstrukcji mechanicznych, nie wymaga modyfikacji geometrii oraz ingerencji w strukturę elementów konstrukcyjnych, na których są montowane czujniki.

Przedmiotem prac Kandydata są układy mikropaskowe, możliwe do wytworzenia na bazie elastycznych laminatów mikrofalowych. Dobór geometrii elementu mikrofalowego ma na celu uzyskanie wybranej częstotliwości drgań własnych oraz uformowanie charakterystyki rezonansowej proponowanego czujnika. Odształcenia geometrii czujnika trwale mocowanego (klejonego) do powierzchni elementu mierzonego prowadzą do odstrojenia od wyjściowej charakterystyki rezonansowej. Identyfikowane, mierzone zmiany parametrów charakterystyki częstotliwościowej układu mikropaskowego są miarą deformacji geometrycznej elementu mierzonego w zakresie jego odkształceń sprężystych.

W toku kolejnych działań mgr inż. Michał Herbko rozpatruje układy mikropaskowe o coraz bardziej złożonej geometrii. Punktem wyjścia jest układ o klasycznej geometrii prostokątnej. W dalszej kolejności rozpatrzono konstrukcję i właściwości czujnika kołowego, by w końcowej wersji zastosować element mikrofalowy planarny o geometrii fraktalnej.

- 2) Opracowanie wybranych elementów metody pomiarowej, w celu efektywnego wykorzystania czujników i poprawy właściwości użytkowych metody, w której są stosowane czujniki. W tej części zostało poddanych analizie kilka rozwiązań, w tym:
 - a) uwzględnienie co najmniej dwóch modów drań własnych układu (dwie częstotliwości rezonansowe układu mikropaskowego);
 - b) konstrukcja układu dwóch czujników (z dwoma promiennikami), umieszczonych prostopadle w celu redukcji kierunków i obszarów deformacji, w których pojedynczy czujnik nie posiada zadowalających właściwości;
 - c) zastosowanie sztucznej sieci neuronowej w celu ułatwienia analizy wyników i identyfikacji stopnia odkształcenia geometrii układu.

Prostopadłe umieszczenie czujników, czy też wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych jest znane i stosowane w różnych zagadnieniach pomiarowych (np. prostopadłe umieszczanie czujników tensometrycznych). Czynnikiem nowości jest zastosowanie tych technik w zakresie czujników mikropaskowych, określenie możliwości stosowania wymienionych rozwiązań oraz ilościowa analiza właściwości układów pomiarowych, w których wykorzystuje się wymienione rozwiązania.

3.1. Aktualność i ranga poruszanego problemu

Tematyka konstrukcji układów mikrofalowych o różnej geometrii oraz ich zastosowania, m.in. w pomiarach, jest szeroko rozwijana w pracach wielu autorów i jest przedmiotem publikacji o charakterze naukowym oraz technicznym w czasopismach (m.in. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, IEEE Transactions on Magnetics, Measurement, Sensors, Journal of Radio Frequency and Microwave Computer-Aided Engineering). Rozwiązania techniczne tworzone na bazie techniki mikrofalowej, przewidziane do zastosowań w metrologii

są przedmiotem badań naukowych od wielu lat (m.in. czujniki nacisku, pomiar niewielkich przemieszczeń, metody badań nieniszczących).

Skrótowy opis zastosowań technologii mikrofalowych w pomiarach został przedstawiony przez Kandydata we wstępie do [3] (zgodnie z listą zamieszczoną w p. 5 autoreferatu).

Rezultaty przedstawione w rozprawie doktorskiej mieszczą się w nurcie prac prezentowanych w aktualnych publikacjach naukowych dotyczących technologii układów mikrofalowych i ich zastosowań. Tematyka i zakres wykonanych prac łączą w sobie zagadnienia konstrukcji specyficznych elementów mikrofalowych, modelowania numerycznego układów, doboru ich wariantów konstrukcyjnych, zastosowania w przypadku pomiarów niewielkich zniekształceń geometrii. Przedstawiona metoda doboru i stosowania elementów mikropaskowych oraz konstrukcja układu pomiarowego mają znaczenie praktyczne, mogą przyczynić się do szerszego zastosowania układów mikrofalowych w pomiarach.

3.2. Sformułowanie problemu naukowego

Kluczowym zagadnieniem rozpatrywanym w rozprawie doktorskiej jest opracowanie wybranych specyficznych geometrii czujników planarnych opartych na układach mikropaskowych, sformułowanie i dobór parametrów schematów pomiarowych oraz określenie warunków eksploatacji proponowanych czujników. Wymienione kierunki i częściowe cele przeprowadzonych prac są ukierunkowane na udowodnienie tezy wskazanej przez mgr inż. Michała Herbko (str. 10 autoreferatu): poprawę właściwości użytkowych mikropaskowych czujników odkształceń poprzez zastosowanie nowych geometrii elementów oraz pomiary przy różnych częstotliwościach.

Przedstawiona teza zawiera moim zdaniem ogólne wskazanie obszaru badań - właściwości użytkowych (parametrów), których poprawę założono. Określenie cech, właściwości jakie mogą być zmodyfikowane i poprawione, byłoby czytelnym wyznacznikiem podjętych badań. Właściwości te zostały wskazane pośrednio w przyjętym planie badań, sformułowanych celach. Kandydat określił częściowe cele badań (str. 10 autoreferatu) i przedstawił ich rozwiązanie w kolejnych publikacjach. Informacje dotyczące parametrów technicznych podlegających modyfikacjom (m.in. zakres zmian częstotliwości rezonansowej, charakterystyka kierunkowa czujnika), które warunkują poprawę właściwości użytkowych, przedstawiono w ramach kolejnych publikacji.

Zgodnie z wyróżnionymi w p. 3 obszarami działań Kandydata, sformułowane zadanie badawcze zostało określone na dwóch poziomach.

- 1) Jako problem doboru konstrukcji układu o parametrach rozłożonych, opisanego równaniem różniczkowym cząstkowym liniowym, stacjonarnym.

W przedstawionych publikacjach w ograniczonym stopniu zostały sformułowane założenia dotyczące zakresu stosowalności proponowanych czujników oraz przyjętych modeli matematycznych. Ze względu na przedstawiony w artykułach, w przykładach, obszar zastosowań elementów mikrofalowych, w analizie przyjęto równania sprężystości w ośrodkach ciągłych. W toku prac uwzględniono zasadę zeszytnienia (małych przemieszczeń) badanego materiału, na którym może być mocowany czujnik. Sformułowany problem dotyczy układów o małych pochodnych przemieszczeń, w praktyce zagadnień quasi-stycznych. W ramach prezentowanych prac przyjęto liniowe sformułowanie zagadnienia (właściwości mechaniczne oraz elektryczne ośrodków).

- 2) Jako problem doboru dodatkowych rozwiązań technicznych w ramach rozwijanej metody pomiarowej (m.in. układ z dwoma promiennikami, zastosowanie sztucznych sieci neuronowych).

Założenia przyjęte przy formułowaniu problemu w tym zakresie były pochodną założeń związanych z konstrukcją, działaniem czujników (określone w pierwszej części). Dodatkowe warunki

sformułowania zadań wynikały co najwyżej z przyjętych algorytmów numerycznych (dotyczy sieci neuronowych).

Zastosowany przez Kandydata opis parametrów układów złożonych jest metodologicznie właściwy, uzasadniony ze względu na specyfikę konstrukcji rozpatrywanych elementów mikropaskowych. Pozytywnie oceniam przyjęty cel pracy i zakres pracy. Ogólny sposób sformułowania problemu badawczego uważam za właściwy.

3.3. Sposób rozwiązania problemu, zastosowane metody i narzędzia, metodologia prac

Metodyka przeprowadzonych prac badawczych jest właściwa, poprawna ze względu na założony cel pracy. Kandydat szeroko wykorzystał w badaniach metody modelowania numerycznego w celu analizy różnych konstrukcji czujników. W tym zakresie korzystał z komercyjnych narzędzi modelowania numerycznego. Wyniki obliczeń numerycznych stanowiły bazę w dalszych etapach prac, przy doborze wielkości elementów czujnika (układu czujników) czy też, jako dane wejściowe w procesie uczenia sztucznej sieci neuronowych.

Kluczowym elementem podjętych prac były badania prowadzone na stanowisku pomiarowym. Kandydat wykonał szereg prób, które pozwoliły na ocenę różnych wariantów rozpatrywanych układów, możliwość ich wykorzystania w układzie pomiarowym oraz głównych czynników wpływających na parametry układów mikropaskowych (w tym błędy pomiarowe). Rezultaty obliczeń numerycznych w ujęciu ilościowym zostały porównane z wynikami uzyskanymi na stanowisku pomiarowym. Wyniki obliczeń numerycznych testowanych konfiguracji zostały zweryfikowane w toku pomiarów.

Zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne oraz zastosowane dodatkowe techniki pomiarowe pozwoliły na uzyskanie czujników mikropaskowych o jakościowo lepszych parametrach technicznych, w szczególności:

- 1) charakterystyce kierunkowej;
- 2) wielkości odstrojenia od częstotliwości rezonansowej;
- 3) stopnia identyfikacji kierunku i wartości naprężeń mechanicznych (odkształceń) na podstawie danych pomiarowych w układzie z dwoma częstotliwościami oraz w układzie pomiarowym, w którym zastosowano sztuczną sieć neuronową.

Przedstawione wyniki badań wykazały poprawę wybranych, wymienionych powyżej parametrów, cech użytkowych metody pomiarowej bazującej na elementach mikropaskowych. Przy uwzględnieniu wymienionych parametrów teza pracy została udowodniona.

3.4. Elementy oryginalne, rezultaty prac

Wyniki prac zaprezentowanych w ramach rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Herbko stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zostały zaproponowane i zweryfikowane specyficzne rozwiązania konstrukcyjne lub programowe, które umożliwiły poprawę wybranych parametrów, właściwości metody pomiarowej bazującej na czujnikach mikropaskowych. Forma rozprawy, na którą składają się artykuły w czasopiśmie i na konferencjach ograniczyła moim zdaniem możliwość pogłębionej analizy matematycznej zagadnienia. W tym zakresie część osiągnięć, ma charakter prac konstrukcyjnych.

Za główne osiągnięcia mgr. inż. Michała Herbko przedstawione w ramach rozprawy doktorskiej uważam:

- 1) zaproponowanie i zweryfikowanie użyteczności konstrukcji czujnika z dwoma promiennikami umieszczonymi prostopadle;
- 2) zastosowanie sieci neuronowych w analizie danych, przy uwzględnieniu wyników badań symulacyjnych, bez konieczności formalizacji opisu problemu pomiarowego;
- 3) zastosowanie metody pomiarowej z wykorzystaniem dwóch częstotliwości pracy czujników (dwóch modów drgań);
- 4) rozpatrzenie czujników o różnej geometrii, zastosowanie struktur fraktalnych, w celu minimalizacja konstrukcji czujników;
- 5) ocena wpływu wybranych czynników na parametry czujników.

Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za pozytywną oceną rozprawy jest nowatorski, praktyczny charakter rozwiązań. W toku prowadzonych badań opracowane zostały specyficzne, nowe rozwiązania techniczne, które stały się podstawą uzyskania współautorskiego patentu. Złożony został również wniosek patentowy dotyczący kolejnego rozwiązania technicznego zaproponowanego i badanego w trakcie prac nad tematem.

3.5. Wiedza z zakresu tematyki pracy i odwołanie się do innych prac

Rozprawa jest zbiorem publikacji, stąd dyskusja dotycząca prezentowanych w literaturze rozwiązań technicznych czujników, projektowania czy też zastosowania zaawansowanych metod analizy danych oraz schematów uczenia maszynowego jest rozproszona. Najszerzy opis, odwołanie się do innych prac znajduje się w publikacjach [3] i [8] (według spisu publikacji w p. 5 autoreferatu). O ile przekrojowe omówienie problematyki poruszanej rozprawy jest rozproszone, to podkreślić należy, że Kandydat korzystał i wykazał się znajomością licznych prac związanych z tematyką rozprawy, dotyczących m.in. budowy układów mikrofalowych, stosowanie metod pomiarowych, modelowania numerycznego.

3.6. Ocena udziału Kandydata w przedstawionych osiągnięciach naukowych

Wszystkie osiągnięcia składające się na rozprawę doktorską (8 artykułów naukowych, patent i zgłoszenie patentowe) są współautorskie. Lista współautorów ogranicza się do promotora rozprawy dr hab. inż. Przemysława Łopato, prof. ZUT, opiekuna naukowego Kandydata. Ilościowy udział mgr. inż. Michała Herbko w przedstawionych osiągnięciach wynosi 50% w przypadku artykułów oraz 70% w odniesieniu do patentu i zgłoszenia patentowego (zgodnie z deklaracjami autorów). Merytoryczny udział mgr. inż. Michała Herbko w opublikowanych pracach jest określony w:

- 1) dokumencie podpisanym przez autorów poszczególnych osiągnięć, zamieszczonym na końcu rozprawy doktorskiej;
- 2) deklaracjach współautorów wpisanych zgodnie z wymaganiami wydawcy w artykułach [3, 8].

Stwierdzam, że przedstawione informacje dotyczące udziału w pracach wskazują na znaczący udział Kandydata w pracach koncepcyjnych, związanych z opracowaniem konstrukcji elementów mikropaskowych, zaproponowaniem nowych konstrukcji elementów (układ z dwoma promiennikami) oraz dodatkowych rozwiązań programowych, zaprojektowaniem i przeprowadzeniem pomiarów, wykonaniem symulacji komputerowych. Zgodnie z przedstawionym zestawieniem udziałów, deklaracjami autorów, osiągnięcia mgr. inż. Michała Herbko stanowią samodzielną i wyodrębnioną część pracy zbiorowej. Przedmiotem oceny przedstawionej w recenzji są dokonania wskazane jako wyodrębniona część, wyniki osobnej, samodzielnej pracy Kandydata.

4. Uwagi i pytania

Praca wnosi nowe elementy do dyskusji na temat konstrukcji układów mikrofalowych i ich zastosowania w pomiarach wielkości nieelektrycznych. Przedstawione poniżej uwagi i pytania należy traktować jako głos w dyskusji naukowej dotyczącej przedmiotu rozprawy.

4.1. W opisie właściwości rozpatrywanych konfiguracji czujnika, ocenie badanych wariantów i wnioskach Kandydat odwołuje się i poddaje dyskusji *czułość przetwornika*. W przedłożonych publikacjach nie podano przyjętej definicji czułości.

Zgodnie z definicją metrologiczną czułość powinna być wyrażana przez iloraz zmian wielkości wyjściowej do zmian sygnału mierzzonego (wejściowego).

Czy bezwzględna zmiana częstotliwości rezonansowej Δf_r daje jednoznaczną, łatwą w interpretacji charakterystykę czułości, zwłaszcza, że są testowane układy pracujące w różnym zakresie częstotliwości (przy zmianie wielkości czujnika)?

4.2. Przy opisie właściwości czujników w autoreferacie oraz w części publikacji są podawane mało precyzyjne informacje dotyczące czułości, np. „duża czułość”, „większa czułość”, „wyższa czułość”, „najwyższa czułość”, „mniejsza czułość”, „niższa czułość”, „znaczny spadek czułości”, itp. Czy możliwe jest podanie bezwzględnych wartości czułości? Czy możliwe jest podanie minimalnej wartości czułości, wartości akceptowalnej? Czy możliwe jest określenie względnej wartości zmiany czułości, którą uzyskano w toku prowadzonych prac?

4.3. Opracowanie konfiguracji czujnika wiąże się z badaniem różnych czynników wpływających na jego pracę. W rozprawie przedstawiono wyniki badań dotyczących charakterystyki kątowej czy też wpływu sposobu zasilania czujnika (parametrów falowodu łączącego źródło i element pomiarowy) na zmianę jego parametrów. Czy Kandydat posiada dane, wyniki prac, informacje związane z:

- 1) wpływem mocowania czujnika, sposobu klejenia do powierzchni płyty;
- 2) wpływem temperatury (niskiej i wysokiej temperatury) na warunki pracy czujnika i układu.

4.4. Realizacja pomiarów oraz projektowanie układu pomiarowego powinno być wzbogacone o analizę błędów pomiarowych, przeprowadzenie rachunku błędów. W ten sposób można uwzględnić różne czynniki i oszacować wypadkowy błąd metody, w której stosuje się proponowane czujniki. Czy możliwe jest przedstawienie analizy błędów w proponowanej metodzie, w tym całego toru pomiarowego?

4.5. Przedstawiona rozprawa doktorska jest złożeniem artykułów. Przy ułożeniu i planowaniu prac zasadne jest rozłożenie treści prezentowanych w publikacjach i ograniczenie powielania części wyników. Szczególnie jest to widoczne w publikacjach [5] oraz [6] (zgodnie z numeracją w p. 5 autoreferatu):

[5] P. Łopato, M. Herbko: Monitorowanie naprężeń w elementach konstrukcyjnych za pomocą czujnika mikropaskowego, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, s. 9-11, nr 4, 2018.

[6] M. Herbko, P. Łopato: Sensitivity Analysis of Circular Microstrip Strain Sensor, The International Interdisciplinary PhD Workshop, 2019, Wismar, Niemcy. (Artykuł indeksowany w bazie Scopus).

4.6. Za pewien mankament rozprawy uważam powtarzalność części wniosków w kolejnych publikacjach. Pozostają one poprawne w odniesieniu do wyników omawianych w danym artykule, ale zbliżone do innych.

Uważam, że złożenie publikacji w ramach jednego osiągnięcia wymaga rozłożenia akcentów i rozszerzenia wniosków, tak aby złożenie prac dało kompleksowe podsumowanie tematyki i wyników.

- 4.7. W artykule [1] przedstawiono wyniki prac oraz sformułowano wniosek wskazujący, że zwiększenie częstotliwości rezonansowej czujnika prowadzi do zwiększenia jej odchyłki w przypadku obciążenia czujnika. Podany wniosek dotyczy wartości bezwzględnych obu parametrów. Czy możliwe jest określenie względnych zmian obu parametrów?
- 4.8. W artykule [2] przedstawiono charakterystyki zmian częstotliwości rezonansowych pierwszego modu i drugiego modu drgań (rys. 5). Charakterystyka kątowna zmian częstotliwości rezonansowej przy zadanym naprężeniu wykazuje zmienność na poziomie identyfikowalnym dla podstawowej częstotliwości rezonansowej (mod 1). W przypadku częstotliwości drugiej (mod 2) zmiany częstotliwości rezonansowej pozostają na zbliżonym poziomie, niezależnie od kąta. Czy jest możliwe wykorzystanie tych danych w analizie pomiarowej?
- 4.9. Ile wynosi czas pomiaru przy stosowaniu proponowanej metody. Na ile prezentowana metoda może być przydatna przy pomiarach naprężeń / odkształceń zmiennych w czasie (jaka zmienność w czasie naprężeń / odkształceń) może być mierzona proponowaną metodą? Czy możliwe jest wskazanie innych ograniczeń, założeń stosowalności proponowanej metody?
- 4.10. Warunkiem właściwej eksploatacji proponowanych czujników jest ich przytwierdzenie do badanego podłoża (próbki materiału). Czy w toku podjętych prac rozpatrywany był wpływ zmiany parametrów połączenia na jakość pomiarów (efekty starzenia)? Czy możliwe jest identyfikowanie słabego, wadliwego zamocowania elementu na powierzchni?

5. Komentarz, uwagi dotyczące redakcji pracy

Redakcja pracy nie budzi zasadniczych zastrzeżeń, zwłaszcza że składają się na nią przede wszystkim artykuły naukowe, które podlegały wcześniejszej weryfikacji redakcyjnej. Zamieszczona poniżej lista powinna w moim przekonaniu być przydatna przy opracowaniu przez autora kolejnych publikacji.

- 1) Autoreferat, str. 9, rys. 3: „z wpływem sił zewnętrznych” lepiej brzmi „pod wpływem sił zewnętrznych”.
- 2) Autoreferat, str. 11 (oraz opisy w części artykułów): wprowadzenie terminu *częstotliwość operacyjna* bez jego wyjaśnienia. W rzeczywistości chodzi o częstotliwość rezonansową układu.
- 3) Autoreferat str. 11: różne oznaczenia grubości laminatu: h , h_1 .
- 4) Autoreferat, str. 12: autor wskazuje na opracowanie *dokładnego modelu numerycznego*. Metody numeryczne, w tym metoda elementów skończonych, bazują na przybliżeniach numerycznych, dobranych metodach aproksymacji, wyborze prostych funkcji bazowych. Z tego powodu sformułowanie *dokładny model numeryczny* jest w zasadzie oksymoronem.
- 5) Autoreferat, rys. 10 (oraz część rysunków w artykułach z wynikami pomiarów): brak oznaczenia punktów pomiarowych, wyników pomiarów. Podane od razu końcowe przebiegi.
- 6) Autoreferat, rys. 13: brak informacji, jaka metoda dopasowania charakterystyk (interpolacji) została zastosowana.
- 7) Uwaga dotycząca jednoznaczności, spójności oznaczeń i terminologii.

Praca dotyczy zagadnień, w których poruszane są zagadnienia mechaniczne (odkształcenia konstrukcji). Dotyczy to zarówno wykorzystywanych modeli matematycznych jak też wykonywanych pomiarów. W rozprawie (publikacje oraz autoreferat) do oznaczenia naprężeń stosowane są symbole σ oraz \mathbf{S} , które zgodnie z teorią mechaniki (sprężystości mechanicznej) dotyczą naprężeń rzeczywistych (σ) oraz tensora naprężeń Pioli - Kirchhoffa (\mathbf{S}). W opisach, publikacjach powinny pojawić się informacje jaki opis naprężeń jest rozpatrywany. Czy przyjęte symbole odpowiadają typowej notacji, oznaczeniom naprężeń stosowanych w mechanice?

8) Uwaga dotycząca zapisu matematycznego

Pomimo, że artykuły podlegały procesowi recenzowania, za dyskusyjny uważam zapis równania występującego w identycznej postaci w publikacjach [4, 5, 6, 7]:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v = 0$$

Opisy podane do tego równania wskazują, że S jest skalarem, naprężeniem, choć zasadne jest tu użycie wskazania, że jest to tensor naprężeń Pioli - Kirchhoffa. Jedynie w tej sytuacji operacja iloczynu wewnętrznego (dywergencji) z tensorem \mathbf{S} oznaczonym jako macierz / wektor ma uzasadnienie.

9) Uwaga dotycząca ciągłości przyjętych wielkości fizycznych

W artykułach [1 – 7] dyskusja wyników była prowadzona w oparciu o wartości naprężenia σ [MPa]. W publikacji [8] pojawia się „strain ε ” wyrażone w [%]. Zasadne jest wyjaśnienie oznaczenia, czy chodzi o odkształcenie (liniowe) czy też naprężenie. Czy możliwe było zachowanie ciągłości w wyborze parametrów opisujących układ?

6. Posumowanie

Przedłożona rozprawa doktorska została wykonana na właściwym poziomie merytorycznym. Przyjęta przez mgr. inż. Michała Herbko teza rozprawy została udowodniona. Wskazany naukowy cel pracy został osiągnięty, przy uwzględnieniu użytkowych, praktycznych efektów stosowania opracowanych schematów obliczeniowych.

Przedstawione w punkcie 4 uwagi krytyczne i dodatkowe pytania dotyczą wybranych aspektów pracy. Są one elementem dyskusji naukowej dotyczącej rozpatrywanych, złożonych zagadnień. Nie umniejszają one mojej pozytywnej, wypadkowej ceny przedstawionej rozprawy doktorskiej. Autor rozprawy sformułował cel badawczy. Zastosował właściwe metody badawcze i narzędzia oraz przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu, w tym szczególnie schematy numeryczne obejmujące formułowanie i rozwiązanie zagadnienia brzegowego. Z użyciem innych metod numerycznych oraz eksperymentalnie wykazał poprawność opracowanego algorytmu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i badań na stanowisku pomiarowym udowodnił, że zaproponowany schemat obliczeniowy może być bezpośrednio wykorzystany w praktycznych obliczeniach linii paskowych, do oceny ich potencjalnych właściwości.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Herbko pt. *Elektromagnetyczne struktury mikropaskowe do monitorowania kierunku oraz wartości odkształceń w elementach konstrukcyjnych* spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21 czerwca 2016 r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny *elektrotechnika*.

Ze względu na zapisy ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669), stwierdzam, że przedstawiona ocena osiągnięć naukowych mgr inż. Michała Herbko w przypadku przewodów doktorskich w odniesieniu do obszaru i dziedziny nauk technicznych i dyscypliny *elektrotechnika* (Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 8 sierpnia 2011 r. w sprawie obszarów wiedzy, dziedzin nauki i sztuki oraz dyscyplin naukowych i artystycznych,

Dz.U. z 2011 r. nr 179, poz. 1065), pozostaje niezmieniona w przypadku dziedziny nauk inżyniersko-technicznych i dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*, zgodnie z klasyfikacją określoną w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. z dnia 25 września 2018 r., poz. 1818).

Wniosuję o dopuszczenie mgr. inż. Michała Herbko do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Białystok, 2 czerwca 2021 r.

3. Budyb