

Białystok, dnia 05.06.2023r.

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej Pana magistra inżyniera Andrzeja Rybczyńskiego pt.:
„Determinanty niepewności pomiaru promieniowania UV źródeł technologicznych”**

Promotor: dr hab. inż. Agnieszka Wolska, prof. Instytutu

1. Podstaw formalna opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Sekretarza Rady Naukowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, Pana dr. hab. inż. Dariusza Plebana prof. Instytutu z dnia 29.03.2023r. przekazujące pracę do recenzji.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Andrzeja Rybczyńskiego pt.: „*Determinanty niepewności pomiaru promieniowania UV źródeł technologicznych*”, opracowana pod opieką Pani promotor dr hab. inż. Agnieszki Wolskiej prof. Instytutu. Recenzja została opracowana zgodnie z wymaganiami art. 175 i art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r. poz. 1669 z późn. Zm.) oraz par. 3 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018r. poz. 261).

3. Charakterystyka rozprawy

Celem pracy, zdefiniowanym przez Autora, jest opracowanie algorytmu i narzędzia do szacowania i analizy źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania UV łuku spawalniczego, ułatwiających weryfikację oceny zagrożenia fotobiologicznego. Doktorant założył też, że w oparciu o zaprojektowany algorytm, możliwe będzie określenie wpływu poszczególnych źródeł błędów podczas pomiaru spektrometrem matrycowym na niepewność rozszerzoną pomiaru. Prowadzenie analizy danych pomiarowych wskaże źródła błędów o największym udziale w szacowanej niepewności, podając przesłanki do weryfikacji procedur badawczych, z uwzględnieniem minimalizacji ich wpływu na niepewność wyniku pomiaru. Autor postawił również za cel, aby przyjęta metoda propagacji niepewności składowych pozwalała na efektywne szacowanie niepewności złożonych dla różnych rozkładów prawdopodobieństwa wielkości wejściowych oraz uwzględniła zachodzące między nimi korelacje.

Cele rozprawy sprowokowały Autora do postawienia następujących tez: „Zastosowanie metody Monte Carlo umożliwia zaawansowane modelowanie rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania UV łuku spawalniczego”, oraz „...opracowany algorytm pozwala na analizę źródeł błędów pomiaru, ułatwiającą weryfikację oceny zagrożenia fotobiologicznego promieniowaniem UV.”

4. Ocena strony redakcyjnej rozprawy i uwagi ogólne

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów, bibliografii, spisu skrótów i oznaczeń oraz załączników.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie w tematykę eksplorowaną przez Doktoranta, w którym zaprezentowano motywację podjęcia analizy problemu, wynikającej z bogatego doświadczenia pomiarowego Autora.

W rozdziale drugim Autor dokonał gruntownego przeglądu literatury przedmiotu. Scharakteryzował stan prawny związany z oceną zagrożeń promieniowaniem optycznym, w szczególności problematykę oddziaływania fotobiologicznego promieniowania UV oraz opisał zjawiska zachodzące w łuku spawalniczym. Zaprezentował również metody pomiaru oraz szacowania błędów i niepewności pomiaru w dziedzinie spektrofotometrii.

Rozdział trzeci stanowi retrospekcję metod szacowania niepewności pomiaru spektrofotometrycznego promieniowania UV, w oparciu o obowiązującą metodę GUM, metodę Monte Carlo oraz metodę Bootstrap, stosowaną w przypadku złożonych procesów pomiarowych, do których min. należy pomiar łuku spawalniczego.

W rozdziale czwartym Autor uszczegółowił uzasadnienie podjęcia analizy problemu, a także wskazał cele pracy i na ich podstawie zdefiniował tezy rozprawy. Istotną częścią tego rozdziału jest szczegółowy zakres działań, oparty na osiemnastu celach szczegółowych, udowadniających postawione tezy.

Identyfikację źródeł błędów pomiaru promieniowania łuku spawalniczego opisano w rozdziale piątym, w którym Doktorant zidentyfikował konieczne do zastosowania przyrządy pomiarowe, procedury i wynikający z ich użycia błędy pomiarowe. Poszczególne błędy uwzględniono w kontekście użycia wybranych przyrządów pomiarowych, w szczególności spektrometrów matrycowych.

Rozdział szósty zawiera szereg technicznych informacji opisujących wybrane stanowisko pomiarowe z analizą łuku spawalniczego. Wskazano i zlokalizowano geometrycznie względem obszaru mierzonego aparaturę pomiarową. W tym kontekście opisano i scharakteryzowano źródła błędów dotyczące użytej aparatury i konfiguracji stanowisk pomiarowych.

W siódmym rozdziale rozprawy, Autor zdefiniował i opisał modele matematyczne pomiaru w oparciu o metodę GUM, metodę Monte Carlo oraz metodę hybrydową z użyciem metody Bootstrap. Efektem analiz w tym rozdziale było opracowanie schematu wyznaczania niepewności złożonej wyniku pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia łuku spawalniczego oraz algorytmu, koniecznego do opracowania narzędzia programistycznego.

W rozdziale ósmym Autor opisał realizację autorskiego narzędzia programistycznego, składającego się z dwóch aplikacji oraz zestawu funkcji programistycznych do obliczeń niepewności pomiaru, zgodnie z modelami matematycznymi wcześniej opisanymi.

Rozdział dziewiąty opisuje wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta badań skutecznego aktywnie natężenia napromienienia. Analizy niepewności rozszerzonej wyników pomiarów przeprowadzono w oparciu o referencyjną metodę GUM oraz z wykorzystaniem autorskich metod opartych na symulacji Monte Carlo i Bootstrap. Autor porównał niepewności rozszerzone wyznaczone powyższymi metodami, wskazując na czynnik determinujące

niepewność wyniku pomiaru, w odniesieniu do dwóch metod spawania, z różnymi prądami pracy i w środowisku zadymionym oraz z pulsacją łuku spawalniczego.

W rozdziale dziesiątym Autor podsumował najważniejsze wyniki swoich analiz oraz wskazał główne osiągnięcia, stanowiące oryginalny wkład. Przedstawił również kierunki dalszych prac i plany badawcze związane z pogłębieniem mechanizmów zaobserwowanych zmian i rozrzutów wyników pomiarów.

Biorąc pod uwagę techniczną stronę pisania pracy, należy wskazać na szereg drobnych błędów edytorskich i literówek. Zastosowana przez Autora metodyka pisania, wprowadza pewną niespójność, wynikającą z grupowania rysunków i tabel w końcowej części rozdziałów, powodując trudność w czytaniu pracy, co jest szczególnie uciążliwe w analizie rozdziału szóstego, gdzie Doktorant zaprezentował wyniki pomiarów, a rysunki od 6.10 do 6.28 nie posiadają szczegółowych wyjaśnień i opisów oznaczeń oraz znajdują się na końcu rozdziału. Autor nie zachował również ciągłości struktury pracy w kontekście podsumowania poszczególnych rozdziałów. Podsumowanie występuje literalnie w rozdziale drugim oraz piątym. Wprawdzie w treści pozostałych rozdziałów Doktorant dokonał próby ich podsumowania, jednak nie są to wnioski płynące wprost z ich treści. Powyższe krytyczne uwagi techniczne nie stanowią ujmy merytoryce opisywanej w rozprawie, a jedynie wskazują na możliwość „doszlifowania” wizualnej strony pracy.

5. Ocena merytoryczna rozprawy

Problematyka rozprawy związana jest z szacowaniem niepewności wyników pomiaru promieniowania nadfioletowego źródeł technologicznych na potrzeby oceny zagrożeń fotobiologicznych. Dotychczasowe doniesienia literaturowe oraz normy techniczne wskazują, że rzetelna ocena niepewności wyniku pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowaniem nadfioletowym na stanowiskach pracy jest niezwykle ważna w ocenie zagrożenia dla zdrowia pracowników. Analizy literaturowe prowadzone przez Doktoranta wskazują, że zagadnienie niepewności wyników widmowego pomiaru natężenia napromienienia promieniowania łuku spawalniczego jest pomijane, bądź sprowadzane do prostych miar rozrzutu wyników natężenia napromienienia. Dodatkowo stwierdzono brak dostępnych doniesień naukowych podejmujących problematykę szacowania niepewności wyniku pomiaru promieniowania łuku spawalniczego, typowych składowych budżetu błędów i rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów.

W części opisowej problematyki (rozdział 5) Autor wskazał na szereg zjawisk i procesów, w których promieniowanie optyczne emitowane w trakcie spawania łukowego, w wyniku dynamiki zmian, zarówno widma, jak też natężenia napromienienia charakteryzuje się rozrzutem wyników pomiarów oraz nieregularnością i asymetrią rozkładu wyników. Standardowe metody szacowania niepewności są w takim przypadku niewystarczające, dlatego Autor zaproponował uszczegółowienie i właściwe modelowanie tego typu zjawisk, poprzez wykorzystanie metody Monte Carlo. Zidentyfikowane źródła błędów występujących podczas pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowania łuku spawalniczego, zaklasyfikowano do czterech kategorii błędów: instrumentalnych, obserwacji, metody i błędów środowiskowych. Autor opracował metody badań parametrów charakteryzujących poszczególne źródła błędów i zgodnie z tymi metodami zrealizował badania laboratoryjne źródeł błędów instrumentalnych oraz badania na stanowiskach spawalniczych źródeł błędów metody, obserwacji i środowiskowych. Na tej podstawie, w

większości przypadków zdefiniował parametry rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia tych błędów. Zwrócił uwagę na problem pulsacji łuku, zadymienia i zajarzenia, które są złożone i trudne w aspekcie odwzorowania i ustalenia rozkładów prawdopodobieństwa tych zjawisk. Doktorant zastosował kompromis, który umożliwia uwzględnienie tych błędów w analizie wyników.

Autor sformułował trzystopniowy model matematyczny pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia, który uwzględnia zidentyfikowane źródła błędów, a także stwierdził korelacje między źródłami błędów. Na tej podstawie opracował trzy modele wyznaczania niepewności złożonej wyniku pomiaru: metodą analityczną GUM, metodą symulacji Monte Carlo i metodą symulacji Monte Carlo rozszerzoną o metodę Bootstrap. W kolejnym kroku opracował algorytm oraz jego implementację komputerową uvMCM w środowisku Python, która pozwala na wyznaczenie niepewności rozszerzonej wyniku skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowania UV emitowanego przez łuk spawalniczy.

W części pomiarowej, Autor zaprojektował i zbudował stanowisko do badania skutecznego aktywnie natężenia napromienienia, z uwzględnieniem najczęściej stosowanych w praktyce przemysłowej technologii spawania MAG, MAG-P i MAG-DP. Wybrane technologie cechowały się możliwością modulacji prądu spawania od 70A do 240A i pojawianiem się pików promieniowania UV w regularnych odstępach czasu. Dodatkowo Autor uzbroił stanowisko badawcze w aparaturę pomiarową: spektrometr, szybki radiometr, laserowy analizator zapylenia oraz źródło odniesieniowe UV. Sumarycznie przeanalizował ponad 150 serii pomiarów promieniowania łuku spawalniczego. W każdej serii pomiarowej wykonywał 10 spektrometrycznych pomiarów skutecznego aktywnie natężenia napromienienia podczas pojedynczej sesji spawania tak, aby zachować warunki powtarzalności.

Opracowana przez Doktoranta metoda walidacji wyników działania algorytmu, polegała na przeprowadzeniu symulacji Monte Carlo + Bootstrap wykorzystując odpowiednio przygotowane serie danych spektralnych o rozkładzie wyników odpowiadającym rozkładowi normalnemu i wartościach odchylenia standardowego względnego odpowiednio 0,1%, 2%, 5% i 10%. Wyniki symulacji niepewności pomiaru autorską metodą zostały porównane z wynikami szacowania niepewności metodą analityczną GUM, prowadząc do uzyskania podobnych wyników niepewności rozszerzonej, niezależnie od rozkładu widma i odchylenia standardowego próby. Średnia różnica między wynikami niepewności rozszerzonej względnej, między metodami wyniosła 0,01%, zaś maksymalna różnica wyniosła 0,34%. Wysoka zgodność wyników niepewności rozszerzonej uzyskanych przy pomocy opracowanego algorytmu symulacji Monte Carlo+Bootstrap oraz metody analitycznej GUM potwierdziła poprawność implementacji opracowanego algorytmu do symulacji i wyznaczania niepewności pomiaru.

Do najważniejszych osiągnięć Autora, zrealizowanych i opisanych w rozprawie należy zaliczyć:

- identyfikację, szczegółowy opis i klasyfikację jedenastu źródeł błędów obciążających wynik pomiaru spektralnego skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowaniem nadfioletowym na stanowisku spawania łukowego, z wykorzystaniem spektrometru z matrycą detektorów oraz ustalenie ich rozkładów prawdopodobieństwa,

- opracowanie metod badań w celu ustalenia rozkładów prawdopodobieństwa zidentyfikowanych źródeł błędów, na podstawie których wykonano badania i określono parametry charakteryzujące te rozkłady,
- opracowanie trzystopniowego modelu matematycznego pomiaru, uwzględniającego zidentyfikowane poprawki do błędów oraz ich wzajemne korelacje,
- opracowanie trzech modeli szacowania niepewności standardowej złożonej pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowaniem nadfioletowym uwzględniającego korelację między źródłami błędów,
- opracowanie metody walidacji algorytmu aplikacji uvMCM i weryfikacji wyników niepewności pomiarów wyznaczanych przez aplikację,
- opracowanie autorskiej metody do pomiaru pulsacji łuku i zajarzenia łuku spawalniczego, wykorzystującej połączenie pomiarów wykonywanych szybkim radiometrem i spektrometrem matrycowym,
- wykonanie aplikacji komputerowej Radiometr do analizy zarejestrowanych danych pulsacji i zajarzenia łuku spawalniczego,
- opracowanie miary wpływu wybranego źródła błędów na niepewność złożoną wyniku pomiaru,
- wykonanie symulacji dla wyników wybranych serii pomiarów uwzględniające różne warianty konfiguracji źródeł błędów i przeprowadzenie analizy otrzymanych wyników,
- wskazanie źródła błędów determinujących niepewność rozszerzoną wyniku pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia promieniowania łuku spawalniczego.

6. Uwagi krytyczne

- 1) Autor używa pojęcia „spektrometr matrycowy”, co sugeruje macierzową charakterystykę detekcji. Czy w rzeczywistości jest to spektrometr z linijką detektorów czy spektrometr z matrycą detektorów i układem optycznym do pomiaru przestrzennego?
- 2) Opis zmienności i dynamiki emisji promieniowania wysyłanego przez łuk spawalniczy został opisany przez Doktoranta w dziedzinie czasu i częstotliwości. Szczególnie początkowy charakter zmian emisji łuku jest bardzo ciekawy. Czy istniała możliwość głębszego przeanalizowania procesu formowania się łuku i jego pracy na drodze analizy obrazowej np. kamerą smugową, w funkcji geometrii procesu, prądu pracy itp.? Czy taka analiza wniosła by znaczące informacje do ustalenia rozkładu prawdopodobieństwa błędów?
- 3) W opisie zaproponowanych stanowisk pomiarowych Autor przedstawił rysunki poglądowe lokalizacji wzajemnej aparatury, względem miejsca powstawania łuku. Zdaniem recenzenta opis ten jest nieprecyzyjny, ponieważ wskazuje na położenie katowe tylko w jednej płaszczyźnie, zaś z zaprezentowanego opisu wynika, że głowice pomiarowe rozmieszczono przestrzennie. Czy możliwe jest doprecyzowanie położenia wertykalnego i horyzontalnego?

- 4) Na jakiej podstawie przyjęto kąt obserwacji łuku przez głowice pomiarowe radiometru i spektrometriem na poziomie 6° ? Czy przeprowadzono ocenę przy innych ustawieniach kątowych głowic? Czy istotna jest charakterystyka przestrzenna, czy wystarczy sprowadzenie analizy do jednego kąta obserwacji?
- 5) Dlaczego przyjęto jako źródło pomocnicze diodę LED? W jaki sposób była ona zasilana i sterowana? Czy źródłem pomocniczym mogło być inne źródło światła?
- 6) Ocena wpływu zadymienia oparła się na zastosowaniu laserowego analizatora zadymienia. Dlaczego przyjęto lokalizację głowicy pomiarowej w okolicach źródła pomocniczego, a nie w okolicach głowicy pomiarowej? Czy rozdzielczość pomiaru 6s była wystarczająca? Czy pomiar był synchronizowany czasowo z pomiarami spektralnymi?
- 7) Porównanie niepewności rozszerzonej wyznaczonej metodą GUM i Monte Carlo + Bootstrap wskazuje na zaniżanie wartości niepewności przy użyciu metody MC+B. Czy i kiedy nastąpić może zawyżenie tych wartości?

7. Podsumowanie

Podsumowując uważam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej pt.: „*Determinanty niepewności pomiaru promieniowania UV źródeł technologicznych*”, Doktorant wykazał się szerokim zakresem wiedzy, potwierdził umiejętność korzystania z literatury naukowej, poprawnego wnioskowania oraz tworzenia i weryfikacji programów badawczych. Doktorant prawidłowo zdefiniował problem badawczy i stosując adekwatne metody badawcze ów problem rozwiązał. Wykazał się również umiejętnościami analizy materiału badawczego, wnikliwej jego krytyki, zastosowania i rozwijania metod naukowych oraz kreacji nowych modeli rozwiązań. **Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.**

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr. inż. Andrzeja Rybczyńskiego spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018r. poz. 1668 z późn. Zm.) i **wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Dodatkowo, biorąc pod uwagę znaczący wkład badawczy, projektowy i programistyczny, osiągnięte rezultaty, a także dorobek publikacyjny, **stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy** pt.: „*Determinanty niepewności pomiaru promieniowania UV źródeł technologicznych*”

05.06.2023

