

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Rybczyńskiego
nt.: "Determinanty niepewności pomiaru promieniowania UV źródeł tech-
nologicznych"

1. Tematyka rozprawy

Powszechnie wiadomo, że promieniowanie nadfioletowe występuje w przyrodzie jako naturalny składnik promieniowania słonecznego ale również wytwarzane jest w sposób sztuczny przez człowieka i wykorzystywane w różnych procesach technologicznych. Równocześnie często występuje jako niepożądany uboczny produkt działalności technicznej człowieka np.: podczas spawania łukowego, spawania gazowego, cięcia łukiem plazmowym, cięcia tlenowego, natryskiwania cieplnego oraz elektrodrażenia. Często stanowi ono duże zagrożenie dla człowieka. Wynika stąd konieczność oceny poziomu narażenia pracowników na promieniowanie nadfioletowe. Do określenia tego poziomu niezbędne jest wykonanie odpowiednich pomiarów. Okazuje się jednak, że dokonanie prawidłowego pomiaru natężenia promieniowania nadfioletowego na konkretnym stanowisku pracy bynajmniej nie jest zadaniem trywialnym. Na dokładność pomiaru wpływa wiele różnorodnych czynników, których udział może ulegać zmianom nawet podczas trwania pojedynczego cyklu pomiarowego. Okazuje się, że efekt ten wcale nie jest powszechnie uwzględniany w pomiarach. Stosuje się zwykle jeden, prosty model wyznaczania niepewności pomiaru, walidowany dla stabilnych źródeł promieniowania. W tym kontekście należy stwierdzić, że Doktorant podjął bardzo śmiałą, nowatorską próbę szacowania niepewności pomiaru poziomu promieniowania nadfioletowego z wykorzystaniem metody Monte Carlo oraz wskazania wszystkich głównych czynników wpływających na tę niepewność. Ograniczył swoje badania do promieniowania nadfioletowego występującego podczas spawania łukowego, ze względu na dobrą reprezentację większości źródeł błędów charakterystycznych dla pomiarów promieniowania UV, a także wysoki poziom niepewności wyniku pomiaru na stanowisku pracy.

Taki wybór tematu pracy dobrze rokuje, trzeba jednak mieć świadomość, że ma także swoje ujemne strony. Polegają one na tym, że Autor godzi się na to, że jego dokonania porównywane będą z osiągnięciami wytrawnych, doświadczonych badaczy, od lat publikowanymi w obszernej literaturze dotyczącej pomiarów promieniowania optycznego. Należy rozumieć, że Autor godzi się na te warunki.

Zgodnie z deklaracją złożoną przez Autora, nadrzędnym celem Jego badań było „*opracowanie algorytmu i narzędzi do szacowania i analizy źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania UV łuku spawalniczego, ułatwiających weryfikację oceny zagrożenia fotobiologicznego*”.

Praca zawiera dwie tezy, przytoczone tu w wersji autorskiej:

1. *Zastosowanie metody Monte Carlo ,umożliwia zaawansowane modelowanie rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania UV łuku spawalniczego,*
2. *Opracowany algorytm pozwala na analizę źródeł błędów pomiaru ułatwiającą weryfikację oceny zagrożenia fotobiologicznego promieniowaniem UV.*

2. Zawartość pracy

Tekst pracy podzielony jest na 10 rozdziałów.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie i zawiera rozważania ogólne dotyczące problematyki promieniowania optycznego, w tym promieniowania ultrafioletowego, źródeł promieniowania ultrafioletowego, w tym spawania łukiem elektrycznym, wynikających stąd zagrożeń dla zdrowia, w tym dopuszczalnego poziomu ekspozycji, pomiaru natężenia promieniowania, w tym szacowania niepewności pomiaru.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury w zakresie: oddziaływania biologicznego promieniowania nadfioletowego, charakterystyki łuku spawalniczego jako źródła promieniowania UV, stanu prawnego dotyczącego oceny zagrożenia promieniowaniem optycznym, metod oceny oraz pomiaru zagrożenia fotobiologicznego, rodzajów błędów pomiarów oraz ogólnych zasad szacowania niepewności pomiaru. Przytoczone jest też przekonujące uzasadnienie wyboru źródła technologicznego emitującego silne promieniowanie UV.

W rozdziale 3 dokonana została skrupulatna analiza metod szacowania niepewności pomiaru za pomocą trzech niezależnych metod GUM, Monte Carlo oraz Monte Carlo + Bootstrap.

Rozdział 4 to przede wszystkim cel i tezy pracy, przytoczone w poprzednim punkcie recenzji. Ponadto jest tam zawarte szerokie uzasadnienie wyboru spawania łukowego jako obiektu badań.

W rozdziale 5 przedstawione zostały źródła błędów pomiaru promieniowania łuku spawalniczego; Wybór aparatury pomiarowej umożliwiającej pomiar natężenia napromienienia źródeł pulsacyjnych; Identyfikacja źródeł błędów wpływających na wynik pomiaru skutecznego aktywnie natężenia promieniowania łuku spawalniczego za pomocą spektrometru z matrycą detektorów.

W rozdziale 6 analizowane są metody oceny poszczególnych źródeł błędów, chronologia wykonania badań i wyznaczenie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa cechujących poszczególne źródła błędów. Zawarty jest też opis autorskiej metody pomiaru pulsacji promieniowania łuku spawalniczego.

Rozdział 7 zawiera opis modeli matematycznych wyznaczania niepewności złożonej pomiaru, w tym rozszerzonego równania pomiaru uwzględniającego współczynniki poprawkowe oraz błędy losowe. Badania dotyczą trzech modeli matematycznych wyznaczania niepewności złożonej zdefiniowanych w rozdziale 3 (analityczny GUM, Monte Carlo oraz Monte Carlo + Bootstrap).

W rozdziale 8 omówione są opracowane przez Doktoranta narzędzia programistyczne: aplikacji UVMCM do symulacji i obliczeń niepewności pomiarów metodą Monte Carlo oraz Monte Carlo+Bootstrap; Oprogramowanie do analizy pulsacji promieniowania łuku spawal-

niczego; algorytmy do obliczeń niepewności pomiaru zgodnie z modelem matematycznym GUM; metoda walidacji wyników niepewności pomiaru wyznaczanych w aplikacji UVMCM.

Rozdział 9 stanowi jądro rozprawy. Zawiera opis głównych wyników prac Autora z naciskiem na determinanty niepewności pomiaru emisji promieniowania łuku spawalniczego; Analizę uzyskanych wyników badań (skutecznego aktywnie natężenia napromienienia dla różnych metod i parametrów spawania, niepewności rozszerzonej wyniku pomiarów metodą GUM, metodą Monte Carlo + Bootstrap, porównanie niepewności rozszerzonej wyznaczonej tymi dwoma metodami).

Rozdział 10 to bardzo wyczerpujące podsumowanie, interpretacja uzyskanych wyników, autorski wykaz osiągnięć oraz wskazanie kierunków dalszych prac i badań. W szczególności, określenie oddziaływania pojedynczych źródeł błędów na niepewność rozszerzoną oraz wyznaczenie determinantów niepewności złożonej wyniku pomiaru skutecznego aktywnie natężenia napromienienia.

Dalej zamieszczony jest bardzo cenny wykaz skrótów i oznaczeń wykorzystanych w pracy. Bibliografia zawiera 102, starannie dobrane pozycje. Załączniki zawierają 7 pozycji. Dołączona jest płytka CD jako nośnik danych i oprogramowania.

3. Główne osiągnięcia Doktoranta

Zachowując chronologię osiągnięć Doktoranta warto zacząć od autorskiego przeglądu dostępnej literatury, związanej z metodami szacowania niepewności pomiaru. Autor przeprowadził go tak, aby w konsekwencji wybrać do analizy te metody, które pozwolą na uwzględnienie wszystkich zidentyfikowanych źródeł błędów oraz losowych zjawisk takich jak pulsacja i jarzenie łuku. Wykazał, że w literaturze zagadnienie niepewności wyników widmowego pomiaru natężenia promieniowania łuku spawalniczego jest pomijane, bądź sprowadzane do prostych miar rozrzutu wyników pomiaru. Co wydaje się dziwne, stwierdził brak publikacji dotyczących problematyki szacowania niepewności pomiaru promieniowania łuku spawalniczego, typowych składowych rachunku błędów i ich rozkładów prawdopodobieństwa.

W drugiej kolejności warto wymienić szereg racjonalnych decyzji, podjętych jeszcze na etapie wstępnych działań. Jako obiekt badań Doktorant wybrał proces spawania łukowego ze względu na powszechność stosowania, dobrą reprezentację większości źródeł błędów charakterystycznych dla pomiarów promieniowania UV, a także wysoki poziom niepewności wyniku pomiaru. Analizę źródeł błędów przeprowadził dla spektrometri z matrycą detektorów. Ten wybór z kolei, podyktowany był uniwersalnością metody pomiaru.

W trakcie badań, Doktorant potwierdził, że promieniowanie emitowane w podczas procesu spawania łukowego cechują zjawiska takie jak rozbłysk, pulsacja oraz zmiany natężenia promieniowania w trakcie samego procesu spawania. Podkreślił dobitnie, że te właśnie czynniki powiększają rozrzut wyników pomiaru. Uzasadnił tym wymóg zastosowania metody szacowania niepewności, która umożliwi właściwe modelowanie występujących tam zjawisk, jaką właśnie w Jego opinii jest metoda Monte Carlo.

Dzięki prowadzeniu bardzo wnikliwej analizy zdefiniował aż 11 źródeł błędów występujących podczas pomiaru skutecznego aktywnie natężenia promieniowania łuku spawalniczego (*wzorcowania, odjęcia prądu ciemnego, nieliniowości detektora, szumu detektora, wyzna-*

czania długości fali, obecności światła rozproszonego, pomiaru odległości od źródła, pomiaru kąta obserwacji, pulsacji łuku, zajarzenia łuku i zadymienia). Podzielił je na cztery rozłączne kategorie błędów: instrumentalne, obserwacji, metody oraz środowiskowe. Opracował metody badania parametrów charakteryzujących poszczególne źródła błędów i zgodnie z tym, wykonał badanie źródeł błędów instrumentalnych w warunkach laboratoryjnych, a badanie źródeł błędów metody, obserwacji i środowiskowych, na stanowiskach spawalniczych! Na tej podstawie zdefiniował parametry rozkładów prawdopodobieństwa tych błędów, mając jednocześnie świadomość ich ograniczeń w procesie analizy! Niemniej jednak wykazał, że wykorzystanie tych danych umożliwia lepsze odwzorowanie wpływu wyżej wymienionych zjawisk losowych na wyniki pomiarów.

Opracował trzy podstawowe modele wyznaczania niepewności złożonej wyniku pomiaru: analityczny GUM, symulacji Monte Carlo i symulacji Monte Carlo rozszerzony o metodę Bootstrap (Monte Carlo+ Bootstrap). Na podstawie ostatniego modelu opracował algorytm oraz aplikację komputerową „uvMCM”, do wyznaczania niepewności rozszerzonej wyniku pomiaru natężenia promieniowania UV emitowanego przez łuk spawalniczy. Tym samym osiągnął zasadniczy cel pracy: *opracowanie algorytmu do szacowania i analizy źródeł błędów pomiaru spektrometrycznego promieniowania UV łuku spawalniczego*.

Stwierdził jednocześnie, że w przypadku rozkładów wyników pomiaru odbiegających od normalnego oraz charakteryzujących się asymetrycznością, szczególnie istotne jest zastosowanie symulacji typu Bootstrap, gdyż wówczas uwzględnione jest wzajemne oddziaływanie na siebie błędów losowych, czego nie daje zastosowanie samej metody Monte Carlo! Poza tym Doktorant udowodnił, że w przypadku dużych rozrzutów wyników i niesymetrycznych rozkładów, błędy o charakterze losowym pochodzące np. od pulsacji i zadymienia, mają największy udział w szacowanej niepewności pomiaru! Potwierdza to tezę, że opracowany algorytm umożliwia analizę źródeł błędów wyniku pomiaru ze wskazaniem na źródła błędów determinujących niepewność wyniku pomiaru.

Opracował też ciekawą metodę testowania algorytmu, która polegała na przeprowadzeniu symulacji Monte Carlo+Bootstrap, z wykorzystaniem odpowiednio przygotowanych serii danych. Wyniki symulacji niepewności pomiaru metodą MC+B porównał z wynikami szacowania niepewności metodą analityczną GUM. Obie metody dały podobne wyniki. Zgodność wyników potwierdziła poprawność działania opracowanego algorytmu. Stąd wysnuł wniosek, że użycie metody Monte Carlo umożliwia zaawansowane modelowanie rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów pomiaru promieniowania UV łuku spawalniczego.

Na podstawie oceny oddziaływania poszczególnych źródeł błędów na niepewność rozszerzoną wyniku pomiaru Doktorant wskazał źródła błędów o największym znaczeniu. Stwierdził, że niepewność wyniku pochodzącego z serii pomiarów, o stosunkowo niewielkim rozrzucie i rozkładzie normalnym, jest determinowana głównie przez błąd wyznaczenia odległości od łuku spawalniczego oraz błąd wzorcowania spektrometru. Podkreślił dominujące znaczenie błędów o charakterze losowym, w kontekście dużej niestabilności procesu spawania i po raz kolejny podkreślił, że najlepszą metodą do wyznaczania niepewności złożonej pomiaru jest właśnie metoda Monte Carlo+Bootstrap. Nie zwalnia to jednak od wykonania

jak największej liczby pomiarów, w celu zapewnienia możliwie dokładnej reprezentacji błędów losowych.

Opracowane przez Doktoranta narzędzie, jakim jest aplikacja uvMCM, umożliwia dokonanie oceny zagrożenia fotobiologicznego, na podstawie znajomości wartości natężenia promieniowania oraz niepewności pomiaru, która uwzględnia wszystkie zidentyfikowane źródła błędów. Oznacza to, że zdefiniowany cel pracy został osiągnięty.

Po dokładnym przestudiowaniu rozprawy i opisów zawartych w niej koncepcji stwierdzam, że praca w dość oczywisty sposób nawiązuje do badań i rozwiązań znanych z literatury. Jednak stwierdzam także, że Doktorant zdołał wnieść do przedmiotu swoje własne oryginalne i nowatorskie badania, przemyślenia i koncepcje, które stanowią milowy krok do przodu w zakresie algorytmów szacowania niepewności pomiaru parametrów promieniowania UV związanego z wyładowaniem łukowym. Postawione w pracy cele szczegółowe oraz główny cel naukowy zostały w pełni osiągnięte. Opracowana metoda szacowania niepewności pomiarów promieniowania łukowego Monte Carlo+Bootstrap, bazująca na modelowaniu rozkładów prawdopodobieństwa źródeł błędów, jak również uzyskane wyniki symulacji wskazujące źródła błędów o największym udziale w niepewności wyniku pomiaru, potwierdzają słuszność postawionych tez. Reasumując należy potwierdzić wykaz osiągnięć Doktoranta takich jak:

1. Dokonanie identyfikacji jedenastu źródeł błędów obciążających wynik pomiaru natężenia promieniowania nadfioletowego powstałego w trakcie spawania łukowego oraz oszacowanie ich rozkładów gęstości prawdopodobieństwa i wskazanie najbardziej znaczących w konkretnych zastosowaniach;
2. Dokonanie racjonalnego podziału błędów na cztery kategorie: metody, instrumentalne, obserwacji i środowiskowe;
3. Opracowanie trzystopniowego modelu matematycznego pomiaru, z uwzględnieniem poprawek od zidentyfikowanych błędów oraz wzajemnych korelacji między nimi;
4. Opracowanie trzech modeli szacowania niepewności złożonej pomiaru natężenia promieniowania UV, metodą: analityczną wg. przewodnika gum), Monte Carlo oraz autorską Monte Carlo+Bootstrap;
5. Opracowanie autorskiej aplikacji komputerowej o nazwie uvMCM, z implementacją modeli Monte Carlo oraz Monte Carlo+Bootstrap oraz metody jej efektywnego testowania jak i weryfikacji uzyskanych wyników niepewności pomiarów;
6. Opracowanie autorskiej metody pomiaru pulsacji i zajarzenia łuku spawalniczego przez połączenie pomiarów wykonywanych szybkim radiometrem i spektrometrem matrycowym;
7. Wypracowanie miary liczbowej, opisującej wpływ poszczególnych źródeł błędów na szacowaną niepewność złożoną wyniku pomiaru natężenia promieniowania UV;
8. Wykonanie symulacji dla zbioru wyników wybranych serii pomiarów z uwzględnieniem różnych konfiguracji źródeł tych błędów i analiza otrzymanych wyników;

Ponadto w spisie literatury, wymienione są cztery znaczące publikacje Doktoranta, ściśle związane z tematyką rozprawy. Jedna z nich zamieszczona jest w czasopiśmie międzynarodowym, trzy na konferencjach międzynarodowych i jedna na konferencji krajowej. We wszystkich czterech pracach Doktorant jest pierwszym współautorem.

4. Uwagi krytyczne i pytania

Pierwiastek subiektywizmu, nieodłącznie towarzyszący każdej ocenie cudzego dorobku skłania do sformułowania pytań i uwag krytycznych.

4.1. Uwagi ogólne

1. Sama tematyka badań prowadzonych przez Autora (szacowanie niepewności pomiaru) jest niezwykle wąska, natomiast zawartość informacyjna pracy jest bardzo wysoka. Odnosi się wrażenie, że pewne elementy tej pracy zostały rozbudowane ponad miarę i mogłyby zostać nieco skompresowane bez uszczerbku informacyjnego.
2. W pracy występują powtórzenia tych samych treści, co być może ułatwia czytelnikowi zrozumienie, ale powiększa objętość pracy. Przykładowo, zdania zamieszczone w dwu sąsiednich akapitach (Rozdz.1, str.4):
 - a. *Na niepewność pomiaru emisji promieniowania w procesie spawania łukowego wpływa wiele czynników, często skorelowanych ze sobą, których udział w wartości mierzonego parametru może ulegać zmianie w trakcie trwania pomiaru.*
 - b. *Na niepewność pomiaru emisji promieniowania w procesie spawania łukowego wpływa wiele czynników, często skorelowanych ze sobą, których udział dodatkowo może ulegać zmianie w trakcie trwania pomiaru.*
3. W pracy brak praktycznej recepty typu „front-end” do prowadzenia procesu pomiarowego na stanowisku spawalniczym.
4. Doktorant w swoich badaniach wykorzystuje klasyczny przenośny spektrometr z matrycą detektorów. Jak zmieniłaby się sytuacja związana z samymi pomiarami oraz analizą niepewności pomiarów po zastosowaniu, wspomnianego w pracy, stacjonarnego spektrometru z monochromatorem skanującym?
5. W ostatnim zdaniu zasadniczego tekstu pracy Doktorant stwierdza, że „*Opracowany algorytm i model propagacji niepewności stanowi dobrą podstawę do dalszych prac zmierzających do rozszerzenia funkcjonalności aplikacji o kolejne wielkości wykorzystywane do oceny zagrożeń fotobiologicznych w zakresach VIS i IR promieniowania optycznego*”. Czy Doktorant dostrzega możliwość uogólnienia opracowanej metodyki badań i rozszerzenia zastosowań na inne przypadki/dziedziny, np. nie związane z promieniowaniem optycznym?

4.2. Uwagi szczegółowe

1. Czy sformułowanie „...natężenie napromienienia promieniowania łuku spawalniczego...” jest poprawne pod względem merytorycznym i gramatycznym ?
2. W pracy występuje termin „menzurand” w miejsce tradycyjnego „mezurand”. Proszę uzasadnić, że taka zamiana ma sens merytoryczny.
3. Praca zawiera dość pokaźny zbiór błędów literowych. Pojawiają się też personifikacje.

5. Konkluzja.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska jest pracą o wysokim poziomie merytorycznym. Autor uzyskał szereg wyników o dużym znaczeniu tak w zakresie naukowym, jak i praktycznym. Wykazał bardzo dobre rozeznanie w zakresie metodyki pomiarów promieniowania optycznego. Widać wyraźnie, że zmodyfikowana metoda szacowania niepewności pomiaru z użyciem wzbogaconej metody Monte Carlo, którą Doktorant proponuje jest szczegółowo dopracowana i sprawdzona. Praca jest nastawiona na realne potrzeby praktyki, które doktorant zna i czuje. Opracował nowatorską metodę szacowania i wyznaczania czynników determinujących niepewność wyniku pomiaru skutecznego aktywnie natężenia promieniowania nadfioletowego łuku spawalniczego. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne, nie rzutują w sposób znaczący na merytoryczną ocenę pracy.

W konkluzji stwierdzam, że praca mgr inż. Andrzeja Rybczyńskiego spełnia z nawiązką wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę niezwyklej wnikliwość badawczą wykazaną przez Autora, bardzo szeroki zakres wykonanych prac, nowatorski charakter dużej części badań oraz praktyczne znaczenie uzyskanych wyników, składam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.

