

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego
Uniwersytetu Morskiego w Gdyni**

Tytuł rozprawy: Efektywne metody oceny jakości montażu modułów elektronicznych i narzędzia wspomagające proces naprawy tych modułów

Autor rozprawy: mgr inż. Wojciech Kowalke

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Przemysław Ptak, prof. UMG

1. Podstawa prawna recenzji

Podstawą przygotowania niniejszej recenzji jest Uchwała nr 8/2025 Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 27 lutego 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Kowalke i pisma Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, prof. Piotra Jankowskiego.

2. Jakie zagadnienie naukowe rozpatrzono w pracy i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Kowalke „*Efektywne metody oceny jakości montażu modułów elektronicznych i narzędzia wspomagające proces naprawy tych modułów*” wpisuje się w niełatwą formułę doktoratu wdrożeniowego, w którym badania naukowe są łączone z praktycznymi potrzebami otoczenia społeczno-gospodarczego. Spośród wielu wątków, które można wyróżnić w recenzowanej rozprawie do najważniejszych należy zaliczyć:

- a) określenie wpływu wybranych czynników na właściwości termiczne tranzystorów RF,
- b) analizę czynników produkcyjnych wpływających na czas życia wybranych modułów elektronicznych,
- c) opracowanie narzędzi wspierających diagnostykę modułów elektronicznych,
- d) opracowanie efektywnych algorytmów prognozowania obciążenia działu napraw w przedsiębiorstwie wytwarzającym moduły elektroniczne.

Doktorant na str. 11 zaproponował następujące trzy tezy:

1. Nie występuje statystycznie istotna korelacja pomiędzy rozmiarami pustek lutowniczych w spoinie lutowniczej pod padem termicznym a wartościami parametrów cieplnych przylutowanych tranzystorów mocy.
2. Możliwe jest opracowanie metod efektywnego diagnozowania uszkodzeń w montażu układów elektronicznych spowodowanych błędami montażu przy wykorzystaniu metod statystycznych i rzeczywistości rozszerzonej.
3. Zastosowanie modeli opartych na wykorzystaniu sztucznej inteligencji pozwala skutecznie przewidzieć obciążenie działu napraw niesprawnymi modułami z tygodniowym wyprzedzeniem.

Celem wykazania powyższych tez Autor rozprawy zrealizował dziesięć zadań cząstkowych:

1. Przeanalizował metody monitorowania, kontroli i redukcji liczby uszkodzeń występujących w procesie produkcji;
2. Oceniał wybrane sposoby monitorowania i kontroli redukcji ryzyka związanego z pojawianiem się materiału niezgodnego, będącego wynikiem ustawionego procesu lub komponentów niskiej jakości użytych do produkcji urządzeń elektronicznych;
3. Przeanalizował metody i narzędzia do praktycznego diagnozowania układów elektronicznych;
4. Zbudował stanowisko pomiarowe do wyznaczania parametrów cieplnych tranzystorów mocy zamontowanych na testowanych płytkach obwodów drukowanych;
5. Określił jakość wykonanych połączeń lutowanych przy wykorzystaniu tomografii rentgenowskiej;
6. Zmierzył parametry cieplne badanych tranzystorów mocy RF dla różnych warunków ich pracy;
7. Dokonał analizy korelacji między parametrami procesu montażu i parametrami cieplnymi badanych tranzystorów;
8. Przeprowadził analizy statystyczne opisujące zależność parametrów termicznych tranzystorów mocy RF od parametrów procesu montażu i ich położenia na płycie obwodu drukowanego;
9. Zdefiniował wymagania dla nowego narzędzia do diagnostyki uszkodzeń - inspectAR;
10. Opracował i zweryfikował algorytmy umożliwiające predykcję liczby modułów wymagających naprawy na poszczególnych etapach procesu produkcyjnego.

Kolejne etapy badań zostały opisane w 13 rozdziałach. W rozdziale 1 Autor uzasadnia podjęcie tematu oraz zamieszcza cel, tezy i zakres rozprawy. W rozdziale drugim, na tle doniesień literaturowych, Doktorant prezentuje doświadczenia własne w zakresie zarządzania materiałem niezgodnym. Kolejny rozdział przedstawia metody statystyczne przydatne w analizie jakości montażu modułów elektronicznych. Rozdziały 4-7 zawierają wyniki pomiarów właściwości cieplnych tranzystorów mocy zamontowanych w testowanych modułach elektronicznych wraz z ich analizą statystyczną. Rozdziały 8 i 9 przedstawiają system inspectAR, który został wykorzystany do analizy uszkodzeń powstających przy wytwarzaniu modułów elektronicznych. Rozdziały końcowe, czyli rozdziały od 10 do 12, dotyczą zagadnienia efektywnego prognozowania obciążeń działu napraw. Zawierają one opis autorskich modeli predykcyjnych wraz z ich weryfikacją, bazującą na danych z rzeczywistej linii produkcyjnej. Większość rozdziałów kończy się wnioskami cząstkowymi, podnoszącymi się do poruszanych w nich zagadnień. Natomiast podsumowanie całej pracy wraz z krótką propozycją dalszych potencjalnych badań znajduje się w rozdziale 13.

3. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny, inny)?

Trudno jednoznacznie określić charakter rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kowalke. Niewątpliwie przy analizie jakości montażu modułów elektronicznych dominuje charakter eksperymentalny, głównie pomiarowy po czym do głosu dochodzą analizy statystyczne.

W badaniach dotyczących czynników produkcyjnych wpływających na czas życia wybranych modułów elektronicznych dominują analizy związane z zasadami organizacji produkcji modułów/urządzeń elektronicznych prowadzących do uzyskania wysokiej niezawodności produkcji w skali masowej. Autor uwzględnił m.in. uzysk, kontrolę jakości na każdym etapie wytwarzania wyrobu, możliwe uszkodzenia materiałowe i procesowe w procesie produkcji, metody kontroli jakości połączeń lutowanych oparte na automatycznych systemach optycznych i automatycznej kontroli rentgenowskiej, różne testy funkcjonalne weryfikujące działanie wytworzonego wyrobu oraz określenie sposobu reali-

zacji procesu naprawy układów elektronicznych celem przywrócenia wytwarzanemu produktowi takiej jakości, aby mógł on zostać dopuszczony do sprzedaży. Na bazie powyższych analiz Autor rozprawy przedstawia system inspectAR, czyli system wspierający diagnostykę modułów elektronicznych, który bazuje na rzeczywistości rozszerzonej. Autor uczestniczył w pracach nad tym systemem, który pozwala odnaleźć dowolny komponent w badanym module i szybko uzyskać niezbędne informacje na jego temat.

Natomiast do opracowania efektywnych algorytmów predykcji obciążenia działu napraw Doktorant zastosował podejście analityczne. Zaproponował dwa modele przewidywania wielkości stosu napraw deterministyczny i bazujący na uczeniu maszynowym. Model deterministyczny bazuje na danych historycznych charakteryzujących skuteczność napraw, liczbie wyprodukowanych modułów różnych typów, liczbie modułów oczekujących na naprawę oraz liczbie modułów planowanych do wytworzenia. Model został zweryfikowany na przykładzie danych produkcyjnych z okresu trzech miesięcy. Uzyskano zadowalającą dokładność przewidywań wielkości stosu napraw przy wykorzystaniu danych historycznych z okresu ośmiu tygodni. Drugi z modeli, który do tego celu wykorzystuje uczenie maszynowe, ma jednak przewagę nad modelem deterministycznym.

4. Czy w rozprawie w sposób właściwy przeprowadzono analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy Autora?

Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący? Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

W odróżnieniu od większości znanych mi rozpraw doktorskich w rozprawie mgr inż. Wojciecha Kowalke nie ma wyraźnego podziału na część przeglądową i wyniki prac własnych. Zagadnienia te wzajemnie się przenikają. Jest to o tyle zrozumiałe, że rozprawa jest wielowątkowa i tym samym w ujęciu klasycznym wymagałaby kilku odrębnych części przeglądowych, odnoszących się do każdego z wątków. Niemniej jednak Doktorant wykorzystał w rozprawie łącznie informacje ze 143 pozycji (8, w których jest współautorem i 135 innych prac). W większości są to artykuły z czasopism lub materiałów pokonferencyjnych. Ale można tam także znaleźć odwołania do poradników, skryptów, norm lub not katalogowych. Około 36 % cytowanych prac opublikowano w latach 2020-2024, czyli ostatnim pięcioleciu. Kolejnych 27 % pochodzi z lat 2015-2019. Należy zauważyć, że jest to bardzo rzetelna podbudowa do prac własnych Doktoranta. Przedstawione wyniki studiów literaturowych świadczą o umiejętności korzystania z istniejącej wiedzy, ale także, co ważniejsze, o umiejętności wyciągania z niej właściwych wniosków. Przytoczona liczba wykorzystanych pozycji jak i daty ich opublikowania bezwzględnie przekonują, że tematyka rozprawy jest jak najbardziej aktualna.

5. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie? Czy użył do tego właściwych metod i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Pierwszym celem badań Doktoranta był wpływ niedoskonałości procesu lutowania na parametry termiczne tranzystorów mocy BLC10G22LS-240PVT i BLC9G22LS-160VT stosowanych w obwodach o częstotliwości radiowej. W szczególności analizowano wpływ mocy wydzielanej w tych tranzystorach na temperaturę ich obudowy przy różnej wielkości pustek obecnych w obszarze lutowania. Dodatkowo sprawdzono wpływ wielkości pustek w złączu lutowniczym na rozkład temperatury na powierzchni tranzystorów. Bazując na uzyskanych wynikach oszacowano zmiany czasu życia w zależności od rozmiarów pustek. Tranzystory na płytce obwodu drukowanego zamontowano w procesie

lutowania rozpliwowego. Wykorzystano w tym celu pastę SAC 305. Wielkość pustek określono stosując inspekcję rentgenowską w dostępnym w przedsiębiorstwie systemie DAGE: XD7600NT i do szczegółowych analiz wzięto takie tranzystory, dla których co najmniej jedno z wymagań odnośnie rozmiarów pustki nie było spełnione. Parametry termiczne tranzystorów niespełniających wymagań odnośnie wielkości pustek lutowniczych określono mierząc ich rezystancję termiczną. Wykorzystano pośrednią metodę termiczną, często stosowaną przez pracowników Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Temperaturę obudowy zmierzono kamerą termograficzną. Zaobserwowano istotne różnice rezystancji termicznej poszczególnych tranzystorów. Do analizy zmian czasu życia badanych tranzystorów wykorzystano model Arrheniusa przy czym Autor powiązał temperaturę wnętrza struktury z mocą wydzielaną w tranzystorze. Do oceny, czy istnieje statystycznie istotna korelacja między rozmiarami pustek w spoinie lutowniczej a rezystancją termiczną badanych tranzystorów wykorzystano aplikację Minitab. Analiza ta wykazała brak korelacji między wielkością pustek a rezystancją termiczną. Natomiast istotne jest położenie tranzystora na płytce obwodu drukowanego. Opisane powyżej działania, które oceniam jako adekwatne do analizowanego problemu, pozwoliły na udowodnienie pierwszej tezy rozprawy.

Przed wykazaniem słuszności drugiej tezy Pan mgr inż. Wojciech Kowalke zwrócił uwagę, że w ogólnie dostępnej literaturze przedmiotu brakuje informacji o zasadach organizacji produkcji masowej modułów elektronicznych zapewniających uzyskanie ich wysokiej niezawodności. Dlatego przeanalizował zagadnienia związane z:

- wskaźnikami i normami jakości przy wytwarzaniu urządzeń elektronicznych,
- uszkodzeniami powiązаныmi z wadami procesu montażu oraz z właściwościami wykorzystywanych materiałów i komponentów elektronicznych,
- systemami do testowania jakości wytwarzanego wyrobu po kolejnych operacjach montażu oraz po zakończeniu montażu,
- wybranymi informacjami na temat diagnozowania uszkodzeń i wykonywania napraw modułów elektronicznych,
- powiązaniem zagadnień technicznych i ekonomicznych dotyczących napraw układów elektronicznych równolegle do ich produkcji.

Dlatego we współpracy firm Flex i Cadence oraz Uniwersytetu Morskiego w Gdyni został opracowany nowy system wspomagający diagnostykę modułów elektronicznych pod nazwą inspectAR, który ułatwia odnalezienie dowolnego komponentu w badanym module i szybkie uzyskanie niezbędnych informacji na jego temat. Bazując na technologii rozszerzonej rzeczywistości aplikacja inspectAR pozwala na szybki i wizualny dostęp do danych projektowych, schematów układów wykonywanych na płytkach obwodów drukowanych, połączeń warstw, arkuszy danych i instrukcji naprawy układu. Opracowanie tej aplikacji pozwoliło wyraźnie powiązać niezawodność wytwarzania modułów elektronicznych i proces ich napraw z organizacją działu produkcji i działu napraw w dużym przedsiębiorstwie elektronicznym i tym samym dowieść drugiej tezy rozprawy.

Kolejne działanie łączące niezawodność wytwarzania modułów z organizacją i kosztami produkcji wiąże się z opracowaniem modelu prognozowania liczby modułów różnego typu, zaplanowanych do naprawy w następnych czterech tygodniach za pomocą danych historycznych z ostatnich kilku tygodni produkcji i towarzyszących jej testów, z cotygodniowym punktem kontrolnym. Doktorant przygotował kilka wariantów modelu bazującego na danych historycznych oraz model wykorzystujący uczenie ma-

szynowe. Dokładność wszystkich modeli została zweryfikowana doświadczalnie przez porównanie rzeczywistych i przewidywanych stosów napraw oraz analizy statystyczne wyników predykcji. Kilkumiesięczna weryfikacja pozwoliła Doktorantowi stwierdzić, że *zastosowanie modeli opartych na wykorzystaniu sztucznej inteligencji pozwala skutecznie przewidzieć obciążenie działu napraw niesprawnymi modułami z tygodniowym wyprzedzeniem*, czyli udowodnić trzecia tezę postawiona w rozprawie. A zatem mgr inż. Wojciech Kowalke rozwiązał postawione zagadnienia używając do tego adekwatnych metod oraz sporej wiedzy tak inżynierskiej jak i z zakresu organizacji produkcji.

6. Na czym polega oryginalny dorobek Autora (najważniejsze osiągnięcia Autora) i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Przedstawioną do oceny rozprawę charakteryzuje szerokie spojrzenie na problemy, tak techniczne jak i organizacyjne, w szczególności dotyczących działu napraw, pojawiające się w dużym przedsiębiorstwie branży elektronicznej oraz podjęcie się ich rozwiązania lub przynajmniej minimalizacji. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

1. Przeprowadzenie pomiaru i analizy rezystancji termicznej tranzystorów mocy umieszczonych na wielowarstwowym module elektronicznym zawierającym wiele takich tranzystorów skutkujących wykazaniem braku korelacji między rozmiarami pustek lutowniczych w spoinie lutowniczej a rezystancją termiczną tranzystora oraz pokazaniem, że rezystancja termiczna tych tranzystorów zależy od ich położenia względem brzegu płytki drukowanej (mimo uwag przedstawionych w następnym punkcie recenzji).
2. Przeanalizowanie wpływu wybranych czynników na jakość procesu wytwarzania modułów elektronicznych oraz udział w opracowaniu założeń wprowadzenia do praktyki przemysłowej nowego systemu wspierającego diagnostykę niezgodnych modułów elektronicznych w oparciu o koncepcję rzeczywistości rozszerzonej (AR), a następnie nadzór nad testami przemysłowymi tego oprogramowania wraz z oceną jego użyteczności.
3. Opracowanie dwóch typów algorytmów, deterministycznego i opartego na uczeniu maszynowym, przewidywania liczby i rodzajów modułów elektronicznych, które będą wymagać naprawy w kolejnym tygodniu i eksperymentalne wykazanie przewagi algorytmu bazującego na uczeniu maszynowym w stosunku do deterministycznego przy przewidywaniu obciążeń działu napraw w nadchodzących tygodniach.

Niewątpliwie powyższe osiągnięcia prowadzą do poprawy efektywności działania przedsiębiorstwa.

7. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Podczas uważnej lektury rozprawy, oprócz przedstawionych powyżej jej zalet, nasunęło mi się jednak kilka uwag i spostrzeżeń dyskusyjnych lub o charakterze krytycznym, które dotyczą głównie badań przedstawionych w rozdz. 4-7 i które przytaczam poniżej:

- a) W jaki sposób zostały wybrane cztery płytki PCB do badań, tzn. czy były zmontowane tego samego dnia, czy też w różnych terminach? Czy do wytworzenia modułów zastosowano płytki z tej samej partii laminatu wielowarstwowego, czy też z różnych dostaw?
- b) Na każdej płycie są zamontowane dwa tranzystory BLC10G22LS-240PVT (TR1_A i TR_3A) oraz dwa tranzystory BLC9G22LS-160VT (TR_2B i TR_4B) – dla każdego z tych tranzystorów metodą rentgenowską zmierzono rozmiary pustek całkowitych i największych pojedynczych. Ponadto dla tych tranzystorów wykonano pomiary rezystancji termicznej R_{th} . Oznacza to, że parametry te

Edm

zostały określone dla ośmiu tranzystorów jednego typu i ośmiu drugiego typu. Proszę o wykazanie, że takie liczby badanych elementów wystarczają do wyciągania wniosków statystycznych.

- c) Proszę o komentarz do następującego fragmentu rozprawy za str.45 „Dla opisywanych warunków pracy ($T_a = 29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wydzielanej mocy $P = 22,5\text{ W}$) przy pomiarze R_{th} dla tranzystorów typu BLC9G22LS-160VT najmniejszą wartość zanotowano dla tranzystora TR_2B w module PCB2. Wynosi ona $R_{th} = 1,98\text{ K/W}$. Największą zaś wartość $R_{th} = 2,9\text{ K/W}$ wyznaczono dla tranzystora TR2_B w module PCB4. Względem tych wartości maksymalna różnica R_{th} w mierzonych tranzystorach wynosi aż $\Delta R_{th} = 0,92\text{ K/W}$. Stanowi to aż 19 % odchyłki względem wartości średniej z przeprowadzonych pomiarów równej $2,44\text{ K/W}$.” Co to za wartość średnia – czy jest to wartość dla wszystkich czterech tranzystorów TR_2B (podobne informacje pojawiły się w rozprawie także w odniesieniu do innych tranzystorów)?
- d) Autor stwierdza, że wyraźne różnice między wartościami rezystancji termicznej poszczególnych tranzystorów mogą być spowodowane m.in. różnicami w rozkładzie miedzi na płycie w sąsiedztwie badanych tranzystorów (prawdopodobnie Autorowi chodzi o różnice w rozkładzie grubości miedzi). Dlaczego zatem ten parametr nie został zmierzony?
- e) Badając wpływ parametrów cieplnych na czas życia modułów elektronicznych mgr inż. Wojciech Kowalke posłużył się modelem Arrheniusa, w którym pojawia się E_a , czyli energia aktywacji procesu uszkodzeń. Autor, za pozycją [36], przyjął, że jest ona równa 1 eV. Niestety, Autor nie informuje, jaki mechanizm uszkodzenia wziął pod uwagę. Tymczasem uwzględniając zmiany w charakterystyce termicznej elementu elektronicznego wartość energii aktywacji uszkodzenia zmienia się w zależności od różnych mechanizmów uszkodzeń fizycznych i chemicznych. Stąd też w obliczeniach współczynników przyspieszenia w celu określenia wartości energii aktywacji uszkodzeń należy stwierdzić jakie mechanizmy powodują uszkodzenie. Np. w artykule Q. Wen, R. Zhai, G. Ji, T. Zhu, Z. Li, Y. Hue; *Test Method and Application of High-Temperature Operating Life of Automobile Chips, Journal of Physics: Conference Series*, vol.2447 (2023), art. ID 012003 (8 pp.) znajduje się informacja, że energia aktywacji uszkodzeń związanych z montażem mieści się w zakresie od 0,5 do 0,7 eV. Proszę o komentarz.

Liczę na wyjaśnienie powyższych wątpliwości podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

8. Czy autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Oceniając organizację recenzowanego materiału stwierdzam, że układ rozprawy, jej struktura, podział treści i kolejność rozdziałów są prawidłowe. Przedstawione założenia, ich realizacja oraz analiza uzyskanych wyników zostały właściwie sformułowane w tekście. Rozprawa liczy 128 gęsto zapisanych stron (w tym 63 rysunki (brakuje rysunku o numerze 11.6) i 15 tabel). W rozprawie kolejno pojawia się spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, trzynastcie rozdziałów merytorycznych i spis literatury, w którym oddzielnie zostały ujęte prace współautorstwa mgr inż. Wojciecha Kowalke i prace innych autorów. Rozdziały od drugiego do dziesiątego kończą się wnioskami cząstkowymi. Natomiast całość rozprawy jest podsumowana w rozdziale trzynastym. Bibliografia obejmuje łącznie 143 pozycje, w tym osiem prac współautorstwa mgr inż. Wojciecha Kowalke i 135 innych pozycji, które są ściśle związane z tematyką poruszaną w rozprawie.

Autor starał się przedstawić swoje badania w sposób zrozumiały. Rysunki, schematy i tabele zostały wykonane starannie. Jednak w rozprawie zauważyłem sporo usterek natury redakcyjnej. Są one związane m.in. z:

- nadużywaniem przyimków „poprzez” (około 45 razy) i „pomiędzy” (około 60 razy) zamiast przyimków „przez” i „między” (generalnie „pomiędzy” i „poprzez” bywają nadużywane kosztem przyimków „między” i „przez”; prawdopodobnie wynika to z nieświadomego założenia, że im dłuższy wyraz, tym mądrzejszy; tymczasem jeśli można coś powiedzieć krócej, to prawie na pewno warto tak zrobić),
- używanie słowa „ilość” (około 15 razy) dla określenia stanu liczebnego, czyli czegoś, co można policzyć (należy w takiej sytuacji stosować rzeczownik „liczba”),
- niewłaściwy zapis liczebników typu „10-ciu”, „15-minutowych”, „1-tygodniowej”, „4-tygodniowej”,
- nadużywanie określenia „w przypadku” (około 60 razy), które może być zastąpione słowami „w razie”, „w sytuacji”, „dla” lub „przy”,
- spora liczba błędów interpunkcyjnych (brak lub nadmiar przecinków - około 150 razy), które prawdopodobnie są wynikiem stosowania przez Doktoranta niekiedy zbyt długich zdań.
- używanie słownictwa żargonowego (np. nie X-Ray ale inspekcja rentgenowska).

9. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełnia stawianych wymagań,
- b) wymaga wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- d) spełnia stawiane wymagania z nadmiarem,
- e) zasługuje na wyróżnienie.

10. Wniosek końcowy

Przytoczone powyżej przeze mnie uwagi i zastrzeżenia, tak merytoryczne jak i natury redakcyjnej, mają charakter konstruktywny i m.in. powinny przyczynić się do większej precyzji kolejnych prac, których autorem będzie Doktorant. Wprawdzie nieco wpływają one na odbiór rozprawy, ale nie umniejszają przedstawionych wcześniej zasadniczych jej wartości, związanych z wykorzystaniem metod statystycznych do badania problemów występujących przy produkcji urządzeń elektronicznych. Zastosowanie tych metod pozwoliło na efektywną analizę korelacji między parametrami procesu montażu a parametrami technicznymi produkowanych urządzeń. W rozprawie przedstawiono również efekty badań nad nowatorskim systemem wspomagającym diagnostykę uszkodzeń urządzeń elektronicznych przy wykorzystaniu systemów rzeczywistości rozszerzonej. Opracowano także algorytm przewidywania obciążenia działu napraw w kolejnych tygodniach realizacji procesu produkcyjnego wykorzystując autorskie modele - deterministyczny i bazujący na uczeniu maszynowym.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Kowalke „Efektywne metody oceny jakości montażu modułów elektronicznych i narzędzia wspomagające proces naprawy tych modułów” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.