

Łódź, 5.04.2025 r.

dr hab. Stanisław Hałas, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,  
Informatyki i Automatyki  
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

*Efektywne metody oceny jakości montażu modułów elektronicznych  
i narzędzia wspomagające proces naprawy tych modułów*

Autor rozprawy: mgr inż. Wojciech Kowalke

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki

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

*Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, na podstawie pisma przesłanego przez Dziekana Wydziału Elektrycznego UMG, Pana Profesora Piotra Jankowskiego — pismo z dnia 27.02.2025 r.*

### Uwagi wstępne, charakterystyka wyboru tematu i przedmiot rozprawy

Rozprawa dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia z zakresu szeroko pojętej diagnostyki układów elektronicznych. Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc wybrane aspekty badawcze w dziedzinach nauk inżynieryjno-technicznych (dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne) oraz nauk społecznych (dyscyplina: nauki o zarządzaniu i jakości). Zawartość rozprawy oraz publikacje naukowe opracowane przy udziale Autora potwierdzają Jego szeroką wiedzę i duże kompetencje w zakresie oceny jakości montażu modułów elektronicznych oraz narzędzi wspierających proces diagnostyki zarówno w aspekcie technicznym, jak i logistycznym.

W firmach produkujących moduły elektroniczne kluczowe jest zmniejszanie kosztów, poprawa produktywności oraz utrzymanie wysokiej jakości. Konkurencja na rynku wymusza na przedsiębiorstwach oferowanie kompleksowych usług obejmujących projektowanie, montaż, testowanie, programowanie, magazynowanie i dostarczanie produktów. W celu podniesienia jakości i efektywności produkcji powszechnie stosuje się automatyzację, w tym roboty programowalne oraz wizualizację i analizę danych w czasie rzeczywistym. Proces produkcji nie jest jednak idealny w związku z czym zawsze część produktów wykazuje pewne usterki. Wymaga to stosowania odpowiednich metod monitorowania i zarządzania tzw. materiałem niezgodnym z założoną specyfikacją oraz przeprowadzania analizy wydajności zespołów naprawczych. Działania te pozwalają unikać dalszych problemów produkcyjnych, doskonalić proces logistyczny i wytwórczy oraz ograniczać straty finansowe. Uzasadnienie biznesowe obok wymagań jakościowych związanych z niezawodnością nowych produktów decyduje o kontynuacji prac projektowych ukierunkowanych na udoskonalenie procesu produkcji. Techniki DFM (design for manufacturability) i DFT (design for testability) pomagają zidentyfikować istotne problemy na etapie projektowania, co zmniejsza koszty produkcji oraz testowania. Z punktu

517

widzenia niezawodności elementów i modułów elektronicznych, jednym z bardzo istotnych parametrów elektrycznych jest wydzielana w nich moc. Właściwe chłodzenie elementów mocy ma kluczowe znaczenie dla trwałości urządzeń. Rozwój technologii i miniaturyzacja wymaga precyzyjnego montażu i monitorowania procesu lutowania, szczególnie tranzystorów mocy. Błędy w tym zakresie mogą prowadzić do problemów z jakością, redukować czas poprawnej pracy komponentu, a co za tym idzie skutkować uszkodzeniem całego modułu. Automatyzacja procesów produkcyjnych pozwala na szybsze wykrywanie problemów. Znajomość ryzyka pojawienia się nieprawidłowości w samym procesie produkcji, jak również informacje o produktach oczekujących na naprawę (tzw. stosie napraw) może, po zastosowaniu odpowiednich technik, ograniczyć straty finansowe przedsiębiorstwa. Dlatego istotnym zagadnieniem są metody predykcji sytuacji ryzykownych. Podsumowując, istnieje konieczność doskonalenia procesów wytwarzania i diagnostyki w celu poprawy jakości, żywotności i efektywności produkcji.

**Analizując to szerokie spektrum zagadnień związanych z montażem i testowaniem urządzeń elektronicznych Autor rozprawy postanowił skoncentrować się na kilku aspektach związanych z tymi procesami, tj.:**

- **laboratoryjnym zbadaniu wpływu wybranych czynników na właściwości cieplne tranzystorów RF oraz wszechstronnej analizie otrzymanych wyników,**
- **analizie czynników produkcyjnych mających wpływ na czas życia wybranych modułów elektronicznych,**
- **opracowaniu narzędzi wspierających diagnostykę modułów elektronicznych,**
- **zaproponowaniu efektywnych algorytmów predykcji obciążenia działu napraw w przedsiębiorstwie produkującym moduły elektroniczne.**

Praca o objętości 128 stron obejmuje 13 rozdziałów, wykaz skrótów i oznaczeń (bardzo ułatwiający poruszanie się po tekście rozprawy) oraz literatury. Rozprawa zawiera osiem własnych oraz 135 innych pozycji bibliograficznych, w tym 43 opublikowane w ostatnich pięciu latach (nie uwzględniono w tej ostatniej liczbie danych katalogowych oraz stron internetowych). Dobór źródeł jest właściwy i świadczy o dobrej orientacji Doktoranta w aktualnej wiedzy z zakresu tematyki rozprawy. W spisie literatury, jak już wspomniano, występuje osiem pozycji (A1-A8), których współautorem jest Doktorant. Ponieważ są to publikacje w recenzowanych czasopismach (6 pozycji) oraz materiałach konferencji międzynarodowych świadczy to o uznaniu przedstawionych tam propozycji za oryginalne i przydatne w procesie projektowania systemów diagnostycznych. Część prezentowanych w rozprawie wyników jest rozwinięciem lub modyfikacją prezentowanych w tych pracach propozycji.

**Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia wybór tematyki rozprawy uważam za właściwy, chwaląc Autora za podjęcie ważnego tematu o walorach poznawczych i praktycznych. Jednocześnie stwierdzam, że tematyka pracy mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

#### **Ocena merytoryczna**

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił uzasadnienie wyboru tematyki, sformułował cel, tezy i zakres pracy oraz omówił krótko zawartość merytoryczną poszczególnych rozdziałów. **Celem jaki postawił przed sobą Autor było opracowanie efektywnych metod oceny jakości montażu modułów elektronicznych oraz opracowanie i przetestowanie narzędzi wspomagających proces**

**naprawy tych modułów.** Analiza postawionych na stronie jedenastej trzech tez prowadzi do wniosku, że opisane badania potwierdzą brak statystycznie istotnej korelacji pomiędzy rozmiarami pustek lutowniczych w spoinie lutowniczej pod padem termicznym a wartościami parametrów cieplnych wlutowanych tranzystorów mocy, doprowadzą do opracowania oryginalnych metod diagnozowania uszkodzeń układów elektronicznych spowodowanych błędami montażu przy wykorzystaniu metod statystycznych i rzeczywistości rozszerzonej oraz nowych modeli pozwalających przewidzieć obciążenie działu napraw. Cel oraz tezy zostały sformułowane poprawnie.

**Aby wykazać tezy rozprawy Autor zrealizował dziesięć zadań, z których najistotniejsze, związane ściśle z dyscypliną, w której doktorant ubiega się o stopień naukowy to:**

- **budowa stanowiska pomiarowego do wyznaczania parametrów cieplnych tranzystorów mocy zamontowanych na wielowarstwowych płytkach drukowanych (rozdział 5),**
- **pomiary parametrów cieplnych badanych tranzystorów dla różnych warunków ich pracy (rozdział 6),**
- **analiza jakości wykonanych połączeń lutowanych przy wykorzystaniu obrazów rentgenowskich (rozdział 4),**
- **zdefiniowanie wymagań dla nowego narzędzia do diagnostyki usterek (inspectAR) (rozdział 9),**
- **analiza metod monitorowania, kontroli i redukcji liczby awarii pojawiających się w procesie produkcji oraz metod i narzędzi do diagnozowania układów elektronicznych (rozdział 8),**
- **opracowanie i weryfikacja algorytmów umożliwiających predykcję liczby uszkodzonych modułów wymagających dodatkowego testowania i naprawy (rozdziały 10-12).**

Za szczególnie wartościowe należy uznać umiejętność identyfikacji problemu, opracowanie metodologii pomiarów, stworzenie stanowiska pomiarowego oraz przeprowadzenie pomiarów i ich analizę. Pracując w zespole badawczym o światowej renomie pod kierunkiem prof. K. Góreckiego Autor mógł korzystać z wiedzy i doświadczenia kolegów, co widać we wszechstronnym podejściu do prowadzonych badań. Doktorant podjął też różne próby ujęcia statystycznego otrzymanych wyników i opracowanych modeli (elementy występują w kilku rozdziałach). Ten ostatni punkt budzi w pewnych aspektach wątpliwości, co znajduje odbicie w pytaniach w dalszej części recenzji.

Rozprawę można podzielić na siedem części. Poza omówionym wyżej wprowadzeniem, w rozdziale drugim Autor omówił problemy związane z zarządzaniem materiałem niezgodnym w pewnej firmie produkującej moduły elektroniczne. Rozdział koncentruje się na kontroli materiału niezgodnego, jego klasyfikacji i metodach redukcji poprzez priorytetyzację napraw. Opisano wyznaczanie celów określających limity ryzyka utylizacji oraz maksymalną pojemność magazynu wyrobów niezgodnych, powiązaną z miesięczną sprzedażą. Podkreślono znaczenie bieżącego monitorowania efektywności zespołów naprawczych poprzez codzienne, tygodniowe i miesięczne raporty, umożliwiające analizę trendów i wdrażanie działań korygujących w razie potrzeby. Kolejny rozdział zawiera opis metod statystycznych stosowanych w analizie jakości produkcji. Metody te odgrywają kluczową rolę w ocenie jakości montażu modułów elektronicznych, pomagając redukować błędy i spełniać odpowiednie normy jakościowe. Jednymi z najczęściej stosowanych metod są Sześć Sigma (Six Sigma), której celem jest monitorowanie i kontrola procesów w celu redukcji kosztów i poprawy jakości oraz dom jakości (HoQ) służący do przełożenia wymagań klienta na charakterystykę projektu produktu lub usługi z wykorzystaniem macierzy relacji. W rozdziale tym Autor przeprowadził też analizę wła-

ściwości modułu elektronicznego metodami statystycznymi. W systemie oceny pustek w spoinie lutowniczej tranzystorów uwzględnił prąd drenu, moc oraz napięcia złączowe jako sygnały wejściowe, a także niekontrolowalne parametry, takie jak temperaturę otoczenia, powierzchnię pustek (całkowita i indywidualna), typ tranzystora i jego pozycję na PCB. Parametrami wyjściowymi były temperatura obudowy tranzystora oraz rezystancja termiczna. Analizę wpływu czynników na działanie modułu przeprowadzono metodą QFD, koncentrując się na niezawodności, czasie życia, mocy wyjściowej i rezystancji termicznej. Macierz HoQ wskazała, że kluczowy wpływ na parametry użytkowe mają temperatura obudowy tranzystora, typ tranzystora, temperatura otoczenia oraz całkowita i indywidualna powierzchnia pustek. Wyniki tej analizy wykazały, że pozycja tranzystora, typ pieca i profil lutowania mają mniejsze znaczenie. Ten podrozdział (3.3) był punktem odniesienia do dalszych prac badawczych. Istotną część pracy stanowią cztery kolejne rozdziały dotyczące przeprowadzonych przez Autora pomiarów właściwości cieplnych tranzystorów pracujących w układach RF oraz analiza statystyczna uzyskanych wyników. Moduły elektroniczne zawierające te tranzystory łączą wzmacniacze RF z częścią nadawczo-odbiorczą na jednej płycie, co obniża koszty, ale utrudnia zachowanie wymaganych parametrów. Autor zbadał wpływ montażu tranzystorów mocy na działanie i trwałość układu. Rozdziały 8 i 9, to kolejna część pracy, w której Doktorant przedstawił analizę usterek procesowych oraz opracowany przy udziale Autora, system inspectAR wspierający diagnostykę modułów elektronicznych. Proces wytwarzania układów SMT może prowadzić do różnych defektów wynikających z warunków montażu, temperatury, przechowywania komponentów czy wad materiałowych, co wymaga podjęcia działań naprawczych. Proces naprawy układów elektronicznych składa się z kilku etapów. Po zakończeniu montażu komponentów SMD przeprowadza się testy funkcjonalne, które sprawdzają, czy produkt działa zgodnie z wymaganiami. Proces naprawy wymaga odpowiedniej organizacji, m.in. przygotowania odpowiednich stanowisk i narzędzi oraz zarządzania materiałem niezgodnym. Ważnym narzędziem w diagnostyce usterek jest metoda termograficzna. Dodatkowo, zarządzanie naprawami wspiera dedykowane oprogramowanie, umożliwiające szybki dostęp do dokumentacji i monitorowanie postępu prac naprawczych. Autor jako reprezentant firmy Flex uczestniczył w opracowaniu wersji systemu inspectAR dostosowanego do potrzeb diagnostyki uszkodzeń dużych modułów elektronicznych. InspectAR zapewnia interaktywną analizę poprawności montażu, łącząc inspekcję optyczną z danymi listy materiałowej (BOM), schematami i arkuszami danych. System wspomaga operatorów napraw na wczesnych etapach produkcji i jest szczególnie przydatny dla inżynierów w fazie poszukiwania błędów w złożonych układach. Kolejne trzy rozdziały dotyczą problemu predykcji obciążenia działu napraw w procesie produkcyjnym, zawierają opis autorskich modeli predykcyjnych i wyniki ich weryfikacji. Wiedza o liczbie produktów w stosie napraw, dostępna z wyprzedzeniem, pozwala firmom produkującym moduły elektroniczne na lepsze przygotowanie się do potencjalnych kosztów napraw oraz materiałów, a także może zredukować ryzyko strat finansowych. Taka informacja umożliwia również wcześniejsze zebranie odpowiednich zespołów naprawczych w celu zmniejszenia stosu napraw, a także stanowi sygnał dla działu jakości o konieczności podjęcia działań w celu poprawy wydajności produkcji. Informacje dotyczące przyszłego stosu napraw są niezwykle cenne. Doktorant zaprezentował model przewidywania stosu napraw dla firmy produkującej moduły elektroniczne oparty na danych historycznych dotyczących skuteczności napraw, liczby wyprodukowanych i oczekujących na naprawę modułów. Model został zweryfikowany na danych z trzech miesięcy, wykazując dobrą dokładność prognozowania stosu

napraw z tygodniowym wyprzedzeniem, jednak przy dłuższym okresie błędy w prognozach rosną z powodu dużej zmienności procesów produkcyjnych. Zaproponowany model AI, wykorzystujący uczenie maszynowe, wykazał lepszą dokładność w przewidywaniach stosu napraw w porównaniu z tradycyjnym modelem, szczególnie przy długoterminowych prognozach. Rozdział ostatni zawiera krótkie podsumowanie prowadzonych prac i osiągniętych wyników oraz wskazanie dalszych kierunków badawczych.

*Po zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że tezy pracy zostały udowodnione (z drobnym zastrzeżeniem dotyczącym wniosków płynących z niektórych analiz statystycznych), a rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Propozycje zawarte w rozprawie, nowe lub oparte na prezentowanych wcześniej pracach współautorskich, mają aspekt praktyczny. Wymienione wyżej osiągnięcia dowodzą, że Autor opanował umiejętności w zakresie formułowania problemów badawczych, ich poprawnego rozwiązywania oraz prowadzenia dyskusji otrzymanych wyników i ich prezentacji.*

**Czytając rozprawę nasunęło mi się kilka pytań i uwag krytycznych, które przedstawiam poniżej.**

1. W rozdziale 7.4 badano normalność uzyskanych wyników wykorzystując program Minitab. Nie podano jaki test wykonano, a liczba próbek, przy której przeprowadzano ten test jest bardzo mała (5 lub 4, jak podano w tabeli 7.3). Rozumiem, że koszt uzyskania i dokładnego przebadania większej liczby modułów, ze względu na ich złożoność jest wysoki, jednak wyciąganie wniosków statystycznych i weryfikacja hipotez wymaga znacznie większej liczby próbek. Zwykle badania takie przeprowadza się na wielkości próby większej niż 20. Wielkość próby mniejsza niż 20 może nie zapewnić wystarczającej podstawy do wykrycia znaczących różnic między danymi z próby a rozkładem normalnym. Przy małych rozmiarach próby (10 lub mniej obserwacji) jest mało prawdopodobne aby test normalności wykrył nienormalność. Dlatego, pewne wnioski, które formułuje Autor powinny być bardziej wyważone i formułowane jako obserwacja na małej liczbie próbek.
2. Podobna jak wyżej uwaga odnosi się do wykresów i rezultatów podanych w rozdziale 7.3. Wykres interwałowy służy do oceny i porównania przedziałów ufności średnich grup. Wykres interwałowy pokazuje 95% przedział ufności dla średniej każdej grupy i jest zalecane, aby wielkość próby wynosiła co najmniej 10 dla każdej grupy. Zazwyczaj im większa wielkość próby, tym węższy i bardziej precyzyjny przedział ufności.
3. W rozdziale 11 wykorzystano test ANOVA w celu oceny czy i jak wielkość paczek na wpływ na wynik predykcji. Dla tego testu zalecane jest aby dane próbki pochodziły z normalnej populacji lub każda próbka powinna mieć wielkość większą niż 15 lub 20. Jeżeli wielkość próby jest mniejsza niż 15 lub 20, wyniki mogą być błędne w przypadku rozkładów odbiegających od normalnego. Zalecana wielkość próby zależy też od liczby grup w danych. Jeżeli rozważane są dwie do dziewięciu grup, wielkość próby dla każdej grupy powinna wynosić co najmniej 15. Wydaje się, że te zalecenia nie są w pełni spełnione w analizowanym przypadku.
4. Na stronie 78 można znaleźć stwierdzenie: „Autor jako reprezentant firmy Flex uczestniczył w opracowaniu wersji systemu inspectAR dostosowanego do potrzeb diagnostyki uszkodzeń du-

zych modułów elektronicznych”. Czy Autor mógłby sprecyzować jak była Jego rola i zadania w opracowywaniu tego systemu diagnostycznego?

5. Nie jest opisane w jaki sposób estymowano rozmiar pustki w procentach. Podano tylko, że ich lokalizacja była możliwa przy wykorzystaniu testu rentgenowskiego. Jakie oprogramowanie oraz ewentualnie jakie operacje wstępnego przetwarzania obrazu (segmentacji) wykonywane były na zdjęciach rentgenowskich?

### Uwagi szczegółowe

W tak obszernej pracy zawsze pojawiają się pewne błędy i usterki, ale w przypadku ocenianej pracy jest ich niewiele. Poniżej wymieniam niektóre zauważone drobne uchybienia oraz wątpliwości:

- w pracy występuje kilkanaście literówek, ponadto w kilku miejscach powinno być: *liczba/y* zamiast *ilość/ci*
- str. 18, 9. linijka od dołu – wydaje się, że podane wartości produktów nie odpowiadają tym z rys. 2.3
- str. 27, 11. linijka od góry – na rys. 3.2 pokazanych jest 9 czynników, a w opisie 10
- str. 35, tabela 4.1 – dlaczego temp. aktywacji topnika jest podawana w stopniach na sekundę
- str. 35, 12. linijka od dołu – dlaczego podana temperatura 50°C jest o 10 stopni niższa niż w tabeli 4.2
- str. 38, tabela 4.3 – dlaczego w tabeli brakuje TR1\_A na PCB3 (podobna uwaga dotyczy str. 47, rys. 6.9 – dlaczego na wykresach pominięto płytkę PCB3)
- str. 46, rys. 6.7 – podane nierówności określające moc są mało precyzyjne, przypuszczam, że wartości 10,53 W oraz 10,43 W uwzględniono na wykresach tam, gdzie  $P \leq 10$  W (należało raczej podać zakres np. 7 do 11 W), ta sama uwaga dotyczy tabeli 6.1
- str. 48, 2. linijka pod rys. 6.10 – rysunek nie potwierdza stwierdzenia, że ryzyko uszkodzenia maleje ze wzrostem rozmiaru komponentu
- str. 49, 2. linijka od góry – jak wpływa wartość energii aktywacji na wyniki i jakie jest uzasadnienie przyjęcia wartości 1 eV
- str. 51 – większość podanych wniosków ma uzasadnienie w kolejnym rozdziale i korzystnie byłoby je przenieść na koniec rozdziału siódmego
- str. 63, 10. linijka od dołu – brak linii tak oznaczonej, powinno być linia zielona przerywana
- str. 64, 17. linijka od dołu – brak pozycji 136 w bibliografii
- str. 76, rys. 9.2 – powinno być: *linii* zamiast *lini*
- str. 91, 12. linijka od góry – co oznacza Pkt7
- str. 101, rys. 11.5 – czy podane słupki odnoszą się do rzeczywistego czy przewidywanego stosu napraw – brak legendy utrudnia zrozumienie rysunku
- str. 105-106 – dlaczego w rozważaniach porównywano warianty C oraz E, a pominięto najlepsze warianty D oraz F
- str. 106, rys. 11.8b – podane słupki, zdaniem recenzenta, nie opowiadają danym z rys. 11.8a, np. dla modelu E, w tygodniach 5, 20-23 wartości odchyłki są ujemne
- str. 117, 14. linijka od dołu – stwierdzenie, że eksperymenty wykonano *dla dużej liczby tranzystorów i płyt drukowanych* jest, biorąc pod uwagę badania statystyczne, trochę na wyrost
- spis literatury – brak informacji o roku wydania pozycji 70 i 76.

Przedstawione wyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają pozytywnej oceny pracy. Ich uwzględnienie w przyszłych badaniach pozwoli na lepsze dopracowanie metodologii, zwiększenie przejrzystości prezentowanych wyników oraz podniesienie wartości naukowej i praktycznej badań.

## Ocena redakcyjna

Oceniana rozprawa doktorska napisana jest dobrym językiem i jak na tak obszerną pracę zawiera nieliczne usterki w postaci błędów stylistycznych, gramatycznych oraz literówek. Niektóre akapity są dobrane niewłaściwie, pojawiają się też błędy interpunkcyjne. Jeżeli wypunktowywane elementy są krótkie i mają charakter nominalny (czyli nie są zdaniem, a np. równoważnikiem), powinno się je zapisywać od małej litery. Jeśli natomiast elementy wyliczenia mają charakter zdaniowy i na dodatek są długie, to wówczas takie elementy wyliczenia lepiej zaczynać od wielkiej litery. W pracy czasami w kilku miejscach spotkać można różnorodność stosowanych czcionek we wzorach oraz tekście. Korzystne jest stosowanie legendy przy wykresach, aby jasno wyjaśnić oznaczenia, zamiast polegać wyłącznie na opisie w tekście. Ułatwia to szybkie zrozumienie danych i zwiększa czytelność analizy, szczególnie gdy wykresy zawierają wiele linii lub kategorii. Nieliczne pozycje literatury (23, 48, 63, 77, 86, 98, 103) nie są cytowane (przynajmniej recenzent nie zauważył cytowań tych prac). Reasumując, tekst rozprawy jest szczegółowy, dobrze zorganizowany i dobrze prezentuje wyniki badań.

## Podsumowanie

Podsumowując uważam, że opiniowana rozprawa dotyczy ważnego i aktualnego problemu, zawiera własne propozycje, stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz ma znaczenie praktyczne. Doktorant osiągnął zamierzony cel i udowodnił postawione w pracy tezy. Dowodem ich słuszności są prezentowane w rozprawie wyniki badań oraz opublikowane prace naukowe. Autor opanował warsztat naukowy, wykazał się znajomością literatury światowej związanej z tematyką rozprawy oraz właściwym doбором metod badawczych, systemów pomiarowych i narzędzi symulacyjnych. Rozprawa potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Dodatkową jej zaletą jest użyteczność wielu przedstawionych w rozprawie koncepcji w praktyce, podczas procesów produkcji, testowania i naprawy modułów elektronicznych. Praca nie wymaga poprawek i uzupełnień.

## Wniosek końcowy

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (t.j. Dz.U. z 2020 r. poz 85. z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Wojciecha Kowalke do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.



Stanisław Hałgas