



Opole, dnia 21.01.2026 r.

Prof. dr hab. inż. Jolanta Królczyk

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Szymczyka

pt.: „Opracowanie i badania mechatronicznego rozpylacza opryskiwacza rolniczego o zmiennej charakterystyce oprysku”.

Promotor pracy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c (Politechnika Poznańska)

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek Wojciechowski (Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny)



1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 4.12.2025 r.

2. Znaczenie podjętej tematyki badawczej

Dostarczona do recenzji praca doktorska pt. „Opracowanie i badania mechatronicznego rozpylacza opryskiwacza rolniczego o zmiennej charakterystyce oprysku”, której autorem jest Pan mgr inż. Sebastian Szymczyk poświęcona została ważnym zagadnieniom w dziedzinie nauk technicznych, jak również nauk rolniczych. Poruszana w pracy problematyka jest ważna zarówno z punktu widzenia społecznego, jak i środowiskowego, ponieważ dotyczy jednocześnie kilku obszarów, tj. zdrowie ludzi, ochrona środowiska, produkcja i opłacalność rolnictwa. Istotne aspekty dotyczą również bezpieczeństwa żywności i ludzi. Podejmowana w rozprawie doktorskiej tematyka dotyczy precyzyjnego dozowania i ograniczania stosowania środków ochrony roślin. Lepsza, bardziej oszczędna technika oprysku wpływa na zmniejszenie ilości pestycydów w żywności, jak również na zmniejszenie ich ilości w glebie i wodzie, która zgromadzona jest w głębszych partiach ziemi, np. zbiorniki podziemne służące jako rezerwuary wody pitnej. Selektywny oprysk w mniejszym stopniu przyczyni się do degradacji gleby i zabijania pożytecznych organizmów, np. zapylaczy. Mniejsza ilość dawki oprysków, ale skutecznie dozowana, to większe oszczędności dla rolników i jednocześnie większe plony. To aspekty, które da się wycenić, jednak zdrowie ludzkie i problemy związane z obecnością pestycydów w żywności trudne są do wyceny czy traktowania tych aspektów w ujęciu materialnym. Badania prowadzone przez Doktoranta wpisują się w tematykę zrównoważonego rolnictwa i zrównoważonego rozwoju, czyli dotyczącego obszarów: środowiskowego, gospodarczego i społecznego. Zrównoważone rolnictwo oznacza zarządzanie ekosystemami rolniczymi i ich wykorzystanie w sposób zapewniający zachowanie ich różnorodności biologicznej, produktywności, zdolności regeneracyjnych, vitalności i zdolności do funkcjonowania, w celu pełnienia funkcji ekologicznych, gospodarczych i społecznych na poziomie lokalnym, krajowym i globalnym, bez szkód dla innych ekosystemów, czyli innymi słowy „osiągnij więcej i lepiej za mniej”. Rosnąca populacja świata oraz wzrost konsumpcji sprawiają, że innowacje i zrównoważone podnoszenie wydajności rolnictwa są dziś ważniejsze niż kiedykolwiek. Tematyka pracy wpisuje się w najnowsze trendy świata nauki i przemysłu. Walorem dodatkowym pracy jest jej aspekt i potencjał wdrożeniowy, lecz patrząc szerzej również na inne obszary wskazane powyżej, jak zdrowie, żywność, bezpieczeństwo, społeczeństwo podejmowana tematyka jest sprawą o wyjątkowej randze i zasadniczym znaczeniu dla dalszego rozwoju zrównoważonego rolnictwa.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa obejmuje 142 strony i podzielono ją na 8 rozdziałów, w tym: wstęp; stan wiedzy i techniki; cel, zakres i teza pracy; projektowania mechatronicznego rozpylacza; wyniki i analiza badań; koszty i analizy rynku; potencjał wdrożeniowy oraz podsumowanie i wnioski. Pracę uzupełnia spis ważniejszych oznaczeń, symboli i akronimów. W pracy umieszczono 155 pozycji literaturowych, które są umiejętnie dobrane. Przywołana bibliografia odnosi się do właściwej i adekwatnej literatury przedmiotu badań. Na podstawie dostępnej literatury Doktorant przedstawił teorię oraz istniejący stan wiedzy oraz zakres badań do tej pory wykonanych przez innych badaczy. Rozprawa obejmuje ponadto 6 tabel oraz 67 rysunków. Układ pracy jest właściwy, a wszystkie rozdziały wraz z podrozdziałami tworzą razem logiczną całość. Należy zauważyć staranność opracowania rozprawy, nie tylko pod względem układu, ale również pod względem graficznym. Wykresy oraz tabele są precyzyjnie opisane, a w tekście znajduje się odwołanie do każdego rysunku, tabeli czy wykresu. Autor posługuje się poprawnym językiem. Rysunki wykonane są starannie oraz wplecione są umiejętnie w całość. Recenzowana dysertacja mieści się w nurcie współczesnych kierunków badań inżynierii mechanicznej, w tym inżynierii rolniczej. Zastosowane w pracy metody badawcze wraz ze statystycznym opracowaniem wyników pozwoliły na zgłębienie podejmowanej tematyki. Badania przedstawione w pracy są nowatorskie i niezwykle ciekawe. Z pewnością jest to kierunek warty dalszego rozwoju. W tym aspekcie należy podkreślić i docenić kierunek podejmowanych innowacyjnych badań przez doktorantów i pracowników Politechniki Poznańskiej oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz - Poznańskiego Instytutu Technologicznego, szczególnie ważnych w aspekcie zrównoważonego rozwoju.

Oceniana praca zawiera podstawowe elementy pracy doktorskiej, ma charakter naukowo-badawczy, a także potencjał wdrożeniowy. Treść rozprawy doktorskiej jest zgodna z tytułem, proporcje oraz przyjęte rozdziały nie budzą zastrzeżeń. Cel rozprawy został spełniony, a wnioski znajdują potwierdzenie w opracowaniu wyników badań.

4. Merytoryczna ocena pracy.

Doktorant rozpoczął swoją rozprawę od rozdziału nazwanego „Wstęp”, w którym dokonano wewnętrznego podziału tematów na „wprowadzenie”, „genezę pracy” oraz „zakres pracy”. We wprowadzeniu Doktorant nawiązał do kwestii bezpieczeństwa żywnościowego, żywności wysokiej jakości, przepisów i wymogów Unii Europejskiej. Ponadto pokrótce przedstawiono główne założenia rolnictwa 4.0. W podrozdziale dotyczącym genezy pracy Doktorant przedstawił tematykę środków chemicznych, takich jak herbicydy, fungicydy i insektycydy, określane ogólnie jako pestycydy, wskazał na negatywne skutki stosowania pestycydów, jak również przedstawił jakie skutki mogłoby przynieść zaniechanie stosowania pestycydów. Jako kompromis pomiędzy względami ekonomicznymi i bezpieczeństwem żywnościowym a ochroną środowiska wskazano rolnictwo zrównoważone. Doktorant wskazał, że bezpośrednim impulsem do zajęcia się tematyką pracy doktorskiej była obserwacja nieefektywnych metod oprysku. Autor bardzo trafnie i syntetycznie wskazał zarys i genezę pracy.

Drugi rozdział przedstawia stan wiedzy i technologii. W rozdziale tym obszerny materiał służący do uporządkowania najnowszej wiedzy w obszarze tematyki podejmowanej w pracy podzielono na kilka zagadnień związanych z czynnikami determinującymi innowacje w technologii oprysku rolniczego, technologii opryskiwania w rolnictwie, metody badań rozpylaczy i opryskiwaczy rolniczych, automatyką i poprawą procesu oprysku oraz systemami wizyjnymi wspomagającymi oprysk. Doktorant celnie i słusznie uchwycił najistotniejsze informacje mające wpływ na innowacje w sektorze opryskiwaczy rolniczych. Swoje przemyślenia i wnioski oparł na podstawie właściwie dobranej literatury. Przetworzył czynniki społeczne, polityczne, środowiskowe i ekonomiczne, które są najistotniejsze w obszarze innowacji w tym obszarze B+R. Doktorant przedstawił parametry pracy opryskiwacza oraz właściwości cieczy, wyjaśnił pokrótce aspekty napięcia powierzchniowego, jak

również uwypuklił aspekt odpowiedniego doboru typu rozpylacza. Autor wskazał adekwatne normy, wg których identyfikuje i klasyfikuje się opryskiwacze. W dalszej części wskazane są niezwykle istotne zagadnienia związane z metodami badań rozpylaczy i opryskiwaczy rolniczych. Rozdział drugi opisuje metody automatyzacji oprysku i najnowsze badania w tym zakresie. Rozdział kończy się na przedstawieniu różnych systemów wizyjnych wspomagających oprysk. Na podstawie przedstawionej tematyki nawet osoba nieznająca bliżej tematyki pracy doktorskiej jest w stanie zorientować się w problematyce, zrozumieć na tej podstawie istotę i cel przeprowadzonych badań.

Trzeci rozdział przedstawia tezę pracy, cel i zakres. Doktorant sformułował następująco tezę pracy: *„Zastosowanie opracowanej konstrukcji i algorytmu sterowania pracą mechatronicznego rozpylacza umożliwi dostosowanie się charakterystyki oprysku do uprawianej rośliny zmniejszając ilość stosowanego środka ochrony roślin przy zachowaniu wymaganej skuteczności”*. Celem badawczym rozprawy doktorskiej jest *„Opracowanie i ocena mechatronicznego rozpylacza o zmiennej charakterystyce, dostosowującego parametry oprysku do warunków polowych, w celu zwiększenia równomierności pokrycia powierzchni rośliny oraz redukcji zużycia środków ochrony roślin względem rozwiązań standardowych”*. Doktorant sformułował również cel wdrożeniowy, który brzmi następująco: *„Celem wdrożenia jest opracowanie kompletnego, modułowego systemu mechatronicznego zespołu rozpylającego, który będzie zgodny z obowiązującymi wymaganiami legislacyjnymi i rynkowymi, a także wpisze się w założenia „Europejskiego Zielonego Ładu” oraz strategii „Od pola do stołu”. System ma zapewniać co najmniej 30% redukcję zużycia środków chemicznych w porównaniu z konwencjonalnymi metodami, przy zachowaniu porównywalnej skuteczności działania. Każdy moduł systemu powinien umożliwiać indywidualną adaptację oraz zapewniać kompatybilność z popularnym interfejsem komunikacyjnym CAN”*. W rozprawie Autor doprecyzował również problem naukowy, którym jest określenie relacji między postacią konstrukcyjną i funkcjonalnością mechatronicznego zespołu rozpylającego o zmiennej charakterystyce oprysku, a jego cechami użytkowymi, takimi jak równomierność pokrycia roślin oraz redukcja zużycia środków ochrony roślin. Autor swoje badania przeprowadził w skali laboratoryjnej oraz w warunkach polowych. Doktorant wskazał na luki wiedzy w analizowanym obszarze i na tym tle umiejscowiono tematykę recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Czwarty rozdział dotyczy projektowania mechatronicznego rozpylacza. Doktorant przedstawił koncepcję rozwiązania, która koncentruje się na opracowaniu urządzenia, które wykorzystując najnowsze rozwiązania systemów wizyjnych w połączeniu ze sztuczną inteligencją pozwoli dostosować charakterystykę oprysku do rodzaju upraw oraz zmieniających się warunków środowiskowych. W pracy przyjęto uproszczone podejście do oceny skuteczności biologicznej, z uwagi na ograniczony czas trwania doktoratu wdrożeniowego, koncentrując się na analizie wielkości kropli oraz równomierności oprysku. Doktorant założył, iż będzie możliwość sterowania ciśnieniem roboczym, natężeniem przepływu cieczy oraz geometrią rozpylacza. Obszar projektowania i dalszej analizy zawężono do upraw szerokokorządowych, natomiast badania polowe przeprowadzono na poletkach z kukurydzą. Taki wybór podyktowany był również dostępnością infrastruktury badawczej w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Poznańskim Instytucie Technologicznym. Doktorant pokrótce przedstawił i wyjaśnił zależności pomiędzy parametrami mającymi wpływ na jakość oprysku. Projektowany układ roboczy tworzą trzy zintegrowane podzespoły kinematyczne. Pierwszy podzespół to ruchoma belka nośna o dwóch stopniach swobody ruchu: pionowy i poziomy. Drugi podzespół to mechatroniczna głowica rzędowa, wyposażona w dwa silniki elektryczne oraz głowicę rewolwerową, w której umieszczono sześć końcówek rozpylających. Trzeci moduł to zespół rozpylający pozwalający na niezależne przemieszczenia w płaszczyznach poziomej i pionowej. Dzięki temu możliwa jest selektywna aplikacja pestycydów. Doktorant w dalszej kolejności opisuje szczegóły przedstawiając modele bryłowe rozpylacza oraz systemu poziomowania. Elementy głowicy rewolwerowej wykonano we wstępnej części badań z zastosowaniem druku 3D z materiału PLA, a następnie po sprawdzeniu i akceptacji

elementy wykonano z tworzywa ASA o wyższych właściwościach mechanicznych i lepszej odporności na czynniki środowiskowe. Doktorant opisał i zaprezentował modele CAD układu pracującego w międzyrzędziu oraz model CAD ramy nośnej. Trzeci podrozdział dotyczy elektroniki sterującej, elementów pomiarowych i wykonawczych konstrukcji. Zaprojektowane moduły komunikując się z przypisanymi kamerami lub czujnikami analizującymi pole uprawne. Każdy moduł sterujący może być indywidualnie zarządzany, doskonalony i optymalizowany. Rozwiązanie ma również taką zaletę, iż w przypadku awarii jednego modułu pozostałe są nadal sprawne. Doktorant kończy rozdział opisem algorytmów sterujących i rozwiązań wizyjnych. W konstrukcji opryskiwacza systemem wizyjnym jest układ do wykrywania rzędów roślin uprawnych oparty na detekcji koloru dwóch sąsiednich rzędów oraz system detekcji rośliny uprawnej oparty na algorytmach głębokiego uczenia. Trzecie rozwiązanie jest oparte na detekcji roślin w przestrzeni międzyrzędzia przy użyciu analizy barwy. Dzięki integracji systemów wizyjnych z mechatronicznymi rozpylaczami możliwe jest celne i kontrolowane kierowanie pestycydu w dokładnie określone miejsca. Doktorant zaimplementował rozwiązanie oparte na oprysku pasowo-przerywanym, gdzie oprysk jest przerywany pomiędzy kolejnymi roślinami w rzędzie. Dodatkowo system działa selektywnie w obszarze pojedynczej rośliny, gdzie wykrywane są objawy porażenia lub obecność szkodników. Doktorant w zwięzły sposób opisał wszystkie składowe badanego układu. Prezentacja poszczególnych elementów pozwala czytelnikowi na poznanie aspektów technicznych, jak również technologicznych proponowanego układu.

Piąty rozdział przedstawia wyniki badań. Analiza wyników została podzielona na trzy podrozdziały:

- badania laboratoryjne - równomierność oprysku,
- badania polowe - skuteczność oprysku,
- dyskusja wyników.

W zakresie badań laboratoryjnych Doktorant wykorzystał urządzenie do badania równomierności oprysku opracowane w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Poznańskim Instytucie Technologicznym. Analizowano regulację kątów ustawienia rozpylaczy wspomaganymi systemami wizyjnymi. Ocenę wpływu orientacji rozpylaczy na równomierność oprysku wykonano przy zmiennych odchyleniu co 10° w zakresie $0^\circ - 60^\circ$. Analizowano trzy wysokości instalacji rozpylacza nad stołem rowkowym. Przeprowadzono trzy powtórzenia. Wyniki badań pozwoliły na ilościową ocenę równomierności oprysku w zależności od zmiany kąta oraz wysokości nad powierzchnią docelową, która wynosiła 30, 40 i 50 cm nad powierzchnią stołu. Doktorant przedstawił zależności, tj. zmiana szerokości oprysku w zależności od kąta pochylenia oraz zmiana objętości cieczy użytej do oprysku w zależności od kąta pochylenia. Zaobserwowano spadek objętości wraz ze wzrostem kąta pochylenia. Doktorant analizował również zmianę asymetrii, definiowanej jako różnica liczby menzurzek zawierających wodę przed oraz po menzurce o maksymalnej objętości. Uzyskane wyniki badań analizowano również pod kątem stromości narastania i opadania. Kolejnym etapem analizy wyników badań była ocena wpływu skręcenia rozpylacza na parametry oprysku. Dla każdej z analizowanych wysokości obserwowano zawężanie się szerokości pasa oprysku oraz stopniowy wzrost objętości cieczy w menzurkach położonych centralnie. Doktorant poczynił istotne obserwacje, m.in. wykazał liniowy spadek szerokości pasa oprysku wraz ze wzrostem kąta skręcania ($R^2 = 0,93-0,97$), jak również zaobserwował wzrost wartości maksymalnej objętości cieczy wraz z kątem skręcania ($R^2 = 0,93-0,99$). Kolejny etap badań Doktoranta dotyczył badań polowych. Model badawczy mechatronicznego zespołu rozpylającego zamontowano na robocie rolniczym marki Unia. Zespół został zamontowany w przedniej części robota polowego. Robot polowy wyposażony jest standardowo w opryskiwacz składający się z dwóch głównych części, regulowanej i składanej belki polowej umieszczonej z tyłu konstrukcji oraz zbiornika o pojemności 1300 litrów umieszczonego w części środkowej. Celem badań było porównanie skuteczności oprysku rozwiązania proponowanego przez Doktoranta z tradycyjnym rozwiązaniem opryskiwacza polowego. Wymiary poletka badawczego wynosiły 35 m x 6 m. Do badań wykorzystano pole kukurydzy z rozstawem między rzędami 75 cm, natomiast odstęp pomiędzy roślinami wynosił 15

cm. Średnia wysokość roślin wynosiła ok. 85 cm. Do badań wykorzystano papierki wodoczułe. Wyznaczono trzy punkty pomiarowe: pierwszy zlokalizowano w odległości 5 m od początku rzędu na wysokości 50 cm nad powierzchnią gruntu, drugi w odległości 6 m od pierwszego, na wysokości 30 cm i trzeci w odległości 6 m od trzeciego na wysokości 10 cm. W każdym z punktów zamontowano papierki pod różnymi kątami położenia. W pierwszej fazie badań oprysk odbył się z użyciem standardowego opryskiwacza na wysokości ok. 30 cm od wierzchołków roślin. W kolejnym kroku zastosowano mechatroniczny opryskiwacz będący przedmiotem pracy własnej Doktoranta. Opryski wykonano herbicydem z ustawieniami poprawiającymi skuteczność oprysku. Pomiary wykonano dla dwóch prędkości roboczych, a każdy przejazd powtarzano trzykrotnie. Doktorant na podstawie przeprowadzonych badań zaprezentował wiele ciekawych i istotnych informacji oraz zaprezentował zależności pomiędzy analizowanymi parametrami. Autor przedstawił m.in. procentowe pokrycie papierków wodoczułych w zależności od prędkości przejazdu, zależność między wartościami maksymalnymi i minimalnymi średnimi procentowymi wypełnieniami papierków dla różnych ustawień głowic. Doktorant wykazał, iż o ile standardowy opryskiwacz wykazał wyższe wartości pokrycia, to projektowane przez Autora rozwiązanie wykazało lepszą powtarzalność i równomierność oprysku. Dodatkowa analiza statystyczna pozwoliła na wyciągnięcie dodatkowych wniosków z badań. Rozdział zamyka dyskusja wyników. Autor dokonuje podsumowania i syntetycznego omówienia otrzymanych wyników. Wnioski z badań znalazły swoje odzwierciedlenie w wynikach analiz. Zwiększenie kąta pochylenia rozpylacza spowodowało liniowe poszerzenie pasa oprysku, podczas gdy odpowiednie skrócenie rozpylacza poprawiało symetrię i równomierność rozkładu cieczy użytej do oprysku. Badania w skali laboratoryjnej i polowej potwierdziły spodziewaną zależność, iż zwiększenie prędkości przejazdu wpłynie na spadek poziomu pokrycia roślin opryskiem. Standardowe rozwiązanie opryskiwacza wykazało wyższe wartości pokrycia powierzchni, lecz oprysk był mniej równomierny. Rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta z układem rozpylacza ustawionego pod kątem 40° i oprysku bocznym charakteryzowało się bardziej równomiernym opryskiem. Proponowane rozwiązanie umożliwia ograniczenie zużycia środków ochrony roślin przy jednoczesnej skuteczności pokrycia. Doktorant wskazuje dodatkowo na ograniczenia i wady proponowanego rozwiązania. Całość rozdziału jest logicznie ułożona i prezentuje tendencje oraz zaobserwowane trendy. Schemat badawczy i metodyka przedstawione są poprawnie. Doktorant przedstawił wyniki swoich badań i poprawnie je zinterpretował. Oczywiście eksperymenty badawcze i ich zakres można byłoby rozszerzyć, lecz biorąc pod uwagę ograniczony czas na prowadzenie doktoratu, konieczność sfinalizowania pracy prowadzonej w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”, ograniczone możliwości badawcze w ramach dostępnej infrastruktury całość przedstawionej tematyki od strony prowadzenia eksperymentu badawczego uważam za poprawny i wystarczający do potwierdzenia postawionej hipotezy i realizacji założonych celów naukowych i wdrożeniowych.

Szósty rozdział dotyczy kosztów i analizy rynku. Doktorant przedstawił w tym rozdziale sześć zagadnień, tj. identyfikacja klientów i użytkowników technologii, analiza konkurencyjności i wartości rynkowej, analiza kosztów produkcji i technologiczności konstrukcji, kryteria wyceny gotowego produktu, analiza SWOT technologii oraz możliwość wariantowości rozwiązania. Doktorant jako głównym odbiorców proponowanego rozwiązania wskazał gospodarstwa rolne, w szczególności te które wdrażają zasady zrównoważonego rozwoju. Rozwiązanie ma duży potencjał do wdrożenia w autonomicznych robotach rolniczych. W dalszej części pracy przedstawione są wybiórcze dane dotyczące rynku opryskiwaczy rolniczych, które Doktorant zatytułował „analiza konkurencyjności i wartości rynkowej”. Na podstawie podtytułu można spodziewać się znacznie szerszej analizy i moim zdaniem tytuł podrozdziału powinien być przeformułowany, gdyż nie odpowiednia w pełni przedstawionej treści. Niemniej jednak zagadnienia zawarte w tej części pracy są jak najbardziej uzasadnione w kontekście przedstawienia potencjału wdrożeniowego zaprezentowanego rozwiązania w obecnej sytuacji rynkowej. W dalszej części Autor prezentuje analizę kosztów produkcji

i technologiczności konstrukcji. Jest to pewien zarys czy wstępna próba oszacowania kosztów w odniesieniu do bieżącej sytuacji rynkowej. Oczywiście jest fakt, że taka analiza będzie inna dla poszczególnych przedsiębiorstw i w zależności od parku maszynowego firmy oraz skali produkcji. Przedstawione informacje są zaprezentowane na pewnym poziomie ogólności i w uproszeniu, jednak podejmują ważne aspekty z punktu widzenia możliwości wdrożenia rozwiązania do produkcji. Doktorant przedstawił również aspekty kryteriów wyceny gotowego produktu, które uwzględniają aspekty techniczne, ekonomiczne oraz rynkowe. Interesująca jest analiza SWOT rozwiązania. Doktorant wyszczególnił następujące mocne strony rozwiązania:

- ✓ innowacyjne rozwiązanie,
- ✓ wpisanie się w aktualne trendy panujące na rynku maszyn rolniczych,
- ✓ ograniczanie ilości stosowanych środków chemicznych,
- ✓ wpisuje się w zasady rolnictwa precyzyjnego.

Do słabych stron zaliczono:

- ✓ wyższe koszty (automatyka sterowania),
- ✓ problemy z dostępnością podzespołów,
- ✓ bardziej skomplikowane diagnozowanie i naprawa.

Wśród szans Doktorant wyróżnił:

- ✓ aktualny trend automatyzacji rolnictwa,
- ✓ pomoc polskim firmom w innowacjach,
- ✓ możliwość prezentacji produktu na targach rolniczych,
- ✓ ograniczenia stosowania pestycydów (regulacje UE).

Za zagrożenia natomiast uznano:

- ✓ brak zainteresowania ze strony rolników i producentów,
- ✓ konkurencyjny produkt pojawi się szybciej na rynku,
- ✓ prawny zakaz stosowania pestycydów,
- ✓ zmiana kierunków rozwoju w rolnictwie,
- ✓ zbyt duże koszty w stosunku do zysków.

Przeprowadzona analiza wykazała dominację szans i mocnych stron (strategię maxi-maxi). Na tej podstawie pojawiły się zalecenia wzmacniania mocnych stron (np. badania, rozwój produkt), eliminacja słabych stron (np. system diagnostyki) oraz wykorzystanie szans, np. prezentacje na targach. Doktorant w ostatnim podrozdziale przedstawił możliwość wykorzystania każdego modułu z opracowanego rozwiązania jako osobnego systemu. Zaproponowano kilka rozwiązań, tj. moduł ruchów poziomych i pionowych, moduł detekcji chwastów w międzyrzędziu, moduł mechatronicznego rozpylacza z systemem zmian rozpylaczy i kątów oprysku oraz moduł systemu ruchomego rozpylacza. Każdy z modułów jest syntetycznie opisany. Przetawiony rozdział oceniam pozytywnie, lecz jest to raczej wstęp do szerszej analizy, którą można by rozszerzyć z udziałem konkretnej firmy, w której implementacja rozwiązania byłaby możliwa. Niemniej jednak należy docenić ten fragment rozprawy Doktoranta, w którym podjęto zagadnienie należące zazwyczaj do innego obszaru badawczego.

Siódmy rozdział dotyczy aspektów potencjału wdrożeniowego. Doktorant przedstawił możliwości integracji rozwiązania z istniejącymi opryskiwaczami. Jedną z możliwości wykorzystania rozwiązania Doktoranta jest integracja pojedynczych modułów do używanych już przez rolników standardowych opryskiwaczy. W ten sposób możliwe byłoby tańsze zaadoptowanie rozwiązania. Doktorant zaproponował różne możliwości adaptacji modułu mechatronicznego rozpylacza. W drugim podrozdziale pracy Doktorant przedstawia projekty układów pomiarowych do kalibracji i kontroli. W trzecim podrozdziale Autor wskazuje na zalety i wady zaproponowanego przez siebie rozwiązania. Jest to niezwykle ważny aspekt pracy, gdzie Doktorant krytycznie podchodzi do przedstawionego przez siebie rozwiązania. W ostatnim podrozdziale przedstawione są inne możliwości wykorzystania zaproponowanego przez Doktoranta rozwiązania. Autor proponuje wykorzystanie konstrukcji

w przestrzeni miejskiej do utrzymania czystości, tj. selektywnej eliminacji chwastów bądź w kolejnictwie. Zaproponowano również wykorzystanie opryskiwacza dla służb utrzymania dróg i autostrad.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie otrzymanych wyników. Wnioski korespondują z założonymi celami pracy i wynikają z przeprowadzonych badań i analizy wyników. Doktorant podzielił swoje spostrzeżenia na wnioski dotyczące tezy pracy, wnioski poznawcze, wnioski użytkowe, wnioski dotyczące dalszej pracy oraz wnioski wdrożeniowe.

Praca przygotowana jest starannie od strony graficznej i zapewne Autor poświęcił dużo swojej pracy na dopracowanie graficzne rozprawy, jak również na wyjaśnienia i opisy, które wprowadzają czytelnika w skomplikowaną tematykę.

5. Uwagi szczegółowe

Uwagi krytyczne, głównie o charakterze dyskusyjnym, które nasuwają się podczas czytania pracy, przedstawione zostały poniżej. Są to jednak uwagi, po uwzględnieniu których praca nabrałaby większej czytelności i przejrzystości. Uwagi te nie wymagają ponownego złożenia rozprawy doktorskiej. Sformułowane w niniejszej recenzji uwagi nie umniejszają wartości pracy. Być może warto niektóre kwestie wyjaśnić, dlatego poniżej sformułowałam kilka pytań do dyskusji. Wybrane uwagi szczegółowe opisano poniżej:

- W rozprawie Autor sformułował tezę pracy: *„Zastosowanie opracowanej konstrukcji i algorytmu sterowania pracą mechatronicznego rozpylacza umożliwi dostosowanie się charakterystyki oprysku do uprawianej rośliny zmniejszając ilość stosowanego środka ochrony roślin przy zachowaniu wymaganej skuteczności”*. Myślę, że przedstawiona teza powinna nazywać się raczej hipotezą, gdyż tezy są w matematyce i logice, wymagają dowodu, natomiast w badaniach empirycznych, które przedstawiono Autor zawarł pewne przypuszczenie, a następnie hipotezę przyjął. Inaczej mówiąc potwierdził swoje przypuszczenie. Dla tezy należy przeprowadzić dowód, a *„hipotezy po ich zweryfikowaniu i uznaniu za zdania wiedzy naukowej, są istotnymi składnikami struktury nauki”* [Metodologia nauk empirycznych. 12 wykładów. Stanisław Pabis, 2007]. Przesyłam Doktorantowi wykład piąty do przestudiowania, gdyż nie jestem w stanie tak dobrze wytłumaczyć różnicy pomiędzy tezą a hipotezą, jak zrobiłby to prof. Stanisław Pabis.
- W rozdziale dotyczącym czynników determinujących innowacje w technologii oprysku rolniczego Autor przedstawia innowacje w technologiach oprysku jako efekt współpracy pomiędzy ośrodkami badawczo-rozwojowymi a firmami produkującymi maszyny rolnicze i odwołuje się do sławnych producentów zagranicznych (str. 18, 22 pracy). Warto byłoby w tym miejscu wskazać również współpracę na tym polu w ujęciu krajowym. Podobnie w rozdziale 2.5 „Systemy wizyjne wspomagające oprysk” Autor jako przykład zastosowania sieci neuronowych podaje przykład rozwiązań szwajcarskich. Czy znane są Doktorantowi rozwiązania Polskie w tym obszarze?
- W zakresie uzasadnienia podjęcia tematu doktoratu i wykazania luki badawczej Doktorant bardzo trafie i syntetycznie wyjaśnił swoją motywację naukowo-badawczo-wdrożeniową. Brakuje mi jednak szerszego przeglądu dotychczasowych rozwiązań komercyjnych i podania przykładów niekoniecznie w tym rozdziale. Znając tematykę Doktorant z pewnością byłby w stanie opracować w tym zakresie osobny rozdział czy artykuł typu review.
- Str. 19 W tekście wskazano *„Poniżej przedstawiono kolejne etapy powstawania kropeł w najpopularniejszych rozpylaczach szczelinowych [39]”*, jednak nie przedstawiono adekwatnego rysunku w tym zakresie.

- Rozdział 4.4 „algorytmy sterujące i rozwiązania wizyjne” Autor dość ogólnikowo i zdawkowo odnosi się i opisuje algorytmy głębokiego uczenia. Nie podano informacji, kiedy pozyskano zbiór danych wejściowych, ile zdjęć wykorzystano do trenowania, etc.
- Str. 88 Czy w zdaniu „Przy prędkości $0,5\text{ ms}^{-1}$ i ustawieniu papierka bocznie do kierunku jazdy (Rys. 5.29) widać, że wariant standardowy notuje wyższe mediany pokrycia na wszystkich analizowanych wysokościach 10, 30 i 50 cm” nie wystąpiła pomyłka? Z wykresu wynika, że tylko dla 10 cm mediana jest większa dla wariantu standardowego.
- Str. 89 Autor wskazuje „Dla wysokości 10 i 50 cm widoczne są węższe zakresy międzykwartylowe na korzyść rozwiązania standardowego”. Z analizy rysunku 5.31 wynika, że korzystniejsze jest rozwiązanie projektowane. Prośba o weryfikację
- Uważam, że tytuł podrozdziału 6.2 „Analiza konkurencyjności i wartości rynkowej” jest użyta na wyrost. Autor prezentuje wybiórcze informacje rynkowe na 3 stronach. Tego typu analiza stanowi niejednokrotnie wielostronicowe opracowanie, gdzie przedstawione są obszerne analizy rynku docelowego, z informacjami szczegółowymi, tj. charakterystyka rynku, wielkość rynku, trendy, dynamika, przeprowadzona jest identyfikacja potrzeb użytkowników, przedstawione są rozwiązania konkurencji wraz z podaniem szczegółów kluczowych cech, opisem przewagi konkurencyjnej, potencjał komercyjny, wycena jakościowa i ilościowa, aspekty prawne i regulacyjne.
- Warto byłoby pod koniec każdego z podrozdziałów dotyczących analizy wyników badań odnieść się do badań innych naukowców i ich wyników badań przeprowadzając tym samym dyskusję swoich wyników badań na tle aktualnego stanu wiedzy.

6. Ocena formalna pracy

Praca stanowi oryginalne i samodzielne dzieło twórcze. Treść pracy jest zgodna z tematem podanym w tytule i z zadeklarowanym celem pracy. Praca została napisana starannie, zrozumiałym językiem i zgodnie ze schematem przyjętym dla prac doktorskich. Z rozprawy wynika, iż mgr inż. Sebastian Szymczyk pogłębił swoją wiedzę oraz umiejętności badawcze i poznał literaturę przedmiotu, do którego należy temat pracy. Doktorant przyczynił się do rozwoju wiedzy naukowej.

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam pozytywnie jako pracę wartościową. Podsumowując stwierdzam, iż rozprawa spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego, spełnia wymóg wykazania Jego ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autora pracy naukowej.

7. Wniosek końcowy

Ocena stanowiąca podstawę sformułowania merytorycznej oceny pracy jest pozytywna. Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Szymczyka stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego. Rozprawa potwierdza umiejętność prowadzenia prac badawczych przez Autora i jego wiedzę teoretyczną. Stwierdzam, iż recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 574 z późn.zm.)). Przedkładam więc Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna wniosek o dopuszczenie mgr inż. Sebastiana Szymczyka do publicznej obrony recenzowanej przeze mnie pracy pt. „Opracowanie i badania mechatronicznego rozpylacza opryskiwacza rolniczego o zmiennej charakterystyce oprysku”.

Janina Orłowska