

WPLYNEŁO DNIA	
20.02.2025r.	
data	
Kierownik administracyjny	
nr pisma	wydział podpis

Koszalin, dnia 07.02.2025 r.

mgr Kamila Czerniak

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Raławicka 15/17
75-620 Koszalin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Michał ZAWADA**

pt.: *Badanie cech geometrycznych elementów skrawających glebę z zastosowaniem automatycznych systemów sterowania maszynami rolniczymi*

Promotor rozprawy doktorskiej: **Prof. dr hab. inż. Stanisław LEGUTKO, dr h.c., prof. h.c.**

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: **Dr inż. Roman ROGACKI**

Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 03.12.2024 r. Pana dr hab. inż. Bartosza GAPIŃSKIEGO, prof. PP.

1. Podstawowe dane o Kandydacie do stopnia doktora

Mgr inż. Michał Zawada studiował w latach 2011÷2016 na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, na kierunku Mechatronika, uzyskując tytuł magistra inżyniera w specjalności Konstrukcje Mechatroniczne. W 2020 roku rozpoczął studia doktoranckie na Politechnice Poznańskiej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej, w Instytucie Technologii Mechanicznej, w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Doświadczenie zawodowe zdobywa w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym od 2016 roku. Po uzyskaniu dyplomu rozpoczął pracę zawodową na stanowisku konstruktora. Obecnie pracuje na stanowisku głównego specjalisty ds. mechatroniki i automatyki. W trakcie pracy zawodowej brał udział w realizacji wielu projektów badawczych i wdrożeniowych w obszarze projektowania i budowania systemów mechatronicznych oraz prowadzenia badań eksperymentalnych prototypów maszyn rolniczych. Od 2024 jest redaktorem naczelnym czasopisma „Rolnictwo Przyszłości”.

Kandydat jest współautorem 19 publikacji, 16 wystąpień konferencyjnych, 6 zgłoszeń patentowych w tym 4 przyznanych. Dziesięć artykułów jest rozpowszechnieniem wyników badań wykonanych w ramach rozprawy doktorskiej oraz analiz literatury w tym zakresie.

Zgodnie z oświadczeniem mgr inż. Michał Zawada nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia naukowego doktora.

2. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała ZAWADY, o łącznej objętości 210 stron, składa się z 10 rozdziałów oraz zawiera 124 rysunki i 16 tabel. Ponadto, na początku rozprawy zamieszczono *Streszczenie, Summary i wykaz akronimów, symboli i oznaczeń*, a w końcowej części pracy *Spis rysunków, Spis tabel oraz Spis literatury*, obejmujący aż 168 pozycji (w tym 125 obcojęzycznych) wśród których są publikacje źródłowe, książki, monografie, rozprawy,

artykuły opublikowane w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych, referaty zamieszczone w materiałach konferencyjnych oraz strony internetowe. W spisie literatury są dwie współautorskie publikacje z udziałem Doktoranta.

3. Tytuł i tematyka rozprawy

Tytuł rozprawy doktorskiej „*Badanie cech geometrycznych elementów skrawających glebę z zastosowaniem automatycznych systemów sterowania maszynami rolniczymi*” wskazuje na badania dotyczące geometrycznych właściwości narzędzi skrawających glebę oraz automatycznych systemów sterowania. Zatem jest dość ogólny i obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z automatyzacją, geometrią narzędzi i wpływem tych czynników na skuteczność pracy maszyn rolniczych. Tytuł obejmuje kilka różnych obszarów badawczych, co może być zarówno zaletą, jak i wyzwaniem. Jednak w rozprawie analizowano również aspekty ekologiczne i wdrożeniowe, zatem według mnie tytuł powinien być nieco szerszy, np. „*Badanie cech geometrycznych elementów skrawających glebę i zastosowanie systemów automatycznych w procesach agrotechnicznych z uwzględnieniem zrównoważonego rozwoju*”.

Podjęcie tematu doktoratu jest uzasadnione zarówno przez aktualne potrzeby w zakresie rolnictwa precyzyjnego, jak i przez istotne luki badawcze, które zostały zidentyfikowane w przeprowadzonej analizie literatury. Wzrost zainteresowania metodami przyjaznymi ekologicznie, takimi jak mechaniczne pielnie, wiąże się z koniecznością poprawy efektywności procesów rolniczych przy jednoczesnym zmniejszeniu ich wpływu na środowisko. W tym kontekście rozwój technologii maszyn rolniczych, w tym autonomicznych pojazdów polowych, staje się kluczowy. Ponieważ autonomiczne maszyny rolnicze charakteryzują się możliwością długotrwałej pracy bez przerw na przeprowadzanie rutynowych prac eksploatacyjnych, optymalizacja zużycia energii, a w tym także redukcja obciążeń narzędzi roboczych, stanowi jeden z głównych kierunków rozwoju nowoczesnych maszyn rolniczych.

Uzasadnieniem podejmowanych badań jest także rosnąca potrzeba dostosowania technologii do zmieniających się warunków polowych, co jest kluczowe w kontekście rolnictwa precyzyjnego oraz 4.0. Integracja mechatronicznych sekcji pielących z narzędziami o zmiennej geometrii umożliwi optymalizację procesu pielienia, w zależności od zmiennych warunków, takich jak rodzaj gleby, wilgotność czy stopień zachwaszczenia. Takie rozwiązania pozwalają na precyzyjne dostosowanie parametrów pracy maszyn, co jest kluczowe dla zwiększenia efektywności procesów rolniczych, zmniejszenia zużycia energii oraz poprawy jakości upraw.

Zasadność podjęcia tematyki doktoratu wynika także z doświadczenia pracodawcy Doktoranta w zakresie projektowania autonomicznych pojazdów rolniczych, co umożliwia wykorzystanie istniejącej infrastruktury i zasobów technicznych w realizacji badań. Projektowanie narzędzi adaptujących się do zmieniających się warunków polowych odpowiada na rosnące zapotrzebowanie na innowacyjne rozwiązania w rolnictwie, co czyni ten temat istotnym z punktu widzenia nowoczesnych technologii.

W ramach analizy literatury zauważono istotną lukę badawczą dotyczącą braku rozwiązań umożliwiających adaptację narzędzi skrawających glebę do zmiennych warunków polowych w czasie rzeczywistym. Chociaż istnieją prace dotyczące geometrii narzędzi skrawających oraz ich wpływu na obciążenia, to brak jest kompleksowego podejścia, które uwzględniłoby możliwość dynamicznej zmiany geometrii narzędzi w czasie rzeczywistym w odpowiedzi na zmienne warunki glebowe. Rozwiązanie to jest innowacyjne, ponieważ integruje elementy mechatroniki, automatyki oraz analizy parametrów gleby, co stanowi istotny postęp w inżynierii rolniczej.

Celem pracy jest **zatem zaprojektowanie i przetestowanie mechatronicznej sekcji pielącej**, która umożliwi dostosowanie geometrii narzędzi skrawających w zależności od zmieniających się warunków polowych. Dzięki temu możliwe będzie zmniejszenie

energochłonności procesu pielenia, co przekłada się na efektywność energetyczną maszyn rolniczych, a tym samym na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych i wydłużenie czasu pracy autonomicznych pojazdów rolniczych. Dodatkowo, rozwiązanie to odpowiada na potrzeby związane z rolnictwem precyzyjnym, pozwalając na zbieranie danych, które mogą być wykorzystywane do dalszej optymalizacji pracy maszyn w oparciu o algorytmy sztucznej inteligencji.

Podjęte badania mają zatem charakter innowacyjny, a ich realizacja może przyczynić się do rozwoju nowych technologii w zakresie rolnictwa, które będą bardziej efektywne energetycznie, dostosowane do lokalnych warunków polowych i mniej inwazyjne dla środowiska. Luka badawcza polegająca na braku narzędzi adaptujących się do warunków polowych w czasie rzeczywistym, stanowi podstawę dla podjęcia badań nad nowym rozwiązaniem, które będzie miało zastosowanie w rolnictwie 4.0 i rolnictwie precyzyjnym.

Uważam, że wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała ZAWADY, ma duże znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne i jest w pełni uzasadniony.

4. Cele, hipotezy i zakres rozprawy

Głównym celem badawczym jest: Opracowanie mechatronicznej sekcji pielniaka zmniejszającej energochłonność wykonywanego zabiegu agrotechnicznego.

Celami szczegółowymi są:

- opracowanie metody ciągłej analizy kluczowych parametrów związanych z obróbką gleby podczas pielenia mechanicznego (z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego projektowanego rozwiązania),
- porównanie (wyznaczenie wskaźnika) energochłonności procesu pielenia mechanicznego za pomocą opracowanej sekcji mechatronicznej w odniesieniu do energochłonności zabiegu pielenia realizowanego za pomocą konwencjonalnej sekcji pielącej.

Celem wdrożeniowym było zachowanie kompatybilności opracowanego urządzenia z maszynami i pojazdami rolniczymi, zgodność z założeniami polityki zrównoważonego rozwoju oraz ochronę prawną rozwiązania.

Według mnie cele badawcze są dobrze powiązane z tytułem, jednak niektóre z nich (np. aspekty wdrożeniowe, polityka zrównoważonego rozwoju czy kwestie prawne) mogą wykraczać poza to, co sugeruje tytuł, jeśli chodzi o główny nacisk na geometrię elementów skrawających. Można by rozważyć nieco bardziej precyzyjne określenie zakresu, aby uniknąć potencjalnego rozmycia zakresu rozprawy.

Główny cel dotyczy opracowania mechatronicznej sekcji pielniaka, mającej na celu zmniejszenie energochłonności zabiegu. To jest w pełni spójne z tytułem, ponieważ koncentruje się na optymalizacji pracy maszyn rolniczych, ale także wprowadza bardziej złożony aspekt mechatroniczny.

Cele szczegółowe obejmują analizę kluczowych parametrów związanych z obróbką gleby oraz porównanie energochłonności z konwencjonalnymi rozwiązaniami. Te cele są również adekwatne, jednak może się pojawić pytanie, na ile aspekt „automatycznych systemów sterowania” pojawia się w analizie parametrycznej i porównaniach, ponieważ cel ten jest bardziej ogólny w zakresie technologicznym, a nie tylko automatyki.

Cel wdrożeniowy dotyczy kompatybilności z maszynami rolniczymi, polityką zrównoważonego rozwoju i ochroną prawną rozwiązania. Jest to jak najbardziej uzasadnione, ale nie jest w pełni odzwierciedlone w tytule, który nie odnosi się bezpośrednio do aspektów wdrożeniowych, takich jak polityka zrównoważonego rozwoju czy kwestie prawne.

Ponadto, w różnych miejscach rozprawy, np. w punkcie 1.2 Autor wskazuje, że **głównym celem rozprawy jest zaprojektowanie nowoczesnego narzędzia**, które ma na celu zmniejszenie obciążeń generowanych w czasie pielienia upraw, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności operacyjnej. Podkreśla również, że zaprojektowane narzędzie ma przelożyć się na wydłużenie pracy robotów polowych, polepszenie efektywności energetycznej i zwiększenie opłacalności ich stosowania. Natomiast *w zakresie pracy* Autor wskazuje, że celem jest opracowanie mechatronicznej sekcji pielącej dla upraw rzędowych wyposażonej w narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających oraz ocenę jej efektywności w warunkach polowych. Przeprowadzono badania na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym, które umożliwiły analizę obciążeń dla dwóch przypadków narzędzi: standardowego i mechatronicznego, z uwzględnieniem wpływu zmiany kątów skrawania oraz prędkości na generowane obciążenia. Jednakże, w tytule rozprawy, brak jest odniesienia do rzeczywistego zaprojektowania tego narzędzia, co budzi pewną wątpliwość, czy cel ten został w pełni uwzględniony w pracy.

Pojawia się również wątpliwość, czy cele i hipotezy pracy w pełni odpowiadają opisowi zakresu, który koncentruje się głównie na aspektach mechatronicznych, takich jak zmiana geometrii narzędzi skrawających i analiza ich wpływu na obciążenia. W związku z tym warto rozważyć doprecyzowanie, w jaki sposób cele badawcze pracy, szczególnie w kontekście zmniejszenia obciążeń i zwiększenia efektywności energetycznej, są spójne z opisanym zakresem pracy. Istnieje potrzeba dokładniejszego wskazania, w jakim stopniu te cele są związane z zaprojektowaniem i oceną działania mechatronicznej sekcji pielącej w kontekście przyjętej metodologii.

W związku z przedstawionymi wątpliwościami dotyczącymi spójności tytułu, celów i zakresu pracy, pojawia się także pytanie o ewentualny wpływ tej niejednoznaczności na zaproponowane problemy naukowe. Jeśli tytuł, cele badawcze i zakres pracy nie są w pełni zgodne, może to wpłynąć na precyzyjne określenie kierunków badań i metodologii, które powinny być podjęte w ramach rozprawy. W szczególności może to rzutować na formułowanie problemów naukowych, które Autor ma zamiar rozwiązać, oraz na ustalenie hipotez badawczych, które będą badane w kontekście zaprojektowanego narzędzia.

Proponuję, aby Autor rozważył ujednoczenie tytułu i celów badawczych z zakresem pracy, precyzyjniej określając, jak projektowanie narzędzia o zmiennej geometrii, zmniejszanie obciążeń oraz zwiększanie efektywności energetycznej mogą być traktowane jako spójne problemy naukowe, które wymagają dokładnej analizy i eksperymentalnych badań. Zwiększy to jasność i ukierunkowanie pracy oraz ułatwi ściśle powiązanie problemów badawczych z założeniami doktoratu.

Hipoteza 1: Zaprojektowana w ramach doktoratu wdrożeniowego konstrukcja narzędzia połączona z elementami automatyki w pielniku mechanicznym umożliwi zmianę geometrii narzędzi skrawających glebę przy prędkościach pielienia do 10 km/h w celu zmniejszenia oporów skrawania o 10% przy zachowaniu poprawności wykonania zabiegu agrotechnicznego.

Hipoteza 2: Odpowiednia kinematyka sekcji pielącej w połączeniu z czujnikami oraz elementami wykonawczymi umożliwi kształtowanie powierzchni gleby na terenach pofałdowanych w celu zmniejszenia erozji wodnej pól uprawnych.

Analizując treść hipotez można stwierdzić, że:

Hipoteza 1 mówi o wpływie zaprojektowanej konstrukcji narzędzia na zmniejszenie oporów skrawania przy prędkości do 10 km/h. Jest to bardzo precyzyjna hipoteza, w pełni odnosząca się do badań nad geometrią narzędzi skrawających, co jest zgodne z tytułem. Warto dodać, że hipoteza porusza także kwestie automatyki (zmiana geometrii narzędzi przy zastosowaniu systemów sterowania), co wiąże się z tytułem.

Hipoteza 2 odnosi się do kinematyki sekcji pielącej i zastosowania czujników oraz elementów wykonawczych w celu zmniejszenia erozji wodnej. Związane jest to z celami ekologicznymi i technologicznymi, ale nie bezpośrednio z „geometrią elementów skrawających” czy „automatycznymi systemami sterowania”. Choć technologia wykorzystywana w hipotezie jest istotna, wprowadza szerszy kontekst, który nie do końca odzwierciedla tytuł. Można by rozważyć doprecyzowanie, w jaki sposób ta kinematyka łączy się z geometrią narzędzi i systemami sterowania.

Do tak sformułowanych hipotez nasuwają się drobne uwagi, gdyż sformułowano je w trybie twierdzącym, który stosowany jest w tezach, natomiast w hipotezach powinno się stosować tryb przypuszczający. Istnieje zasadnicza różnica między tezą a hipotezą, która polega na tym, że tezy należy udowodnić, a hipotezy – zweryfikować. Hipotezy powinny być postawione w trybie przypuszczającym, aby wskazać, że to, co stawiamy, jest jedynie przypuszczeniem, które będzie testowane i może zostać albo potwierdzone, albo obalone na podstawie wyników badań. W ten sposób nadajemy hipotezom charakter przypuszczający i otwieramy pole do ich weryfikacji, a nie do udowodnienia. Dzięki temu badania będą miały charakter bardziej eksperymentalny i otwarty na różne wyniki.

Ponadto, według mnie hipoteza pierwsza jest dość trywialna, ponieważ zakłada, że zmiana geometrii narzędzi przy prędkościach do 10 km/h zmniejszy opory skrawania o 10%. To założenie może być zbyt oczywiste i mało innowacyjne, a więc warto je doprecyzować lub skoncentrować się na bardziej skomplikowanej zależności, którą warto zbadać. Może warto dodać więcej zmiennych lub zmienić podejście, aby hipoteza była bardziej interesująca i innowacyjna.

Należy również podkreślić, że w wielu przypadkach, szczególnie w rozprawach doktorskich, formułowanie hipotez nie jest wymagane, a zamiast nich można skupić się na precyzyjnym określeniu **problemów badawczych**. Problem badawczy może być równie skuteczną metodą przedstawienia kierunku badań i głównych zagadnień, które będą analizowane w pracy.

Problemy badawcze to pytania, na które rozprawa ma odpowiedzieć, a nie przypuszczenia, które należy zweryfikować. Tego rodzaju podejście jest bardziej elastyczne, szczególnie w badaniach o charakterze eksploracyjnym lub w przypadkach, gdy badania są jeszcze na etapie poszukiwania konkretnych zależności, a nie mają jednoznacznie sformułowanych hipotez.

Zatem, zamiast hipotez, moglibyśmy sformułować **problemy badawcze**, które będą wyrażały główne zagadnienia, które rozprawa zamierza zbadać:

Problem badawczy 1: Jakie zmiany geometrii narzędzi skrawających glebę mogą prowadzić do zmniejszenia oporów skrawania podczas pielenia mechanicznego przy prędkości do 10 km/h, zachowując jednocześnie efektywność zabiegu agrotechnicznego?

Problem badawczy 2: W jaki sposób odpowiednia kinematyka sekcji pielącej oraz zastosowanie czujników i elementów wykonawczych mogą wpłynąć na kształtowanie powierzchni gleby na terenach pofałdowanych, w celu zmniejszenia erozji wodnej?

Według mnie takie podejście może być korzystniejsze, gdyż:

- Problemy badawcze są bardziej otwarte, a badacz ma większą swobodę w eksplorowaniu wyników.
- Problemy badawcze jasno wskazują na pytania, które mają być rozwiązane, a nie na przypuszczenia do zweryfikowania.
- Podejście oparte na problemach badawczych jest bardziej odpowiednie, gdyż badania są bardziej oparte na eksperymentach i analizie danych, a nie na potwierdzaniu hipotez.

Takie podejście jest bardziej właściwe, szczególnie w przypadku bardziej otwartych badań, gdzie nie wszystkie aspekty są w pełni określone na początku pracy. Zamiast hipotez, praca może skoncentrować się na wyraźnie określonych problemach badawczych.

Opisane przeze mnie propozycje dotyczące tytułu rozprawy, celów badawczych i hipotez mają charakter dyskusyjny i nie ujmują innowacyjnego charakteru pracy ani jej znaczenia w kontekście wypełniania istniejącej luki badawczej w obszarze optymalizacji procesów pielenia mechanicznego z wykorzystaniem technologii mechatronicznych. Proponowane zmiany w geometrii narzędzi skrawających oraz zastosowanie systemów automatycznych w celu zmniejszenia energochłonności i poprawy jakości zabiegów agrotechnicznych są w pełni uzasadnione i wskazują na nowatorskie podejście do rozwiązania problemów związanych z efektywnością energetyczną w rolnictwie.

Choć niektóre kwestie, takie jak polityka zrównoważonego rozwoju czy aspekty prawne, mogą wykraczać poza bezpośredni zakres tytułu, nie umniejsza to znaczenia tych zagadnień w kontekście wdrożeniowego charakteru pracy, który również stanowi istotny element całościowego podejścia do projektowanego rozwiązania. Wszystkie te elementy są częścią innowacyjnej koncepcji, która nie tylko wprowadza nowe technologie do branży rolniczej, ale również odpowiada na konkretne wyzwania związane z efektywnością energetyczną, ochroną środowiska oraz przyszłością mechanizacji rolniczej.

W związku z powyższym, sugerowane zmiany w zakresie precyzyjnego formułowania problemów badawczych oraz przekształcenie hipotez na bardziej otwarte pytania badawcze mają na celu jedynie usprawnienie struktury rozprawy, bez wpływu na jej innowacyjność i znaczenie w naukowym kontekście.

5. Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Michała ZAWADY dotyczy innowacyjnego zagadnienia z zakresu technologii rolniczych, a konkretnie rozwoju mechatronicznej sekcji

pielącej, która pozwala na zmniejszenie energochłonności pielenia mechanicznego. Jest to temat, który jest w pełni uzasadniony przez aktualne potrzeby rolnictwa, zwłaszcza w kontekście rosnących wymagań związanych z automatyzacją i efektywnością energetyczną maszyn rolniczych. Rozprawa obejmuje dziesięć rozdziałów. Poprzedzona jest spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów. Na końcu pracy zamieszczono wykaz literatury, spis rysunków i spis tabel.

Struktura podziału treści na rozdziały i podrozdziały jest w zasadzie prawidłowa, jednak udziały poszczególnych rozdziałów nie są poprawne. Na przykład *Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury* jest bardzo obszerny i obejmuje aż 69 stron co stanowi ponad 32% rozprawy i znacznie przekracza przyjęty zakres.

Wykaz akronimów symboli i oznaczeń zawiera najważniejsze symbole, ich określenia i wymiary. Jednak można dostrzec pewne nieścisłości dotyczące definicji niektórych parametrów chropowatości. Przykładowo przyjęto, że wymiarem przyspieszenia jest $[m \cdot s^{-2}]$ a powinno być $[m \cdot s^{-2}]$. Moment skręcający M_i ($i=x, y, z$) określono jako „moment skręcający odczytany przez czujnik w i-tym kierunku”. Według mnie bardziej poprawnie powinno być „moment skręcający względem i-tej osi odczytany przez czujnik”. Również określenie naprężenia normalne i styczne jest nieprecyzyjne. W analizowanym przypadku zachodzi przestrzenny stan naprężeń opisany za pomocą tensora naprężeń T_σ , który zawiera aż 9 składowych, w tym trzy składowe normalne i sześć składowych stycznych. Zatem przejście do płaskiego stanu naprężeń wymaga uzasadnienia.

Numeracja zastosowana w *Spisie treści* jest myląca, gdyż różne punkty zawierają identyczną numerację. Na przykład: 2.1. *Wprowadzenie (str. 15)* oraz 2.2. *Czynniki determinujące innowacje i rozwój metod pielęgnacji upraw (str. 15)* oraz 2.1. *Podział gleb uprawnych w odniesieniu do oporów skrawania (str. 24)* i 2.2. *Erozja wodna gleb (str. 33)*.

Rozdział *Wstęp* (pkt. 1) zawiera trzy punkty: 1.1 *Wprowadzenie*, 1.2 *Geneza pracy i uzasadnienie wyboru tematu* oraz 1.3 *Zakres pracy*. Wstęp rozprawy doktorskiej przedstawia klarowną i kompleksową prezentację aktualnych wyzwań w nowoczesnym rolnictwie, zwracając uwagę na konieczność dostosowania metod uprawy i pielęgnacji do rosnącego zapotrzebowania na żywność, przy jednoczesnym uwzględnieniu zasad ekologicznych. Autor poprawnie wskazuje na kluczowe zagadnienia związane z minimalizowaniem zużycia środków ochrony roślin, nawozów oraz zmniejszania energochłonności procesów, które są istotne zarówno z punktu widzenia efektywności produkcji, jak i ochrony środowiska.

Podjęcie wątku rolnictwa precyzyjnego i technologii 4.0 jest szczególnie trafne, ponieważ te innowacyjne metody mogą znacząco przyczynić się do realizacji wymienionych celów. Autor z powodzeniem wskazuje na znaczenie map aplikacyjnych opartych na badaniach zasobności gleby oraz na alternatywnych technologiach, takich jak czujniki montowane na maszynach rolniczych czy zdjęcia satelitarne, które mogą zrewolucjonizować podejście do monitorowania warunków glebowych. Wprowadzenie do problematyki autonomicznych pojazdów rolniczych oraz ich rozwoju również wpisuje się w aktualne trendy, co pozwala lepiej zrozumieć kontekst i znaczenie podejmowanej tematyki.

Należy pochwalić umiejętne wplecenie w rozważania kwestii energochłonności, zwłaszcza w kontekście autonomicznych pojazdów, które wymagają optymalizacji zarówno pod względem wydajności energetycznej, jak i opłacalności. Zawarte wstępnie rozważania na temat pielenia mechanicznego, w tym zmieniającego się podejścia do tej metody w kontekście ograniczenia

stosowania herbicydów, są dobrze osadzone w obecnych wyzwaniach związanych z ekologicznym rolnictwem.

Geneza pracy jest odpowiednio uzasadniona, a wybór tematu wynika z rosnącej potrzeby opracowania narzędzi, które poprawią efektywność pielęgnacji upraw przy jednoczesnym minimalizowaniu negatywnego wpływu na glebę, w tym zapobieganie erozji. Zawarte odniesienie do dotychczasowych badań nad pozycjonowaniem narzędzi pielęgnacyjnych oraz identyfikacji luk w badaniach, takich jak pomijanie dostosowania narzędzi do zmieniających się warunków glebowych, stanowi dobry punkt wyjścia do dalszej analizy.

Zgłoszone w pracy odniesienia do rozwoju metod ekologicznego odchwaszczania oraz rosnącego zapotrzebowania na technologie autonomiczne stanowią mocny argument za znaczeniem podejmowanej tematyki. Dodatkowo, wskazanie na aktywności badawcze realizowane przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny stanowi dodatkowy atut w kontekście wyboru tematu doktoratu, podkreślając współczesną wartość oraz perspektywę wdrożeniową pracy.

Zakres pracy został dobrze sprecyzowany, a omawiana mechatroniczna sekcja pielęgnacyjna oraz narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających stanowią ciekawą i nowatorską propozycję w kontekście rozwiązań dla współczesnego rolnictwa. Przedstawione badania eksperymentalne, przeprowadzone na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym, są odpowiednio zaplanowane i uwzględniają różnorodne czynniki, takie jak zmiana kątów skrawania czy prędkości, które mają istotny wpływ na obciążenia generowane przez narzędzie.

Podkreślenie eksperymentalnego charakteru badań, poprzedzonych analizą literatury oraz wstępnym przeglądem dotychczasowych rozwiązań, zapewnia solidne podstawy metodologiczne do dalszych działań badawczych. Zawartość wstępu jasno wskazuje na cele i hipotezy badawcze, co daje solidne fundamenty do oceny innowacyjności zaproponowanych rozwiązań.

Podsumowując stwierdzam, że *Wstęp* rozprawy doktorskiej został napisany w sposób klarowny i przemyślany, a zaprezentowane w nim zagadnienia są adekwatne i spójne z aktualnymi potrzebami rolnictwa. Autor skutecznie łączy problemy agrotechniczne z nowoczesnymi rozwiązaniami technologicznymi, wskazując na potencjał innowacyjności proponowanego narzędzia w kontekście zmniejszenia energochłonności oraz poprawy efektywności operacyjnej w rolnictwie. Zawarte wstępnie analizy, wskazania na luki badawcze oraz uzasadnienie wyboru tematu stanowią solidną podstawę do dalszych rozważań, a sama tematyka rozprawy ma duże znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne.

Rozdział drugi *Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury* jest obszerny, gdyż obejmuje łącznie aż 69 stron co stanowi ponad 32% rozprawy. Pomimo tego, rozdział ten zasługuje na uznanie ze względu na to, że analiza jest bardzo wnikliwa i szczegółowa oraz obejmuje bardzo ważne zagadnienia dotyczące: *Czynniki determinujące innowacje i rozwój metod pielęgnacji upraw* (pkt. 2.2), *Podział gleb uprawnych w odniesieniu do oporów skrawania* (pkt. 2.3), *Erozja wodna gleb* (pkt.2.4), *Problematyka tematu w kontekście agrotechnicznym* (pkt. 2.5) i *Metody wyznaczania obciążeń narzędzi* (pkt. 2.6).

Analiza literatury zawarta w rozprawie doktorskiej jest rzetelna i dobrze uzasadnia wybór tematyki badawczej. Praca ukazuje rozwój technologii rolniczych, szczególnie w kontekście pielenia mechanicznego, oraz rosnące zapotrzebowanie na rozwiązania ekologiczne. Wskazuje także na konieczność wprowadzenia innowacyjnych technologii, które umożliwiają zmniejszenie

zużycia energii, a tym samym ograniczenie obciążenia maszyn rolniczych. Doktorant trafnie podkreśla znaczenie dostosowywania narzędzi do lokalnych warunków polowych, co w kontekście rolnictwa precyzyjnego, a zwłaszcza rolnictwa 4.0, jest kluczowym trendem współczesnych technologii rolniczych.

Podstawową zaletą analizy literatury jest precyzyjne ukazanie wpływu geometrii narzędzi na proces pielenia oraz na redukcję generowanych obciążeń. Wskazanie, że zmiana kąta skrawania oraz innych parametrów, takich jak wilgotność gleby, mają wpływ na efektywność pielenia, stanowi solidną podstawę teoretyczną dla realizowanego projektu. Dodatkowo, opracowanie przez autora narzędzia o zmiennej geometrii, które pozwala na dostosowanie parametrów do zmieniających się warunków polowych, jest odpowiedzią na wyzwania współczesnego rolnictwa.

Problematyka naukowa oraz formułowane pytania badawcze są trafnie określone, co stanowi solidną podstawę do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Autor dobrze definiuje główny problem badawczy dotyczący zaprojektowania i testowania mechatronicznej sekcji pielącej z narzędziem o zmiennej geometrii. Wyraźnie wskazuje na różnicę pomiędzy narzędziem konwencjonalnym a zaproponowanym rozwiązaniem, co stanowi podstawowy punkt wyjścia dla badań eksperymentalnych.

Zdefiniowanie problemów badawczych w zakresie projektowania narzędzia, automatyzacji regulacji głębokości pielenia oraz opracowania metodyki badawczej jest spójne z głównym celem pracy. Ponadto, autor wskazuje na potrzebę opracowania układu sterowania i rejestracji danych, co pozwoli na pełne monitorowanie oraz optymalizowanie procesu pielenia. Uwzględnienie elementów sztucznej inteligencji, takich jak możliwość pracy z mapami aplikacyjnymi, zwiększa wartość badania w kontekście rolnictwa precyzyjnego.

Doktorant skutecznie uzasadnia istnienie luki badawczej w analizowanej dziedzinie. Przede wszystkim wskazuje na brak podobnych rozwiązań dotyczących narzędzi adaptujących się do warunków polowych, co stanowi istotny wkład w rozwój technologii rolniczych. Analiza literatury jednoznacznie potwierdza, że zmiana geometrii narzędzi ma duży potencjał w redukcji obciążeń oraz energochłonności procesów pielenia. W tym kontekście zaprojektowane narzędzie zmiennej geometrii staje się rozwiązaniem innowacyjnym, które może stanowić przełom w kontekście autonomicznych pojazdów rolniczych oraz technologii rolnictwa precyzyjnego.

Podkreślenie znaczenia zmniejszania obciążeń w kontekście wydłużania pracy autonomicznych pojazdów rolniczych i zmniejszenia kosztów związanych z magazynowaniem energii stanowi ważny argument dla celowości realizowanych badań. Ograniczenie zużycia energii w tym kontekście może mieć istotne znaczenie zarówno z ekonomicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia.

Wnioski wyciągnięte z analizy literatury oraz przedstawiona problematyka badawcza stanowią solidne fundamenty dla przeprowadzonych badań. Tematyka badawcza jest aktualna, a projekt badawczy innowacyjny, co jest w pełni uzasadnione w kontekście współczesnych wyzwań w technologii rolniczej. Wskazanie luki badawczej w dziedzinie narzędzi adaptujących się do warunków polowych i redukcji energochłonności procesu pielenia wskazuje na wysoką wartość naukową i praktyczną pracy doktorskiej.

Reasumując, analiza literatury oraz problematyka badawcza zostały prawidłowo sformułowane i dobrze uzasadniają podjęcie tematyki badawczej. Praca w pełni odpowiada na

aktualne wyzwania związane z technologią rolniczą, w tym rolnictwem precyzyjnym i automatyzacją, a jej wyniki mogą stanowić istotny wkład w rozwój tej dziedziny.

Temat, cele, zakres i hipotezy rozprawy stanowiący rozdział trzeci został już opisany w pkt. 4 Recenzji.

Rozdział czwarty *Model badawczy czujnika do analizowania obciążeń narzędzi pielących*, który opisuje model badawczy czujnika do analizowania obciążeń narzędzi pielących, zawiera szczegółową prezentację zarówno teoretycznych podstaw, jak i procesu projektowania i budowy czujnika. Wprowadzenie wyjaśnia potrzebę przeprowadzenia badań eksperymentalnych oraz koncentruje się na roli czujników tensometrycznych w analizie obciążeń narzędzi rolniczych. Wybór rozwiązania pomiarowego jest dobrze uzasadniony pokazując zastosowanie czujników w różnych dziedzinach. Celem badania jest dostarczenie informacji na temat obciążeń narzędzi rolniczych podczas procesu pielenia. Wskazuje to na praktyczne podejście do rozwiązania problemu. Zakres obciążeń tensometrycznego czujnika 6 osiowego (np. maksymalna siła oporu narzędzia 500 N, z możliwością pomiaru do 1000 N dla sił) jest dobrze umotywowane. Uwzględnienie zmiennych warunków, takich jak kamienie w glebie, daje realistyczny obraz wymagań projektowych. Użycie SolidWorks 2022 do projektowania czujnika oraz przeprowadzanie analiz metodą elementów skończonych jest solidnym podejściem inżynierskim. W szczególności, analiza wytrzymałościowa oraz dobór materiałów (chromowa, odporna na korozję stal martenzytyczna M303HH) pod kątem odporności na korozję i wytrzymałości mechanicznej jest dobrze uzasadniony. Opis działania czujnika oraz wyjaśnienie zasadności wyboru materiału i konstrukcji są precyzyjne. Szczególne podkreślenie roli procesu kalibracji, a także analiza wytrzymałościowa, są kluczowe dla zapewnienia poprawności pomiarów.

Szczegółowa analiza wytrzymałościowa, w tym rozmieszczenie tensometrów, jakość siatki elementów skończonych oraz analiza naprężeń (np. mapa naprężeń Hubera-Misesa-Hencky'ego) są dobrze zaprezentowane. Użycie tej metody pozwala na skuteczną identyfikację miejsc koncentracji naprężeń, co jest istotne dla prawidłowego działania czujnika. W tabeli zestawiono różne przypadki obciążeń oraz odpowiadające im naprężenia, co stanowi ważny punkt oceny wytrzymałości czujnika w różnych scenariuszach. Zawarty opis kalibracji czujnika jest istotnym elementem, pokazującym, jak zadania te zostały zaplanowane. Ważnym krokiem w tym procesie będzie uzyskanie odpowiednich współczynników kalibracyjnych. Zaproponowany układ pomiarowy z 32 tensometrami pozwala na uzyskanie precyzyjnych wyników pomiarowych w różnych osiach. Wskazanie, że tensometry zakłócają się nawzajem, jest trafnym uwagą dotyczącą analizy i kalibracji układu.

Kalibracja czujnika jest kluczowym etapem w zapewnieniu dokładności pomiarów obciążeń. Celem kalibracji jest ustalenie zależności między sygnałem wyjściowym z mostków tensometrycznych a rzeczywistymi wartościami sił i momentów. W tym celu należy przeprowadzić szereg testów obciążeniowych, które pozwolą określić parametry układu pomiarowego. Wykorzystanie pełnych mostków tensometrycznych umożliwia uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników, ponieważ każdy mostek odpowiada za pomiar innej składowej obciążenia.

Procedura kalibracji została opracowana zgodnie z poniższymi krokami:

- Przygotowanie stanowiska badawczego: Stanowisko zostało zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić precyzyjne wprowadzanie obciążeń do czujnika w trzech osiach (X, Y, Z). Stanowisko jest wyposażone w siłomierze do kontroli sił, które są zadawane w odpowiednich punktach czujnika.

- Kalibracja sił: Do kalibracji sił zastosowano próbne obciążenia, które były sukcesywnie zwiększane w każdym z kierunków, przy czym sygnał z mostków tensometrycznych był rejestrowany podczas każdego obciążenia.
- Kalibracja momentów: Obciążenia momentami skręcającymi były wprowadzane w każdym z kierunków (M_x , M_y , M_z). W tym celu zastosowano specjalistyczne urządzenia do generowania momentów skręcających i kontrolowania ich wielkości. Pomiar sił oraz momentów opierał się na analizie napięć wywołanych przez te obciążenia.
- Obliczenie macierzy kalibracyjnej: Po przeprowadzeniu kalibracji sił i momentów, obliczono macierz kalibracyjną K , która jest niezbędna do przekształcenia sygnałów z mostków tensometrycznych na wartości sił i momentów w odpowiednich osiach. Równanie 4.1 służy do przeprowadzenia tego przekształcenia.
- Współczynniki kalibracyjne. Podczas kalibracji czujnika obliczono współczynniki kalibracyjne, które są niezbędne do dokładnego przetwarzania sygnałów z mostków tensometrycznych na fizyczne wartości obciążeń. Współczynniki te różnią się w zależności od kierunku, w którym mierzone są obciążenia. Dla każdego mostka tensometrycznego wyznaczono wartość współczynnika, który pozwala na precyzyjne dopasowanie pomiaru do rzeczywistych obciążeń. Na podstawie tych współczynników, możliwe było stworzenie pełnej charakterystyki pomiarowej czujnika, zapewniającej jego dokładność w różnych warunkach.

Podsumowując, w niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółowy proces projektowania, kalibracji oraz testowania sześciu osiowego czujnika obciążeń, który jest wykorzystywany w mechatronicznej sekcji pielącej. Dzięki zastosowaniu analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych (MES), możliwe było opracowanie konstrukcji o wysokiej wytrzymałości na dynamiczne obciążenia i przeciążenia, które występują w trakcie pracy urządzenia w terenie. Przeprowadzone testy, zarówno laboratoryjne, jak i polowe, potwierdziły wysoką dokładność i niezawodność zaprojektowanego czujnika, który spełnia wymagania dotyczące precyzji pomiarów w rzeczywistych warunkach operacyjnych.

Rozdział piąty pracy doktorskiej *Model badawczy mechatronicznej sekcji pielącej i narzędzia* skupia się na szczegółowym opisie mechatronicznej sekcji pielącej, która jest kluczowym elementem zaproponowanego rozwiązania. Przeprowadzona analiza literatury, zawarta w poprzednich rozdziałach pracy, pozwoliła na zdefiniowanie kluczowych parametrów pielenia mechanicznego. Skupiono się przede wszystkim na cechach geometrycznych narzędzi skrawających glebę oraz ich wpływie na interakcje między glebą a ostrzami tnącymi. Aby postawione w pracy hipotezy badawcze mogły zostać zweryfikowane i cele badawcze zrealizowane, konieczne było podjęcie założeń konstrukcyjno-projektowych i funkcjonalnych dotyczących przedmiotu doktoratu:

- Automatyczna zmiana geometrii narzędzia i sekcji pielącej – zmiana geometrii narzędzia oraz sekcji musi odbywać się automatycznie w celu łatwej regulacji parametrów i umożliwienia późniejszej adaptacji z systemami rolnictwa precyzyjnego.
- Regulacja kąta skrawania α (kąt wzniosu narzędzia) – przewiduje się konieczność regulowania kąta skrawania, znanego również jako kąt wzniosu narzędzia.
- Regulacja kątów pochylenia ostrzy β – założono możliwość regulowania kątów pochylenia ostrzy pielących w płaszczyźnie prostopadłej do kąta skrawania.

- Wymienne dłuto – narzędzie o zmiennej geometrii powinno mieć możliwość wymiany dłuta z przodu, co pozwala na dostosowanie narzędzia w zależności od zużycia lub specyficznych warunków glebowych.
- Automatyczna regulacja głębokości pielenia – założono automatyczną regulację głębokości pielenia, co ma wpływ zarówno na opory skrawania, jak i jakość pielenia.
- Regulacja pochylenia narzędzi w celu przeciwdziałania erozji wodnej gleb – maszyna powinna umożliwiać regulowanie pochylenia wszystkich narzędzi pielących, zmieniając kąt kontaktu z glebą.
- Kompatybilność z ciągnikami rolniczymi i robotami polowymi – projektowana konstrukcja musi zapewniać możliwość agregowania z ciągnikami rolniczymi oraz autonomicznymi robotami polowymi.
- Układ pomiarowy – projektowane urządzenie musi posiadać kompletny układ pomiarowy, umożliwiający analizowanie sił i momentów skrawających w osiach X, Y i Z.
- Odporność na przeciążenia – urządzenie musi być odporne na przeciążenia wynikające z nieprzewidzianych sił, takich jak uderzenie w kamień.
- Dostosowanie do różnych szerokości upraw – narzędzie musi być konfigurowalne pod względem szerokości upraw rzędowych.
- Zbieranie danych o oporach skrawania – układ pomiarowy urządzenia będzie zapewniał możliwość zapisywania danych dotyczących geometrycznych cech narzędzi oraz oporów skrawania.

Jednym z głównych zadań badawczych było rozwiązanie problemu automatycznej zmiany geometrii narzędzia pielącego. W tym celu przeprowadzono analizy kinematyki urządzenia, odnosząc je do geometrii całej sekcji pielącej. Zakładając szeroką kompatybilność z maszynami rolniczymi, projektowano konstrukcję tak, aby można ją było łatwo zintegrować z szeroką gamą urządzeń. Zdefiniowana specyfikacja wykazała konieczność regulowania dwóch kątów ostrzy skrawających, co miało zapewnić wszechstronność i efektywność narzędzia.

Projekt urządzenia nie jest rozwiązaniem docelowym, lecz stanowi etap badawczy. Wprowadzone konstrukcje umożliwiają łatwą regulację parametrów geometrycznych, takich jak zmiana długości cięgieł, zmiana skoku siłowników czy zastosowanie dodatkowych sensorów do kontroli procesu pielenia. Po przeprowadzeniu testów, te rozwiązania mogą zostać zaprojektowane. Zasada działania narzędzia pozostaje jednak niezmienna.

Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających zostało dostosowane do możliwości łatwego łączenia z wieloosiowym czujnikiem obciążeń. Ostrza skrawające zamontowano obrotowo na wale, który jest utwierdzony w podstawie narzędzia i połączony z prowadnicą liniową oraz wózkiem przenoszącym obciążenia. Dzięki obrotowemu montażowi ostrzy możliwe jest regulowanie kąta α w czasie pracy na polu, co uzyskano przez zastosowanie zakrzywienia ostrzy oraz cięgien regulujących kąt β .

Aby zweryfikować wytrzymałość konstrukcji, przeprowadzono serię analiz MES. W badaniach zastosowano różne siły obciążeniowe, takie jak siła pionowa działająca na ostrza ($F_1 = 150$ N), siła przyłożona prostopadle do ramy głównej ($F_2 = 500$ N) oraz siła przyłożona do czoła ostrza ($F_3 = 250$ N). Na podstawie tych analiz zidentyfikowano wyężenia konstrukcji i wprowadzono niezbędne poprawki.

Równolegle przeprowadzono prace nad kinematyką sekcji pielącej, które umożliwiają agregowanie narzędzia z urządzeniami rolniczymi. Schematy kinematyki mechatronicznego narzędzia o zmiennej geometrii zostały opracowane na podstawie zależności matematycznych. Określono, jak zmienia się położenie poszczególnych elementów w zależności od kątów α i β , co pozwala na precyzyjne ustawienie narzędzia w trakcie pracy. W oparciu o te zależności, wykonano szczegółową analizę kinematyczną, która umożliwiła precyzyjne określenie pozycji suwaka prowadnicy liniowej, zmieniającego kąt skrawania oraz kąt pochylenia ostrza.

Podjęte działania badawcze oraz wprowadzenie szczegółowych analiz kinematycznych pozwoliły na opracowanie narzędzia, które spełnia założenia projektowe i umożliwia efektywne pielenie mechaniczne. Prototyp narzędzia, zaprezentowany w ramach pracy, jest wynikiem iteracyjnych testów i modyfikacji konstrukcyjnych.

Stwierdzam, że rozdział 5 stanowi solidny, techniczny fundament dla dalszych badań i rozwoju w dziedzinie mechatroniki stosowanej w rolnictwie. Przedstawienie innowacyjnego urządzenia, jakim jest mechatroniczna sekcja pieląca, może stanowić istotny wkład w poprawę efektywności upraw, a także przeciwdziałanie erozji wodnej gleby.

Rozdział 6 *Przeciwdziałanie erozji wodnej gleb* stanowi bardzo interesującą część pracy doktorskiej, w której Autor przedstawia koncepcję przeciwdziałania erozji wodnej gleby poprzez zastosowanie mechatronicznej sekcji pielącej. Jest to temat aktualny i ważny w kontekście ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju rolnictwa. Autor trafnie identyfikuje problem erozji gleb, przedstawiając go jako zjawisko degradacji struktury gleby, które wpływa na jej żyzność oraz plony, szczególnie w kontekście upraw rzędowych i intensywnych opadów.

Rozdział wprowadza czytelnika w temat erozji wodnej, wyjaśniając mechanizmy, które do niej prowadzą (wymieranie cząsteczek gleby przez wodę opadową lub powierzchniową). Dzięki temu autor daje solidną podstawę do dalszego opisu proponowanego rozwiązania. Wprowadzenie do zagadnienia erozji wodnej jest kluczowe dla uzasadnienia wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań w zakresie ochrony gleby, co pozwala zrozumieć cel zastosowania narzędzi o zmiennej geometrii w mechatronicznej sekcji pielącej.

Zastosowanie automatyzacji i zmiany geometrii narzędzi pielących to mocny punkt tego rozdziału. Autor wyjaśnia, w jaki sposób mechatroniczna sekcja pieląca, poprzez ustawienia kątów narzędzi (kąt γ) i możliwość korekty głębokości pielenia, może wpływać na powierzchnię gleby i formować wzniesienia w celu zmniejszenia erozji.

Również ważnym elementem jest oscylacyjny ruch narzędzi, który tworzy wzniesienia na powierzchni pola, umożliwiając bardziej równomierne odprowadzanie nadmiaru wody. To innowacyjne podejście łączy technologię mechatroniczną z ochroną środowiska, co stanowi dużą wartość dodaną.

Przedstawienie metod numerycznych i algorytmów jako narzędzi wspomagających analizę przepływów wody opadowej i jej interakcji z glebą jest dużym atutem rozdziału. Dzięki tym narzędziom autor sugeruje możliwość precyzyjnego modelowania zatrzymania wody na powierzchni gleby i wpływu zmian geometrii narzędzi na te procesy.

Symulacje numeryczne mogą prowadzić do lepszego zrozumienia, jak kształtowanie gleby może ograniczać erozję, co stanowi kierunek dla dalszych badań i optymalizacji algorytmów sterowania.

Rozdział koncentruje się na praktycznych rozwiązaniach, takich jak integracja formowania wybrzuszeń na polach z procesem pielenia mechanicznym. Te propozycje mogą w realny sposób przyczynić się do ochrony gleby przed erozją, co jest kluczowe w kontekście zmian klimatycznych i intensyfikacji upraw rolnych.

Rozdział wskazuje na potrzebę rozwoju algorytmów sterowania, które mogą automatycznie dostosowywać geometrię narzędzi do warunków terenowych. Więcej informacji na temat potencjalnych wyzwań związanych z takim sterowaniem oraz proponowanych rozwiązań mogłoby być interesującym uzupełnieniem. Ponadto, warto rozważyć wprowadzenie zaawansowanego modelowania numerycznego, które uwzględniłoby również interakcję narzędzi z różnymi rodzajami gleby w różnych warunkach atmosferycznych, co pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze optymalizowanie procesu przeciwdziałania erozji.

Warto wspomnieć o potencjalnym rozwoju narzędzi w kierunku jeszcze większej precyzji w kształtowaniu gleby, na przykład poprzez dodatkowe mechanizmy, które umożliwiłyby bardziej zróżnicowaną kontrolę głębokości pielenia w zależności od rodzaju gleby lub poziomu jej wilgotności.

Zatem, rozdział 6 to bardzo interesująca część pracy doktorskiej, która skutecznie łączy technologię mechatroniczną z ochroną gleby przed erozją. Zastosowanie innowacyjnych narzędzi, takich jak zmienna geometria narzędzi skrawających oraz algorytmy numeryczne do analizy przepływów wody, stanowi obiecujący kierunek rozwoju w rolnictwie. Chociaż koncepcja jest dobrze uzasadniona teoretycznie, warto byłoby dostarczyć więcej danych z testów eksperymentalnych oraz rozważyć praktyczne aspekty implementacji rozwiązania w rzeczywistych warunkach rolniczych.

Rozdział 7 *Wyniki badań i ich analiza*. Celem badań było opracowanie mechatronicznej sekcji pielącej z narzędziem o zmiennej geometrii, zamontowanej na autonomicznym robocie polowym, co stanowiło część projektu POIR.01.01.01-00-1230/19. Robot wyposażony w system sterowania umożliwił elastyczność w badaniach, pozwalając na weryfikację założeń konstrukcyjnych.

Sekcja pieląca została umieszczona na uchwycie narzędziowym robota w jego środku geometrycznym, co odpowiada typowej konfiguracji dla pielenia upraw szerokokorędowych. Uchwyt umożliwił regulację wysokości narzędzia, a celem badań było określenie zależności między geometrią narzędzi a obciążeniami w czasie normalnej pracy. Automatyczne elementy sterujące pozwalały na korektę głębokości cięcia oraz zmniejszenie oporów narzędzi w zróżnicowanych glebach. Zarejestrowane sygnały pomiarowe odniesiono do prędkości jazdy oraz geometrii narzędzi w dwóch konfiguracjach: z narzędziem środkowym i bez niego.

Stanowisko badawcze składało się z mechatronicznej sekcji pielącej zamontowanej na autonomicznym robocie. Badania miały na celu określenie obciążeń działających na narzędzia przeznaczone do pielenia mechanicznego. Przeprowadzono eksperymenty na polu badawczym, z narzędziami o zmiennej geometrii oraz standardowym narzędziem o tej samej szerokości roboczej (260 mm) i kątach skrawania $\alpha = 13^\circ$ i $\beta = -9^\circ$. W trakcie badań analizowano dwa układy narzędzi: z trzema i dwoma narzędziami (rys. 7.6), co zapewniło lepsze rozłożenie obciążeń.

W ramach układu pomiarowego, zamontowano akcelerometry do rejestracji drgań narzędzi w trzech osiach oraz czujniki obciążeń. Narzędzie o zmiennej geometrii (1) było połączone z

napędami liniowymi (2) oraz sensorami położenia tłoka, a dane były rejestrowane przez system sterowania. Wykorzystano również siłowniki elektryczne i napędy hydrauliczne. Układ pomiarowy rejestrował sygnały z prędkością 50 Hz, a dodatkowo mierzono opór penetracji gleby i wilgotność, co pozwoliło na dokładną charakterystykę warunków pracy.

Badania obejmowały pomiar oporu penetracji gleby oraz wilgotności w różnych punktach pola badawczego. Stwierdzono, że opór gleby wahał się od 2 do 4 MPa na początku, 1,5 do 4 MPa w środku i 1,5 do 2,5 MPa na końcu pola. Zgodnie z wynikami producenta, wartości powyżej 0,6 MPa wskazują na dużą nośność gleby i niską zawartość materii organicznej.

Badania obciążeń narzędzi w czasie pracy wykazały, że prędkość jazdy oraz kąty skrawania miały istotny wpływ na wartości rejestrowanych sił. Zmiana kąta nachylenia ostrza (α) prowadziła do zmniejszenia oporu gleby, natomiast zmiana kąta skrawania (β) miała wpływ na momenty skręcające, szczególnie komponenty M_y i M_z . Wykresy zależności sił od prędkości jazdy wskazały, że wyższe prędkości generowały większe obciążenia, co jest wynikiem intensywniejszych oddziaływań mechanicznych w glebie. Zmiana prędkości wpływała również na czas pracy urządzenia.

Z kolei zmiana kąta skrawania prowadziła do wzrostu momentów skręcających w kierunku osi Y, co było szczególnie widoczne w przypadku większych kątów β . Zebrane dane pozwoliły na lepsze zrozumienie zależności między parametrami pracy narzędzi a ich obciążeniami, co jest kluczowe dla optymalizacji procesów pielęgnacyjnych w uprawach szerokokorędowych.

Przeprowadzone badania miały na celu analizę obciążeń generowanych przez narzędzia pielące w kontekście różnych parametrów roboczych, takich jak geometria narzędzi oraz prędkość jazdy robota polowego. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii, takich jak mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii, możliwe było przeprowadzenie szczegółowej analizy obciążeń narzędzi w różnych warunkach glebowych. Badania te miały kluczowe znaczenie dla optymalizacji procesu pielęgnacji roślin w rolnictwie precyzyjnym, pozwalając na dostosowanie parametrów pracy narzędzi do zmieniających się warunków gleby. Dodatkowo, badania umożliwiły weryfikację założeń konstrukcyjnych projektu doktoratu oraz dostarczenie praktycznych wskazówek dotyczących optymalizacji pracy autonomicznych maszyn rolniczych, co stanowi istotny krok w rozwoju technologii automatyzacji w rolnictwie.

Rozdział ósmy *Modelowanie procesu zmniejszania obciążeń w czasie pielienia* skupia się na dwóch podejściach, które mają na celu optymalizację procesu pielienia poprzez zmniejszenie obciążeń generowanych na narzędziach pielących. Opisuje badania nad mechatroniczną sekcją pielącą, której celem jest automatyczne dostosowywanie geometrii narzędzi do zmieniających się warunków glebowych i terenowych.

W pierwszym podejściu, wprowadzona funkcjonalność lokalnego generowania nastaw kątów narzędzi, bazująca na danych z czujników, pozwala na dynamiczną zmianę geometrii w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne dopasowanie kątów elementów skrawających do specyfiki gleby i kompensacja wpływu pochyleń terenu, co z kolei wpływa na zmniejszenie obciążeń i poprawę efektywności procesu pielienia. Podkreślono także możliwość wprowadzenia czujników wilgotności gleby, które mogą dodatkowo wpłynąć na dostosowanie ustawień narzędzi, biorąc pod uwagę strukturę gleby.

Drugie podejście opiera się na integracji z systemami rolnictwa precyzyjnego, które wykorzystują dane map aplikacyjnych oraz szczegółowe informacje o polu, takie jak typ gleby, wilgotność czy struktura terenu. Na podstawie tych danych tworzone są mapy zasobności, które pozwalają na dynamiczne dostosowanie kątów narzędzi w różnych częściach pola. Integracja z systemami GPS umożliwia precyzyjne ustawienie parametrów pracy maszyn rolniczych, co pozwala na optymalizację procesu pielienia i minimalizację zużycia energii. W kontekście autonomicznych pojazdów rolniczych, wprowadzenie takich rozwiązań ma także istotne znaczenie dla zarządzania energią i unikania rozładowania maszyn podczas pracy.

Rozdział dziewiąty pracy doktorskiej dotyczy prac wdrożeniowych związanych z rynkiem rolniczych maszyn uprawowych oraz rozwojem innowacyjnych technologii mechatronicznych. Wnioski i wnioski wynikające z tego rozdziału obejmują kilka ważnych aspektów związanych z rynkiem, konkurencyjnością, rozwojem technologii, a także zgodnością z polityką zrównoważonego rozwoju.

Wartość rynku maszyn uprawowych w Europie jest analizowana na podstawie danych CEMA, a także uwzględnia zmiany na rynku, takie jak spadki sprzedaży w niektórych krajach i wzrosty w innych. Podkreśla się także rosnącą tendencję do używania większych maszyn oraz włączania technologii cyfrowych, takich jak elektronika i automatyka, do wyposażenia maszyn rolniczych. Zauważono także rosnące zainteresowanie rolnictwem ekologicznym i zrównoważonym, co wskazuje na przyszłościowy rozwój tego sektora.

Analiza konkurencyjności dotyczy instytutu badawczego i jego zasobów materialnych i niematerialnych. Instytut Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny posiada odpowiednie zasoby, takie jak wykwalifikowani pracownicy, zaplecze techniczne, systemy informatyczne i sprzęt do realizacji projektów badawczo-rozwojowych. Ważnym elementem jest również przeprowadzenie testów prototypów w rzeczywistych warunkach.

Urządzenie zaprojektowane w ramach pracy doktorskiej może być integrowane z nowoczesnymi systemami agrotechnicznymi, w tym rolnictwem precyzyjnym. Możliwość łączenia maszyn do pielienia z sygnałami pozycjonowania i mapami gleby umożliwia optymalizację parametrów pracy narzędzi, co może przyczynić się do lepszej efektywności i mniejszego zużycia energii. W przyszłości planowana jest także adaptacja urządzenia do autonomicznych pojazdów rolniczych, co mogłoby zwiększyć precyzyjność i oszczędność energii.

Prace nad urządzeniem zakładają dużą elastyczność, ponieważ może być ono wykorzystywane do różnych zastosowań w rolnictwie, takich jak testowanie obciążeń narzędzi rolniczych czy mechaniczne pielienie. Modułowa konstrukcja pozwala na dostosowanie narzędzi do różnych szerokości międzyrzędzi oraz zmianę kątów skrawania w zależności od warunków glebowych. Urządzenie jest także przygotowane do dalszego rozwoju i testowania nowych funkcji.

Rozwój technologii pielniczej przedstawiony w pracy doktorskiej odpowiada na wyzwania zrównoważonego rozwoju, eliminując potrzebę stosowania chemicznych pestycydów i redukując zużycie wody. Ponadto, dzięki optymalizacji zużycia energii i trwałości urządzenia, przyczynia się do zmniejszenia wpływu na środowisko. Dodatkowo, mechaniczne pielienie korzystnie wpływa na strukturę gleby, zapobiegając jej erozji i poprawiając bilans wodny.

Rozdział kończy się podsumowaniem wyników prac wdrożeniowych. Kluczowym elementem było zabezpieczenie patentowe innowacyjnych rozwiązań, co otwiera możliwość dalszej komercjalizacji technologii. Przewidywana strategia zakłada udzielanie licencji na opracowane rozwiązania, co może przyczynić się do szerszego wprowadzenia tej technologii na rynek maszyn rolniczych. Rozwiązania mechatroniczne, takie jak sekcja pieląca i narzędzia o zmiennej geometrii, oferują potencjał do dalszego rozwoju, w tym autonomizacji rozwiązań i opracowywania algorytmów kształtowania powierzchni gleby w celu ograniczenia erozji wodnej.

Rozdział 9 dobrze podsumowuje prace wdrożeniowe, prezentując pełen obraz potencjału technologii oraz jej zgodności z aktualnymi trendami w rolnictwie, jak cyfryzacja i zrównoważony rozwój. Zawiera szczegółowe analizy dotyczące zarówno rynku maszyn rolniczych, jak i konkurencyjności instytutu badawczego, co daje pełniejszy obraz wdrażania i rozwoju technologii. Dodatkowo, integracja z systemami precyzyjnego rolnictwa oraz zróżnicowane możliwości zastosowania urządzenia stanowią ważne aspekty komercjalizacyjne i technologiczne. Kluczowym atutem jest także podkreślenie znaczenia zgodności z politykami ochrony środowiska i efektywności energetycznej, co może pomóc w dalszym rozwoju tego projektu na rynku rolniczym.

Rozdział 10 zatytułowany *Wnioski końcowe*, został opracowany prawidłowo. Wnioski końcowe podzielone na: Wnioski dotyczące hipotez pracy, Wnioski poznawcze, Wnioski utylitarne i Wnioski dotyczące dalszych badań zostały przez Autora przedstawione w sposób metodyczny i wskazują, że cele pracy zostały osiągnięte, hipotezy zostały sprawdzone, zaś zakres pracy w pełni zrealizowany. Należy podkreślić, że w rozprawach doktorskich rzadko spotyka się informacje dotyczące wskazania kierunków dalszych badań.

Rozprawa doktorska pt. „*Badanie cech geometrycznych elementów skrawających glebę z zastosowaniem automatycznych systemów sterowania maszynami rolniczymi*” stanowi istotny wkład w rozwój technologii stosowanych w rolnictwie, zwłaszcza w obszarze mechanizacji procesów pielęgnacji gleby. Badania przeprowadzone przez autora pozwoliły na opracowanie innowacyjnego rozwiązania, które w połączeniu z elementami automatyki, umożliwia zmianę geometrii narzędzia skrawającego glebę, co znacząco poprawia efektywność procesu pielenia. Autor wykazał, że zastosowanie mechatronicznego narzędzia umożliwia zmniejszenie oporów skrawania gleby, poprawę stabilności pracy narzędzia oraz zmniejszenie energochłonności procesu. Badania prowadzone w różnych warunkach glebowych oraz przy różnych prędkościach pracy pozwoliły na uzyskanie wartościowych wniosków, które mogą przyczynić się do dalszego rozwoju technologii rolniczych.

Wyniki uzyskane w pracy potwierdzają hipotezę, że zmiana geometrii narzędzia w połączeniu z automatycznymi systemami sterowania może wpłynąć na zmniejszenie obciążeń generowanych przez narzędzie oraz zwiększenie efektywności procesu pielenia, co ma istotne znaczenie w kontekście rolnictwa precyzyjnego. Dokonane przez autora analizy, szczegółowe badania eksperymentalne i wyciągnięte wnioski są podstawą do dalszych prac badawczo-rozwojowych w tej dziedzinie.

Dokonując merytorycznej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała ZAWADY stwierdzam, że w rozprawie tej podjęto próbę rozwiązania ważnego i trudnego problemu naukowego mającego duże znaczenie praktyczne. **Zasluguje ono na wysoką ocenę i powinno być wyróżnione.** Jestem pełen uznania dla podejścia Autora do analizowanych w rozprawie zagadnień. Jest to podejście systematyczne, kompetentne i wnikliwe. Uważam, że Autor jest dobrze przygotowany do podjęcia dalszej samodzielnej pracy naukowej i badawczej. Wyrażam

przekonanie, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała ZAWADY wnosi istotny wkład naukowy w **dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna**.

6. Uwagi szczegółowe do pracy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Michała ZAWADY jest napisana w sposób jasny, zwarty i uporządkowany. Struktura i układ pracy, a także jej strona edytorska są właściwe i sprzyjają zrozumieniu przez czytelnika treści poszczególnych rozdziałów. Oceniam, że rozprawa jest napisana bardzo dobrze zarówno pod względem merytorycznym, jak i językowym. Na szczególne podkreślenie zasługuje logika wyводу oraz oszczędny, a jednocześnie bardzo precyzyjny język stosowany w rozprawie. Wszystkie wykonane badania eksperymentalne są bardzo dobrze opisane a otrzymane wyniki wyczerpująco udokumentowane. Mimo to w tekście rozprawy zdarzają się – na szczęście bardzo nieliczne – drobne pomyłki edytorskie tzw. literówki oraz sformułowania wywołujące wątpliwości. Dla przykładu:

- 1) W pracy występuje szereg drobnych błędów edytorskich tzw. literówek, np. str. 112, 3 i 4 w.d. w sformułowaniu „Jest to możliwe np. poprzez zastosowanie wzorcowanych obciążników wyżej klasy”. Powinno być wyższej klasy. Na str. 134 3-5 w.d. „Badania prowadzono w dwóch konfiguracjach stanowiska badawczego z trzeba narzędziami”. Powinno być trzema narzędziami. W wielu miejscach jest brak kropek na końcu zdania Brak znaków interpunkcji np. kropek na końcu zdania – przykładowo we wzorach na stronach 72, 73, 75,76.
- 2) Czasami wprowadzono nieściśle określenia, np. w tabeli 12 str. 98 użyto symbolu $\sigma_{vonMises}[MPa]$. Poprawnie powinno być naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego σ^{HMH} [MPa].
- 3) Podpisy niektórych rysunków są niekompletne, gdyż brakuje opisu części składowych np. Rys. 2.22. Ząb sprężynowy kultywatora, Rys. 2.36. Przykładowy kanał glebowy do badań interakcji między urządzeniami rolniczymi a glebą i Rys. 2.37. Przyrząd pomiarowy do eksperymentalnego badania obciążeń narzędzi w glebie.
- 4) Numeracja wzorów powinna być umieszczona w nawiasach okrągłych.

Warto zaznaczyć, że powyższe wątpliwości mają charakter dyskusyjny i porządkowy natomiast w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy. Mogą być wykorzystane przez Autora w dalszych badaniach.

7. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała ZAWADY, ma konstrukcyjno-eksperymentalny charakter i dotyczy opracowania innowacyjnej konstrukcji sekcji pielącej, która pozwala na zmniejszenie energochłonności pielienia mechanicznego.

Autor rozprawy podjął się rozwiązania skomplikowanego problemu o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Sposób rozwiązania tego problemu zaproponowany w rozprawie świadczy o szerokiej interdyscyplinarnej wiedzy Autora rozprawy i umiejętności samodzielnego podejmowania złożonych zadań naukowych i badawczych.

Po analizie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała ZAWADY nt. *Badanie cech geometrycznych elementów skrawających glebę z zastosowaniem automatycznych systemów sterowania maszynami rolniczymi z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie złożonego problemu naukowego, stanowiący istotny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria mechaniczna. Rozprawa ta spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr*

65, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami). Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała ZAWADY do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę szeroki zakres rozprawy i wysoki poziom rozwiązania analizowanych zagadnień oraz wyciągnięcie wartościowych wniosków a także opublikowanie wyników badań w czasopiśmie indeksowanym wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Uzasadniając propozycję wyróżnienia pracy doktorskiej podkreślam, że praca doktorska przedstawia innowacyjne rozwiązanie w dziedzinie inżynierii rolniczej, które łączy mechatronikę, automatykę i zrównoważony rozwój w kontekście pielienia mechanicznego. Opracowanie narzędzia pielącego o zmiennej geometrii, które zmniejsza energochłonność procesu pielienia, stanowi istotny wkład w rozwój rolnictwa precyzyjnego oraz w zwiększenie efektywności energetycznej w rolnictwie. Natomiast wyróżnienie tej pracy jest w pełni uzasadnione z kilku powodów:

1. **Innowacyjność.** Zaprojektowanie narzędzia o zmiennej geometrii elementów skrawających w kontekście pielienia mechanicznego to rozwiązanie nowatorskie, które pozwala na lepsze dopasowanie do specyficznych warunków gleby i upraw. Praca wnosi nową jakość w projektowaniu maszyn rolniczych, co ma istotne znaczenie w kontekście rolnictwa 4.0.
2. **Praktyczne zastosowanie.** Praca odpowiada na aktualne potrzeby rolnictwa, w tym dążenie do zrównoważonego rozwoju i zwiększenia efektywności energetycznej w rolnictwie. Badania wykazują znaczną redukcję energochłonności procesu pielienia, co ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie kosztów operacyjnych oraz zwiększenie opłacalności stosowania robotów polowych.
3. **Kompleksowość badań.** Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, obejmując zarówno aspekty inżynierskie (projektowanie narzędzi, automatyzacja), jak i agrotechniczne (dostosowanie parametrów do lokalnych warunków glebowych). Tak szerokie podejście zapewnia wszechstronną analizę zagadnienia i pokazuje pełne zrozumienie problemu.
4. **Przesunięcie granic technologii rolniczej.** Zastosowanie zmiennej geometrii narzędzi w połączeniu z automatycznym sterowaniem pozwala na optymalizację procesów w warunkach zmienności glebowej. Takie rozwiązanie przyczynia się do bardziej efektywnego i ekologicznego użytkowania zasobów, co jest kluczowe w kontekście wyzwań współczesnego rolnictwa.

W pracy uwzględniono również analizę ekonomiczną oraz wymagania rynku, co sprawia, że jej wyniki mogą znaleźć praktyczne zastosowanie i być wdrażane w realnych warunkach przemysłowych. Wnioski końcowe pokazują znaczące korzyści płynące z wprowadzenia zaproponowanej technologii, a także wskazują na dalsze kierunki badań w tej dziedzinie.

Dlatego też, biorąc pod uwagę innowacyjność, znaczenie praktyczne oraz kompleksowość badań, praca doktorska według mnie zasługuje na wyróżnienie.

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka