

Załącznik 2A

AUTOREFERAT

Opis osiągnięcia i dorobku naukowego

Dr inż. Grzegorz Doruchowski
Instytut Ogrodnictwa
Zakład Agrotechnologii
Pracownia Techniki Ochrony i Nawożenia
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
grzegorz.doruchowski@inhort.pl



Skierniewice 2019

Spis treści

1. Charakterystyka habilitanta	3
1.1. Dane personalne	3
1.2. Uzyskane dyplomy i stopnie naukowe	3
1.3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
2. Wskazanie osiągnięcia naukowego na rzecz postępowania habilitacyjnego	4
2.1. Tytuł i określenie osiągnięcia	4
2.2. Streszczenie	7
2.3. Wprowadzenie	8
2.4. Cel prac	12
2.5. Przebieg prac: geneza, materiały i metody oraz uzyskane wyniki	12
2.5.1. EDAS - automatyczna regulacja wydatku powietrza i wielkości kropeł	14
2.5.1.1. Moduł sensorów	14
2.5.1.2. Moduł sterowania	15
2.5.1.3. Moduł wykonawczy	16
2.5.1.4. Funkcjonowanie systemu	18
2.5.2. CASA - inteligentny opryskiwacz sadowniczy	21
2.5.2.1. CHS - rozpoznawania zdrowotnego statusu roślin	21
2.5.2.2. CIS - zmienne dawkowanie środków ochrony roślin	22
2.5.2.3. Integracja systemów	23
2.5.3. Biologiczna skuteczność niskoznoszeniowych zabiegów grubokroplistych	24
2.6. Miejsce i innowacyjność osiągnięcia na tle współczesnych rozwiązań	25
2.7. Podsumowanie wyników w odniesieniu do celów naukowych	28
2.8. Bibliografia	30
3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	33
3.1. Działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora nauk rolniczych	33
3.2. Działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych	34
3.3. Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego	41
4. Sumaryczny Impact Factor, liczba cytowani publikacji oraz Indeks Hirscha	43
5. Nagrody za działalność naukową, upowszechnieniową, dydaktyczną i organizacyjną	43
6. Wygłoszone referaty w na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych	43
7. Dorobek w zakresie upowszechniania wyników działalności naukowej	43
8. Dorobek w zakresie dydaktycznym i organizacyjnym	44
8.1. Współpraca międzynarodowa	44
8.2. Funkcje o charakterze organizacyjnym pełnione w Instytucie Ogrodnictwa	45
8.3. Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	45
8.4. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	45

1. Charakterystyka habilitanta

1.1. Dane personalne

Imię i nazwisko: **Grzegorz Doruchowski**
Miejsce pracy: Instytut Ogrodnictwa
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
– Zakład Agrotechnologii
– Pracownia Techniki Ochrony i Nawożenia

1.2. Uzyskane dyplomy i stopnie naukowe

8 marca 1983 r.

Stopień **magistra inżyniera rolnictwa** z wynikiem bardzo dobrym
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego – Akademia Rolnicza w Warszawie
Wydział Techniki Rolniczej i Leśnej
Praca magisterska: „Badania porównawcze opryskiwaczy sadowniczych tunelowego i wentylatorowego w aspekcie skuteczności i kosztów zwalczania parcha jabłoni”
Promotor: dr inż. Adolf Sosnowski.

10 grudnia 2001 r.

Stopień **doktora nauk rolniczych w zakresie ogrodnictwa**
Instytut Sadownictwa i Kwiaciarnictwa (ob. Instytut Ogrodnictwa) w Skierniewicach
Rozprawa doktorska: „Wpływ techniki opryskiwania na jakość zabiegów ochronnych w łanowej uprawie porzeczki czarnej”
Praca nagrodzona przez Radę Naukową Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarnictwa
Promotor: prof. dr hab. Andrzej Gajtkowski
Recenzenci: prof. dr hab. Jan Pabis, prof. dr hab. Zdzisław Cianciara

1.3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2 maja 1983 – 31 grudnia 2001

Asystent w Zakładzie Mechanizacji w Instytucie Sadownictwa i Kwiaciarnictwa w Skierniewicach

1 stycznia 2002 – do chwili obecnej

Adiunkt w Zakładzie Mechanizacji w Instytucie Sadownictwa i Kwiaciarnictwa w Skierniewicach
Kierownik Pracowni Techniki Ochrony i Nawożenia

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego na rzecz postępowania habilitacyjnego

2.1. Tytuł i określenie osiągnięcia

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) jest powiązany tematycznie cykl publikacji naukowych i patentów, będących wynikiem prac badawczo-rozwojowych pt.:

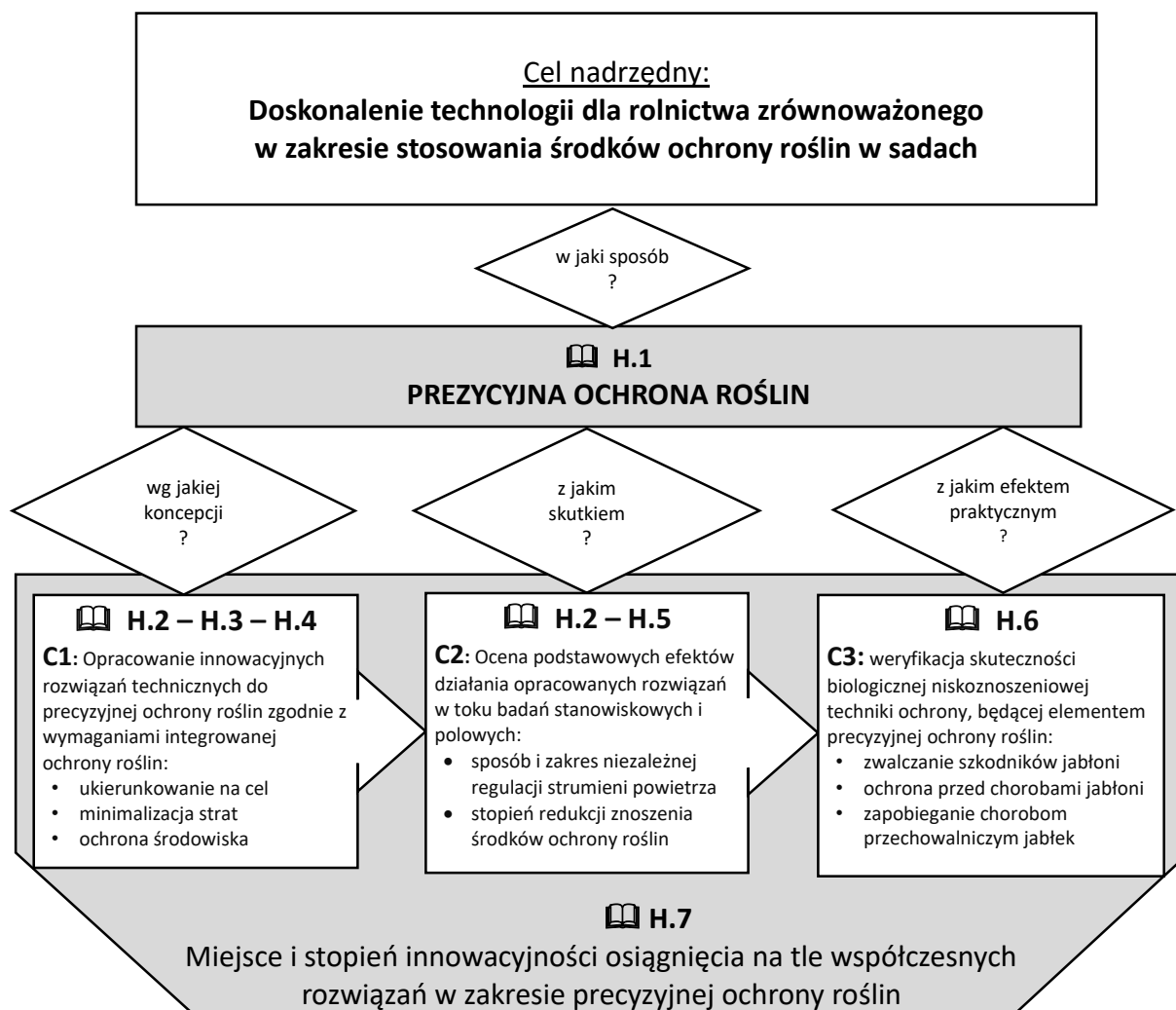
„Uwarunkowania precyzyjnego i zrównoważonego stosowania środków ochrony roślin w sadach”

Prace wchodzące w skład cyklu (Tabela 1) zostały opublikowane w latach 2008-2017, po uzyskaniu stopnia naukowego doktora i powstały w wyniku realizacji dwóch koordynowanych przeze mnie projektów badawczych:

- samodzielnego pakietu roboczego **WP5.1 ECOFRUIT** w ramach europejskiego projektu „**ISAFRUIT** - Increasing fruit consumption through a trans-disciplinary approach delivering high quality produce from environmentally friendly, sustainable production methods” („Zwiększanie spożycia owoców poprzez interdyscyplinarne podejście prowadzące do uzyskania wysokiej jakości produktu za pomocą zrównoważonych i bezpiecznych dla środowiska metod”); 6. Program Ramowy, Priorytet 5: Food Quality and Safety (Jakość i Bezpieczeństwo Żywności); nr. umowy: 016279; okres realizacji: 2006-2010; liczba partnerów: 67
- tematu statutowego Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach: „Wpływ wielkości kropeł i dawek cieczy na skuteczność zwalczania chorób i szkodników jabłoni, chorób przechowalniczych i pozostałości środków ochrony roślin w owocach prozdrowotnych”. Nr tematu: 8.2.2; okres realizacji: 2010-2014.

Publikacje i patenty będące wynikiem obu projektów uważam za moje największe osiągnięcie w dotychczasowej działalności naukowej i przedkładam jako podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Tematyczne powiązanie prac przedstawiono na diagramie (Rys. 1). Obrazuje on logiczny ciąg działań zmierzających do osiągnięcia nadrzędnego celu oraz celów cząstkowych, wynikających z realizacji poszczególnych etapów mojej pracy naukowej.



Rys. 1 Osiągnięcie celu nadrzędnego poprzez realizację prac badawczo rozwojowych spełniających cele cząstkowe **C1**, **C2** i **C3** i opisanych w publikacjach **H.1 – H.7**.

Tabela 1. Prace wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej

Lp.	Autorzy, rok wydania, tytuł, czasopismo, numer, strony	Impact Factor	Cytowania wg WoS	Punkty wg MNiSW
H.1	Doruchowski G. 2008. Postęp i nowe koncepcje w rolnictwie precyzyjnym. <i>Inżynieria Rolnicza</i> 9(107): 19-31.	-	-	5
H.2	Doruchowski G. , Swiechowski W., Hołownicki R., Godyń A. 2009: Environmentally- Dependent Application System (EDAS) for safer spray application in fruit growing. <i>Journal of Horticultural Sciences and Biotechnology</i> , ISAFRUIT Special Issue: 107-112.	0,839	3	25
H.3	Doruchowski G. Jędrachowicz T. Sujka A. Poszwiński K. Hołownicki R. 2013. Przystawka wentylatorowa do opryskiwacza. <i>Patent</i> PL 213819-B1	-	-	30*
H.4	Doruchowski G. , Koronczok J., Bernyś M., Kubica G., Hołownicki R. 2015. Układ sterowania pracą opryskiwacza. <i>Patent</i> PL 219330-B1	-	-	30*
H.5	Doruchowski, G. , Balsari, P., Marucco, P., Zande, J van de, Wenneker, M. 2012. Crop Adapted Spray Application (CASA) - Precise and safe plant protection in fruit growing. <i>Aspects of Applied Biology</i> , 114, Ed. P.G. Anderson i in., ISSN 0265-1491, AAB, Warwick, UK, 2012: 129-136.	-	-	-
H.6	Doruchowski G. , Świechowski W., Masny S., Maciesiak A., Tartanus M., Bryk H., Hołownicki R. 2017. Low-drift nozzles vs. standard nozzles for pesticide application in the biological efficacy trials of pesticides in apple pest and disease control. <i>Science of the Total Environment</i> 575: 1239–1246.	4,610	8	40
H.7	Doruchowski, G. 2013. Faktyczne i potencjalne innowacje w technice ochrony upraw sadowniczych. <i>Monografia pod redakcją R. Hołownickiego i M. Kubonia, Współczesna inżynieria rolnicza – osiągnięcia i nowe wyzwania</i> , Kraków 2013, ISBN 978-83-935020-4-2, Tom III: 97-126.	-	-	5
ŁĄCZNIE: - Publikacje		5,449	11	75
- Publikacje i patenty*				135
* Wg kryteriów oceny jakości działalności naukowej lub badawczo-rozwojowej jednostek naukowych (<i>Rozporządzenie MNiSW z dnia 12 grudnia 2016 r. w sprawie przyznawania kategorii naukowej jednostkom naukowym i uczelniom, w których zgodnie z ich statutami nie wyodrębniono podstawowych jednostek organizacyjnych – DzU. 2016, poz. 2154</i>)				

Kopie prac wykazanych jako osiągnięcia naukowe oraz oświadczenia ich współautorów, określające ich indywidualny wkład w powstanie publikacji i patentów znajdują się w **Załączniku 4.**

2.2. Streszczenie

Osiągnięciem naukowym na rzecz postępowania habilitacyjnego jest cykl pięciu powiązanych tematycznie publikacji, w tym jednej stanowiącej rozdział w monografii, oraz dwóch patentów. Wszystkie pozycje są wynikiem realizacji dwóch koordynowanych przeze mnie projektów: ISAFRUIT w ramach 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej i tematu 8.2.2 w ramach działalności statutowej Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach. Nadrzędnym celem opisanych prac było udoskonalenie technologii dla rolnictwa zrównoważonego w zakresie stosowania środków ochrony roślin poprzez opracowanie innowacyjnego, precyzyjnego opryskiwacza sadowniczego i wykazanie korzyści wynikających z jego stosowania.

W toku projektu ISAFRUIT przy współudziale partnerów zagranicznych i krajowych prowadzono prace badawczo-rozwojowe nad stworzeniem nawigowanego satelitarne opryskiwacza CASA (*Crop Adapted Spray Application*), który integruje trzy współpracujące ze sobą systemy: CHS (*Crop Health Sensor*) – do identyfikacji drzew jabłoni zakażonych patogenami chorobotwórczymi w bardzo wczesnej fazie infekcji; CIS (*Crop Identification System*) – do identyfikacji charakterystyki drzew w celu zróżnicowanego dawkowania środków ochrony roślin w czasie rzeczywistym wg koncepcji VRA (*Variable Rate Application*); EDAS (*Environmentally Dependent Application System*) – do automatycznej regulacji wielkości kropli i strumienia powietrza w zależności od lokalnych i chwilowych okoliczności zabiegu. Mój udział w realizacji projektu polegał na opracowaniu i przetestowaniu w warunkach laboratoryjnych i polowych systemu EDAS, współtworzeniu systemów CHS i CIS we współpracy z ośrodkami badawczymi w Holandii i we Włoszech, a następnie koordynacji prac nad integracją wszystkich trzech komponentów na opryskiwaczu CASA oraz demonstracji efektów jego pracy i możliwości praktycznego zastosowania w towarowej produkcji sadowniczej.

Chroniony dwoma patentami system EDAS ma strukturę modułową. Moduł sensorów, w którego skład wchodzi anemometr ultradźwiękowy i odbiornik różnicowego systemu nawigacji satelitarnej DGPS monitoruje chwilowe okoliczności zabiegu, określające prędkość i kierunek wiatru oraz położenie opryskiwacza względem obszarów wrażliwych. Pozyskiwane dane przekazuje na bieżąco do modułu sterowania. Moduł ten składa się z opracowanej w ramach projektu centralnej jednostki przetwarzania danych CPU oraz komputera przemysłowego typu HMI, który stanowi terminal sterujący pracą opryskiwacza poprzez graficzny interfejs użytkownika. Oprogramowania dla obu urządzeń opracowano w toku projektu. Moduł sterowania przetwarza dane wejściowe i przekazuje polecenia do modułu wykonawczego, który w sytuacji podwyższonego ryzyka zanieczyszczenia obszarów wrażliwych automatycznie przełącza opryskiwacz na niskoznoszeniowy tryb pracy zgodnie z zadaniem przez operatora scenariuszem. Polega to na zmianie rozpylaczy drobnokroplistych na grubokropliste oraz niezależnej regulacji prędkości strumienia powietrza na prawej i lewej sekcji opryskiwacza w czasie rzeczywistym.

Efekty działania opracowanych systemów i zintegrowanego opryskiwacza CASA oceniane były w toku badań stanowiskowych i polowych. Wyniki tych prac wskazały, że automatyczna regulacja wielkości kropli i strumienia powietrza (system EDAS) umożliwia przeprowadzanie zabiegów według niskoznoszeniowych scenariuszy ograniczających znoszenie środków ochrony roślin w sadach o ponad 80% w porównaniu z opryskiwaniem konwencjonalnym, lub o 95% w porównaniu ze standardowym, deflektorowym opryskiwaczem sadowniczym. Zróżnicowane dawkowanie środków ochrony roślin (system CIS) pozwalał na ograniczenie zużycia tych środków w sadach jabłoniowych w zakresie od 31 do 82% w zależności od wielkości drzew i fazy fenologicznej roślin. Możliwości funkcjonalne

opryskiwacza w warunkach operacyjnych zademonstrowano w najważniejszych regionach sadowniczych siedmiu krajów UE.

Badania prowadzone w ramach działalności statutowej Instytutu Ogrodnictwa miały na celu weryfikację skuteczności biologicznej niskoznoszeniowej techniki ochrony z wykorzystaniem rozpylaczy grubokroplistych. W trakcie czteroletnich badań polowych porównano skuteczność drobnych i grubych kropel w ochronie jabłoni przed najważniejszymi chorobami i szkodnikami. Uzyskane wyniki nie wykazały istotnych różnic w skuteczności ochrony sadów jabłoniowych między drobnymi i grubymi kroplami dowodząc tym samym, że korzystne dla środowiska niskoznoszeniowe scenariusze realizowane przy użyciu rozpylaczy grubokroplistych mogą być z pełnym przekonaniem stosowane w praktyce sadowniczej.

2.3. Wprowadzenie

Dynamicznie rosnąca populacja mieszkańców Ziemi i konieczność zaspokojenia rosnących potrzeb niemal każdej sfery ludzkiego życia, wymaga ciągłego rozwoju produkcji rolniczej. W procesie tym wykorzystywane są przede wszystkim osiągnięcia nauk biologicznych i technicznych, a także społecznych. Nauki biologiczne miały swój dominujący wkład i zainicjowały dynamiczny rozwój rolnictwa w dobie „zielonej rewolucji”, której zadaniem była eliminacja niedostatku żywności poprzez radykalne zwiększenie produktywności upraw. Cel ten osiągnięto niestety ze szkodą dla środowiska naturalnego i kosztem nadmiernej, niezrównoważonej eksploatacji zasobów. Aby uniknąć długofalowo negatywnych skutków konieczne stało się zrównoważenie rozwoju polegające na znalezieniu kompromisu między dwoma podstawowymi wyznacznikami jakości życia, chęcią posiadania (postawą „mieć”), a potrzebą godnej egzystencji (postawą „być”) (Zadrozniak, 2015) przy jednoczesnym zapewnieniu zaspokojenia potrzeb i utrzymania jakości życia przyszłych pokoleń (Tyburski red., 2011).

Potrzeba zrównoważonego rozwoju dotyczy wszystkich tych obszarów działalności człowieka, które mają wpływ na środowisko naturalne, z rolnictwem na czele (Kukuła i Krasowicz, 2001). Idea zrównoważonego rozwoju rolnictwa zrodziła się już na początku lat osiemdziesiątych i najogólniej polega na: (i) stosowaniu technologii i środków produkcji, które nie degradują środowiska i sprzyjają zwiększeniu lub utrzymaniu naturalnej żyzności gleby; (ii) pozyskiwaniu plonów o wysokiej jakościowych, bezpiecznych w wykorzystywaniu do celów żywnościowych i paszowych oraz akceptowanych przez konsumentów; (iii) zapewnieniu ekonomicznej opłacalności produkcji. Na uwagę zasługuje ekosystemowe podejście do produkcji rolniczej, akcentujące ochronę środowiska i racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych.

Rolnictwo zrównoważone jest obecnie wyznacznikiem kierunku badań we wszystkich dyscyplinach nauk rolniczych, wśród których inżynieria rolnicza zajmuje miejsce szczególne. W głównej mierze naukom technicznym zawdzięczamy pozytywny zwrot w przebiegu zmian będących efektem zrównoważonego rozwoju i doprowadzenie do sytuacji, w której mimo wzrostu konsumpcji uzyskujemy nadwyżki produktów rolniczych, w tym żywności, z szansą na osiągnięcie odtwarzalności zasobów. Hiperboliczny przebieg tych zmian w kartezyjańskim układzie: *PRODUKCJA ROLNICZA* x *ZUŻYCIE ZASOBÓW* został przedstawiony, za Bertschingerem i in. (2009), w publikacji **H.1** (H.1 - rys. 1), stanowiącej wprowadzenie do prezentowanego osiągnięcia naukowego. Wskazuje on, że po okresie dominacji nauk technicznych w rozwoju rolnictwa nastąpił etap wyraźnego prymatu nauk społecznych z ekonomiką i organizacją produkcji w roli głównej. Ich efektem jest obecnie kurs na zrównoważenie zużycia zasobów przy powolnym lecz sukcesywnym wzroście produkcji. Po

osiągnięciu równowagi w wykorzystaniu zasobów przewidywana jest ponowna orientacja rolnictwa na postęp techniczny, który powinien sprzyjać dalszemu odtwarzaniu zasobów.

W zakresie ochrony upraw przed negatywnym działaniem chorób, szkodników i chwastów idea zrównoważonego rolnictwa realizowana jest poprzez integrowaną ochronę roślin. Jej celem jest opłacalna produkcja i wysokie plony o najwyższych standardach jakościowych z jednoczesnym poszanowaniem środowiska i zasobów naturalnych. Osiągnięcie tego celu narzuca wysoki stopień zależności od technologii i środków ochrony roślin (Nemecek, i in., 2011). Środki te muszą być stosowane w sposób zrównoważony i tylko w sytuacji gdy niechemiczne metody ochrony okazują się niewystarczająco skuteczne. Kraje Unii Europejskiej podjęły inicjatywę działań zmierzających do prawnego uregulowania najistotniejszych aspektów stosowania środków ochrony roślin, co w roku 2009 zaowocowało przyjęciem dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE o zrównoważonym stosowaniu pestycydów (Dz.Urz.UE, L 309/71, 2009). Dyrektywa ta, zobowiązuje kraje UE nie tylko do uchwalenia aktów prawnych lecz także opracowania krajowych planów działania, w tym przede wszystkim promowania i wdrożenia dobrych praktyk mających na celu korzystanie ze środków ochrony roślin w sposób racjonalny i bezpieczny dla ludzi, zwierząt i środowiska. Jednym z głównych postanowień dyrektywy jest wprowadzenie integrowanej ochrony roślin jako obowiązującego standardu stosowania pestycydów. W myśl postulatów dyrektywy pestycydowej technika integrowanej ochrony roślin powinna umożliwiać: (i) ograniczenie ilości stosowanych środków ochrony roślin do niezbędnego minimum poprzez redukcję dawek i liczby zabiegów; (ii) ukierunkowanie środków ochrony roślin na osiągnięcie celu poprzez precyzyjne ich nanoszenie i ograniczanie strat, i tym samym minimalizację skutków ubocznych dla ludzi, zwierząt i dla środowiska; (iii) ograniczenie znoszenia środków ochrony roślin poprzez wykorzystanie najefektywniejszych środków technicznych. Wymagania te streszczają się w idei precyzyjnej ochrony roślin, której realizacja rodzi potrzebę zastosowania technik rolnictwa precyzyjnego będących.

W publikacji **H.1** przeprowadziłem przegląd narzędzi rolnictwa precyzyjnego wykorzystywanych w precyzyjnej ochronie roślin. Pozycja ta pełni rolę wprowadzenia do rozprawy habilitacyjnej, które nakreśla kontekst mojego osiągnięcia i opisuje zastosowane przeze mnie technologie.

Istotą rolnictwa precyzyjnego jest wykorzystanie zaawansowanych technologii mechatronicznych, w tym sensorowych, nawigacyjnych, mikroprocesorowych i informatycznych do pozyskiwania i przetwarzania danych w celu monitorowania przestrzennej i okresowej zmienności obiektu traktowania i efektywnego zarządzania pracą urządzeń, zgodnie z aktualnymi i lokalnymi potrzebami tego obiektu. Nawigacja urządzeń w przestrzeni rolniczej odgrywa w tym kontekście rolę kluczową. Odometryczne systemy nawigacji z wykorzystaniem skanerów laserowych (Hyypä, 1994; Anderson, 2013; Śmieszek i in., 2015) nie znalazły zastosowania do nawigowania maszyn rolniczych głównie ze względu na kłopotliwą na obszarach rolniczych konieczność instalowania układu referencyjnych tagów w polu widzenia skanerów. Z powodzeniem, choć na niewielką skalę, stosowane są natomiast autonomiczne systemy lokalnego pozycjonowania - LPS (*Local Positioning System*) do prowadzenia maszyn przy użyciu metod wizyjnych z wykorzystaniem monochromatycznych kamer CCD lub kamer stereoskopowych (Billingsley i Schoenfisch, 1997; Okamoto i in., 2002; Benson i in., 2003) oraz systemów ultradźwiękowych lub optycznych z wykorzystaniem sonarów lub skanerów laserowych typu LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (Harper i McKerrow, 2001; Lida i Burks, 2002; Weiss i Biber, 2011). Mimo swojej autonomiczności urządzenia LPS identyfikują traktowane obiekty lokalnie nie rozpoznając ich otoczenia w skali

makro. Obecnie jedynym powszechnie stosowanym systemem nawigacji w rolnictwie pozostaje nawigacja satelitarna w oparciu o mapy Systemu Informacji Przestrzennej - GIS (*Geographic Information System*). Precyzują one bezwzględną lokalizację poszczególnych obiektów w określonym układzie odniesienia oraz kształt i wzajemne rozmieszczenie względem innych obiektów. Istotnymi obiektami z punktu widzenia opisywanego osiągnięcia naukowego był sad, a dokładniej rzędy drzew w sadzie, będące obiektem traktowania (opryskiwania) oraz obiekty wrażliwe, takie jak zbiorniki i cieki wodne, pasieki, drogi publiczne będące przedmiotem ochrony przed zanieczyszczeniem przez środki ochrony roślin znoszone z sadu.

Publikacja **H.1** omawia i ilustruje (H.1-rys. 2) różne systemy i konfiguracje nawigacji satelitarnej, wskazując na ich możliwości i ograniczenia oraz wymagania sprzętowe. Najpowszechniej wykorzystywanym w gospodarce jest amerykański system GPS (*Global Positioning System*) pobierający sygnały z sieci satelitów NAVSTAR (*NAVigation Signal Timing And Ranging*). Dodatkowo możliwe jest także korzystanie z systemu GLONASS (*GLObalnaja NAWigacionnaja Sputnikowaja Sistiema*), co podwaja liczbę satelitów widocznych przez odbiornik sygnałów satelitarnych i tym samym umożliwia osiągnięcie większej dokładności pozycjonowania obiektów na Ziemi. Do uzyskania dokładności submetrowej, wymaganej na potrzeby omawianego osiągnięcia, konieczne jest stosowanie wspomagających systemów różnicowych, takich jak DGPS (*Differential GPS*). Korzystają one z naziemnych stacji bazowych (referencyjnych) o dokładnie znanym położeniu lub z satelitów geostacjonarnych, które emitują sygnały zawierające poprawki różnicowe. Korygują one błąd obliczenia pozycji, wynikający z przekłamania sygnałów odbieranych z poszczególnych satelitów GPS lub GLONASS. Otwartym satelitarnym systemem wspomagającym oba te systemy jest system EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) z trzema satelitami geostacjonarnymi obejmującymi cały obszar Europy.

Kluczowym problemem rolnictwa precyzyjnego jest pozyskiwanie informacji o właściwościach i środowisku roślin w celu monitorowania ich zmienności. Czujniki optyczne, w tym także spektralne, identyfikujące jedynie obecność roślin służą do włączania rozpylaczy w odpowiednich momentach. Mimo wymiernych oszczędności środków ochrony podczas opryskiwania sadów (Doruchowski i in., 1998a; Doruchowski i in., 1998b; Hołownicki i in., 1998; Koch i Weisser, 2000) na obecnym etapie są one niewystarczającym narzędziem precyzyjnej ochrony roślin. Obecnie do jej realizacji konieczne jest stosowanie bardziej zaawansowanych systemów identyfikujących cechy morfologiczne i zdrowotny status roślin oraz parametry meteorologiczne.

Kondycję roślin można określać poprzez znaną z teledetekcji analizę charakterystyki odbicia promieniowania elektromagnetycznego od roślin, czyli analizę ich krzywych spektralnych. Badanie przebiegu tych krzywych w wybranych kanałach hiperspektralnego obrazu roślin pozwala na identyfikację stresu jakiemu podlega roślina pod wpływem różnych czynników, w tym także szkodników i organizmów chorobotwórczych (Rumpf i in., 2010; Behmann i in., 2014; Lowe i in., 2017). Stres ten przejawia się zwykle zahamowaniem fotosyntezy, co w przypadku chorób jest wykrywalne w toku analizy hiperspektralnej już w kilka godzin po infekcji, a więc długo przed wystąpieniem widocznych dla oka symptomów choroby. Umożliwia to racjonalne zastosowanie środka ochrony roślin, lub zastąpienie go neutralnym dla środowiska stymulatorem odporności wystarczającym do zwalczania choroby w bardzo wczesnym stadium jej rozwoju. Zastosowanie kamery wielokanałowej do pozyskiwania obrazów hiperspektralnych oraz opracowanie algorytmu do analizy tych obrazów w celu identyfikacji bardzo wczesnych infekcji jabłoni przez patogenne grzyby

było przedmiotem prac koordynowanego przeze mnie pakietu roboczego ECOFRUIT w ramach europejskiego projektu ISAFRUIT (patrz rozdział 2.5.2.1). W ramach tego projektu prowadzono prace badawczo-rozwojowe będące przedmiotem opisywanego osiągnięcia naukowego.

Do wyznaczania morfologicznych cech roślin stosuje się metody wizyjne, optyczne i akustyczne. Wśród cech pozyskiwanych na potrzeby precyzyjnej ochrony sadów najistotniejsze są wymiary koron drzew, tzn. wysokość i szerokość, oraz ich gęstość. Zmienność tych parametrów jest podstawą zróżnicowanego dawkowania środków ochrony roślin wg koncepcji VRA (*Variable Rate Application*) (Gil i in., 2007; Llorens i in., 2013; Zhang i in., 2018). Koncepcja ta realizuje w pełni założenia precyzyjnej ochrony roślin, polegające na stosowaniu pestycydów tylko wtedy kiedy jest to konieczne, tylko tam gdzie niezbędne i tylko w wymaganej ilości.

Wizyjne metody identyfikacji koron drzew wykorzystują mono- lub stereoskopowe kamery cyfrowe. Za pomocą kamer monoskopowych gęstość koron drzew określana jest na podstawie ich projekcji, czyli dwuwymiarowego rzutu poziomego (Hočevar i in., 2010). Kamery stereoskopowe odwzorowują także odległość od obiektu i jego szerokość umożliwiając przestrzenne określanie charakterystyki drzew (Rovira-Más i in., 2006).

Najwierniejsze odwzorowanie architektury koron drzew uzyskuje się przy użyciu metod optycznych, a zwłaszcza skanerów laserowych typu LIDAR. Pozyskiwane przez nie dane, dostarczane w formie przestrzennej chmury punktów, przetwarzane są na trójwymiarowy obraz obiektu (Walklate i in., 2002; Rosell i Sanz, 2012). Opisane w literaturze algorytmy przetwarzania danych umożliwiają określenie wielu istotnych cech drzew, takich jak: wymiary i objętość koron, łączna powierzchnia liści, powierzchnia projekcji koron, indeks powierzchni liści LAI (*Leaf Area Index*) oraz gęstość ulistnienia wyrażana powierzchnią liści w jednostce objętości koron (Gil i in., 2014). Wizyjne i laserowe metody identyfikacji cech drzew wymagają niestety wysokiej mocy obliczeniowej komputerów pokładowych, co ogranicza możliwości praktycznego zastosowania tych metod do zmiennego dawkowania środków ochrony roślin w czasie rzeczywistym. Z tego powodu próby wykorzystania ich w tym trybie pozostają wciąż w sferze badań (Zhang i in., 2018).

Jeszcze w pierwszej dekadzie obecnego stulecia, kiedy podjęto prace badawcze będące przedmiotem opisywanego osiągnięcia naukowego, relatywnie tanie i proste w użyciu czujniki ultradźwiękowe, umożliwiały pozyskiwanie w czasie rzeczywistym jedynie danych pozwalających na określenie wymiarów drzew lecz nie ich gęstości (Solanelles i in., 2006; Gil i in., 2007; Jeon i in., 2011; Escolà i in., 2011). Opracowanie algorytmu, który na podstawie sygnału z tych czujników określałby także gęstość obiektów było przedmiotem koordynowanych przeze mnie prac w ramach wspomnianego wyżej projektu ISAFRUIT, realizowanego w latach 2006-2010 (patrz rozdział 2.5.2.2).

W precyzyjnej ochronie roślin dane identyfikujące charakterystykę traktowanych obiektów służą do sterowania pracą opryskiwacza. Powinien on być wyposażony w podzespoły wykonawcze reagujące w czasie rzeczywistym zgodnie z monitorowaną zmiennością obiektów i ich położeniem. W przypadku opryskiwaczy sadowniczych najważniejsze podzespoły wykonawcze to rozpylacze wytwarzające strumień rozpylonej cieczy użytkowej oraz wentylator, który produkuje strumień powietrza wspomagający nanoszenie cieczy w koronach drzew. Mając na uwadze zarówno skuteczność zabiegów jak ich bezpieczeństwo dla środowiska naturalnego sterowanie pracą rozpylaczy powinno uwzględniać automatyczną zmianę wielkości kropeł i wydatku cieczy, a sterowanie pracą wentylatora automatyczną zmianę wydatku powietrza niezależnie dla prawej i lewej strony opryskiwacza. Innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjnych i funkcjonalnych problemów związanych ze sterowaniem

opryskiwacza do precyzyjnej ochrony sadów oraz efekty stosowania tych rozwiązań w praktyce sadowniczej było przedmiotem opisanych w dalszej części autoreferatu kierowanych przeze mnie prac rozwojowych i badań, których wyniki składają się na moje osiągnięcie naukowe (patrz rozdział 2.5).

2.4. Cele prac rozwojowych i badań

Nadrzędnym celem działań składających się na przedstawione osiągnięcie naukowe było udoskonalenie technologii służącej rozwojowi rolnictwa zrównoważonego w zakresie stosowania środków ochrony roślin. Zasadnicze, cząstkowe cele prac opisanych w publikacjach **H.2**, **H.5** i **H.6** oraz patentach **H.3** i **H.4** miały charakter praktyczny i obejmowały:

- C.1** opracowanie dla opryskiwaczy sadowniczych innowacyjnych rozwiązań technicznych do precyzyjnej ochrony roślin zgodnie z wymaganiami integrowanej ochrony roślin,
- C.2** ocenę efektów działania opracowanych rozwiązań w badaniach stanowiskowych i polowych,
- C.3** weryfikację skuteczności biologicznej niskoznoszeniowej techniki ochrony, będącej elementem precyzyjnej ochrony roślin.

Przeglądowe prace **H.1** i **H.7** stanowią odpowiednio wprowadzenie nakreślające genezę i kontekst osiągnięcia oraz podsumowanie rozpatrujące osiągnięcie na tle współczesnych rozwiązań w zakresie precyzyjnej ochrony roślin. Schematyczne powiązanie wszystkich prac w spójny tematycznie cykl publikacji przedstawiono na rys. 1.

2.5. Przebieg prac: geneza, materiały i metody oraz uzyskane wyniki

Stosowanie środków ochrony roślin w formie rozpylonej cieczy użytkowej jest najmniej efektywnym procesem spośród wszystkich zbiegów wykonywanych w uprawach sadowniczych. Z badań przeprowadzonych w Zakładzie Agrotechnologii Instytutu Ogródnictwa (do roku 2010: Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa - ISK) wynika, że straty środków ochrony podczas opryskiwania sadów przy użyciu konwencjonalnych opryskiwaczy z pomocniczym strumieniem powietrza przekraczają 80% (Hołownicki i in., 2000a). Wynika to głównie z braku możliwości precyzyjnej regulacji parametrów strumienia powietrza, przede wszystkim jego wydatku oraz kierunku działania, w zależności od pokroju i gęstości drzew oraz prędkości i kierunku wiatru (Hołownicki i in., 2000b; Hołownicki i in., 2004). Wpływ parametrów strumienia powietrza na jakość zabiegów były przedmiotem badań zespołu Zakładu Agrotechnologii, z moim udziałem, jeszcze przed uzyskaniem przeze mnie stopnia doktora. Późniejsze badania prowadzone przez ten zespół pod moim kierunkiem dowiodły, że odpowiednie dopasowanie wydatku powietrza do charakterystyki drzew poprawia naniesienie cieczy w koronach i zmniejsza jej straty (Doruchowski i in., 1996a; Doruchowski i in., 1996b).

Logiczną konsekwencją powyższych prac była konieczność rozwiązania problemu automatycznej regulacji strumienia powietrza w czasie rzeczywistym, podczas wykonywania zabiegów w sadach. W roku 2005 z inicjatywy Europejskiej Sieci Sadowniczych Instytutów Badawczych EUFRIN (*European Fruit Research Institutes Network*), w której pełnię funkcję członka Komisji i Koordynatora Grupy Roboczej „Technika Ochrony” (*WG "Spray Application Technologies"*) rozpoczęto prace nad wnioskiem o finansowanie europejskiego projektu ISAFRUIT (patrz rozdział 2.1). Powierzono mi wtedy opracowanie koncepcji i zakresu prac oraz koordynację wchodzącego w skład projektu samodzielnego pakietu roboczego WP5.1

ECOFRUIT. Ogólnym celem tego pakietu było opracowanie rozwiązań umożliwiających radykalne ograniczenie zużycia i strat środków ochrony roślin podczas opryskiwania sadów oraz minimalizacja negatywnych skutków ich stosowania dla środowiska. Najlepszym sposobem na osiągnięcie tego celu było opracowanie innowacyjnej techniki integrowanej ochrony sadów. W uzgodnieniu z partnerami naukowymi z Uniwersytetu Wageningen w Holandii (*WUR – Wageningen University*) i Uniwersytetu Turyńskiego we Włoszech (*DISAFA-Turin University*) oraz partnerem komercyjnym Agrocom Polska ustalono, że przedmiotem prac pakietu ECOFRUIT będzie stworzenie „inteligentnego” opryskiwacza sadowniczego **CASA** (*Crop Adapted Spray Application*), w którego skład wejdą trzy systemy realizujące łącznie koncepcję precyzyjnej ochrony roślin. Zakres ten obejmował opracowanie, wykonanie i zastosowanie działających w czasie rzeczywistym narzędzi informatycznych i urządzeń wykonawczych do:

- (i) rozpoznawania zdrowotnego statusu roślin stanowiącego podstawę decyzji o użyciu środków ochrony roślin (system **CHS - Crop Health Sensor**),
- (ii) zróżnicowanego dawkowania środków ochrony roślin w zależności od wielkości i gęstości drzew (system **CIS - Crop Identification System**),
- (iii) regulacji strumienia powietrza i wielkości kropeł w zależności od prędkości i kierunku wiatru oraz położenia opryskiwacza względem obszarów wrażliwych w celu ochrony tych obszarów przed zanieczyszczeniem (system **EDAS - Environmentally Dependent Application System**).

Kierowanej przeze mnie Pracowni Techniki Ochrony i Nawożenia w Zakładzie Agrotechnologii Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach przypadło w udziale opracowanie i przetestowanie komponentu **EDAS**, będącego przedmiotem publikacji **H.2** i chronionego patentami **H.3** i **H.4** (patrz rozdział 2.5.1) oraz koordynacja całości pakietu ECOFRUIT i prac nad integracją wszystkich komponentów na opryskiwaczu **CASA**, opisanego w publikacji **H.5** (patrz rozdział 2.5.2).

Wyniki licznych badań, w tym także własnych, prowadzonych z wykorzystaniem systemu **EDAS** w Polsce (publikacja **H.5**) oraz w Holandii (Wenneker i in., 2012) wskazują na możliwość nawet 95% redukcji znoszenia środków ochrony roślin przy użyciu rozpylaczy grubokroplistych (patrz rozdział 2.5.1.4). Wynikają z tego ewidentne korzyści środowiskowe leżące u podstaw integrowanej ochrony roślin oraz idei rolnictwa zrównoważonego. Tymczasem sadownicy, przyzwyczajeni do standardowych, drobnokroplistych rozpylaczy wirowych, odnoszą się do grubokroplistych zabiegów z rezerwą, która wynika z barku przekonania o biologicznej skuteczności grubych kropeł w ochronie roślin sadowniczych. Brak rodzimych, kompleksowych badań w tym obszarze skłonił mnie do podjęcia projektu nr 8.2.2 w ramach działalności statutowej Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach (patrz rozdział 2.1), którego celem było określenie wpływu wielkości kropeł stosowanych w różnych dawkach cieczy na skuteczność zwalczania najważniejszych chorób i szkodników jabłoni oraz zapobiegania chorobom przechowalnym owoców. Badania prowadzono w latach 2010-2014, we współpracy z Zakładem Ochrony Roślin, a wyniki dostarczające argumentów przemawiających za skutecznym stosowaniem niskoznoszeniowych rozpylaczy grubokroplistych w sadownictwie przedstawiono w publikacji **H.6** (patrz rozdział 2.5.3).

2.5.1. EDAS - automatyczna regulacja wydatku powietrza i wielkości kropeł

Szczegółowym celem prac opisanych w publikacji **H.2** było opracowanie koncepcji i wykonanie oraz przetestowanie systemu mechatronicznego do regulacji opryskiwacza sadowniczego w zależności od zmiennych okoliczności zabiegu. Są one monitorowane i określone przez prędkość i kierunek wiatru, które mają decydujący wpływ na znoszenie środków ochrony roślin oraz odległość opryskiwacza od obszarów wrażliwych, która wyznacza poziom ryzyka zanieczyszczenia tych obszarów przez znoszone substancje. Ze względu na funkcję jaką ten system miał spełniać nadano mu nazwę **EDAS** - *Environmentally Dependent Application System*. W skład systemu wchodzi trzy moduły zarządzające pracą opryskiwacza:

- **moduł sensorów**, który monitoruje prędkość i kierunek wiatru oraz położenie opryskiwacza względem granicy sadu i obszarów wrażliwych, będąc źródłem danych wejściowych dla modułu sterowania,
- **moduł sterowania**, który przetwarza dane wejściowe z modułu sensorów na sygnały wyjściowe do modułu wykonawczego,
- **moduł wykonawczy**, który reaguje na sygnały wyjściowe z modułu sterowania i ustala kluczowe parametry pracy opryskiwacza, czyli dystrybucję i prędkość strumienia powietrza oraz wielkość kropeł.

System **EDAS** został zintegrowany z opisanymi dalej systemami **CHS** i **CIS** tworząc inteligentny opryskiwacz **CASA** do precyzyjnej ochrony sadów.

2.5.1.1. Moduł sensorów

Moduł sensorów systemu EDAS przekazuje do modułu sterowania dane wejściowe określające chwilowe okoliczności zabiegu, które są podstawą odpowiedniej regulacji wentylatora i zespołu rozpylającego. Dane o prędkości i kierunku wiatru pozyskiwane są za pomocą anemometru ultradźwiękowego, a o pozycji opryskiwacza za pomocą systemu nawigacji satelitarnej DGPS. Ponadto moduł sensorów przekazuje z modułu wykonawczego informacje zwrotne o bieżącym położeniu regulowanych elementów wentylatora. Informacje te pochodzą z przekaźników do napędu siłowników elektrycznych regulujących przepustnice na wlocie i wylocie wentylatora (patrz rozdział 2.5.1.3.). Dane z tych urządzeń, będących elementami modułu sensorów trafiają do modułu sterowania gdzie są przetwarzane na sygnały wyjściowe, kierowane do modułu wykonawczego, który odpowiada za odpowiednie ustalenia dystrybucji i prędkości strumienia powietrza oraz wielkości kropeł. Powiązanie poszczególnych elementów wszystkich trzech modułów przedstawia opis patentowy **H4**.

Anemometr

Do pomiaru parametrów wiatru wykorzystano anemometr ultradźwiękowy WMT50 (VAISALA, Finlandia) z trzema przetwornikami ultradźwiękowymi, rozmieszczonymi w płaszczyźnie poziomej, obwodowo (\varnothing 114 mm), w równych odległościach między sobą. Prędkość i kierunek wiatru określone są na podstawie pomiaru czasu przebiegu dźwięku w obu kierunkach między jednym przetwornikiem a dwoma pozostałymi. Czas ten zależy bowiem od prędkości ruchu powietrza w otoczeniu przetworników.

Zakresy pomiarowe anemometru wynoszą: dla prędkości wiatru 0,05 - 60,0 m/s (dokładność pomiaru $\pm 0,3$ m/s; rozdzielczość wyniku 0,1 m/s); dla kierunku wiatru 0 - 360° (dokładność pomiaru $\pm 3,0^\circ$; rozdzielczość wyniku 1,0°). Pomiary przeprowadzono z częstotliwością 4 Hz, a wyniki uśredniano dla przedziałów czasowych wynoszących 5 s.

Anemometr zamontowany był na maszcie o wysokości 4 m, umożliwiającym pomiar parametrów wiatru ponad wierzchołkami drzew. Dane pomiarowe przesyłane były do modułu sterowania systemu EDAS (w kabinie ciągnika) bezprzewodowo w paśmie radiowym ISM

(*Industrial-Scientific-Medical*) 2,4 GHz do zastosowań przemysłowych, naukowych i medycznych. Komunikacja radiowa między anemometrem i modułem sterowania utrzymywana była za pomocą modemów XBee-PRO-PKG z interfejsem szeregowym RS-232 do cyfrowej transmisji danych z nadajnikiem/odbiornikiem radiowym o zasięgu 1200 m.

Nawigacja satelitarna

Pozycjonowanie opryskiwacza odbywało się przy użyciu różnicowego systemu nawigacji DGPS, z wykorzystaniem odbiornika Outback S3 (Outback Guidance by Hemisphere GPS, USA) z wyświetlaczem 8,5", oraz stacją referencyjną Baseline HD (CLASS, Niemcy) generującą korekcyjny sygnał radiowy o częstotliwości 434 MHz. Zgodnie ze specyfikacją producenta korekcja sygnału DGPS odbieranego przez Outback S3 pozwala na uzyskanie maksymalnej dokładności pozycjonowania obiektów wynoszącej 10 cm. W warunkach, w których prowadzono prace badawcze dokładność ta wynosiła ok. 50 cm, spełniając warunek konieczny do nawigacji opryskiwacza w sadzie.

2.5.1.2. Moduł sterowania

O ile w konfiguracji modułu sensorów wykorzystano urządzenia dostępne komercyjnie, to moduł sterowania wymagał opracowania oryginalnej koncepcji i wykonania dedykowanej, centralnej jednostki przetwarzania danych CPU (*Central Processing Unit*) w oparciu o mikroprocesor sterujący z oprogramowaniem oraz stworzenia oryginalnego oprogramowania z graficznym interfejsem użytkownika. Zostało ono zainstalowane w komputerze przemysłowym typu HMI (*Human Machine Interface*), który stanowi terminal sterujący pracą opryskiwacza. Cały układ sterowania chroniony jest patentem, a poszczególne jego elementy zostały przedstawione w opisie patentowym **H.4**.

CPU

Mikroprocesor otrzymuje dane od elementów modułu sensorów, tzn. anemometru oraz odbiornika nawigacji satelitarnej DGPS. Jednokierunkowe, szeregowo transmisje danych wejściowych realizowane są przez magistrale RS-232. Jednostka skomunikowana jest dwukierunkowo z magistralą CAN oraz poprzez złącze RS-232 także dwukierunkowo z komputerem HMI (terminalem). Dane przetwarzane są według opracowanego dla CPU algorytmu zgodnie z ustawieniami operatora na terminalu. Wynikiem tego procesu są polecenia przesyłane do modułu wykonawczego. CPU komunikuje się jednokierunkowo z układem elektrozaworów sterujących zaworami pneumatycznymi podzespołu rozpylającego, oraz dwukierunkowo z siłownikami elektrycznymi, regulującymi przestony na wlocie i wylocie wentylatora (patrz rozdział 2.5.1.3). Zintegrowany układ diod LED na obudowie CPU sygnalizuje dopływ danych wejściowych, wychodzące polecenia oraz stany sterowanych elementów wentylatora w module wykonawczym.

Komputer HMI z oprogramowaniem

Rolę terminala z interfejsem użytkownika spełnia komputer przemysłowy TPC-1261H-A1E (ADVANTECH, Tajwan) z panelem dotykowym SVGA LCD 12,1" i systemem operacyjnym Windows XP Professional (Microsoft, USA). W środowisku graficznym tego systemu działa specjalistyczne oprogramowanie opracowane w ramach pakietu ECOFRUIT w celu monitorowania i kontroli pracy opryskiwacza z systemem EDAS. Umożliwia ono wczytywanie i śledzenie dostępnych map GIS, a w przypadku braku dokładnych map odwzorowujących rzędy drzew w sadzie oraz obiekty wrażliwe (studnie, stawy, kanały, pasieki) tworzenie i zapisanie własnych map, dedykowanych bezpiecznym zabiegom ochrony roślin. Przed rozpoczęciem pracy operator wybiera z biblioteki oprogramowania mapę przeznaczonego do opryskania sadu, wprowadza w ustawieniach określone dla poszczególnych środków ochrony

roślin szerokości stref buforowych dla obiektów wrażliwych w celu ich ochrony przed zanieczyszczeniem, oraz deklaruje jeden z dziewięciu predefiniowanych scenariuszy zabiegu. Scenariusze są kombinacjami trzech opcji wielkości kropel oraz trzech opcji dystrybucji strumienia powietrza podczas opryskiwania skrajnego i sąsiedniego rzędu drzew w sadzie. Ich wybór określa reakcję podzespołu rozpylającego, tzn. działanie rozpylaczy drobnokroplistych lub grubokroplistych, oraz regulację prędkości i ustawienie jednostronnego lub dwustronnego działania strumienia powietrza w zależności od pozycji opryskiwacza, zwłaszcza gdy zbliża się on do skrajnego rzędu w sadzie. Podczas zabiegu na ekranie komputera operator śledzi tor jazdy opryskiwacza na mapie wybranego sadu, na której liniowo odwzorowane są rzędy drzew, a konturowo obiekty wrażliwe ze strefami buforowymi zdefiniowanymi przez operatora. W górnej części ekranu znajduje się pasek informacyjny pozwalający na monitorowanie okoliczności i parametrów zabiegu. Zawiera on informacje dotyczące bieżących danych wejściowych oraz aktualnych stanów regulowanych podzespołów opryskiwacza, tzn:

- prędkość wiatru [m s^{-1}]
- bezwzględny kierunek wiatru [$^{\circ}$]
- kierunek wiatru względem ruchu opryskiwacza – wizualizacja za pomocą wektora
- bezwzględny kierunek jazdy opryskiwacza [$^{\circ}$]
- prędkość jazdy opryskiwacza [km h^{-1}]
- pozycja opryskiwacza – współrzędne geograficzne
- liczba rzędów do granicy sadu po prawej stronie [n]
- liczba rzędów do granicy sadu po lewej stronie [n]
- położenie przepustnicy wielosegmentowej na wlocie wentylatora [S0 ... S5] (regulacja prędkości powietrza) (patrz rozdział 2.5.1.3)
- położenie kierownicy powietrza na wylocie wentylatora [V1 ... V11] (dystrybucja powietrza na prawą/lewą stronę opryskiwacza) (patrz rozdział 2.5.1.3)
- wielkość kropel na prawej sekcji rozpylającej – wizualizacja
- wielkość kropel na lewej sekcji rozpylającej – wizualizacja

Każdy zabieg można zapisać a następnie odtworzyć jego przebieg na ekranie w oryginalnym, przyspieszonym lub zwolnionym tempie.

2.5.1.3. Moduł wykonawczy

Podobnie jak w przypadku modułu sterowania elementy modułu wykonawczego tzn. układy regulacji wentylatora i podzespół rozpylający są przedmiotem oryginalnych opracowań i własnych prac rozwojowych. Zostały one zamontowane na podwoziu standardowego opryskiwacza sadowniczego Hardi Arrow 1500, udostępnionego do celów projektu przez firmę ILEMO HARDI (Hiszpania). Układ regulacji wentylatora systemu EDAS chroniony jest patentem, a poszczególne jego elementy zostały przedstawione w opisie patentowym **H.3**.

Regulacja wentylatora

Do wytwarzania pomocniczego strumienia powietrza wykorzystano będący na wyposażeniu opryskiwacza Hardi Arrow 1500 wentylator promieniowy P540D o maksymalnym wydatku powietrza wynoszącym $19\,000\text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (przy obrotach nominalnych 540 r min^{-1}). Podwójny wirnik wentylatora, umożliwia zasysanie powietrza zarówno od strony wału napędowego jak i strony przeciwnej. Po tej właśnie stronie w otworze wlotowym powietrza umieszczono wielosegmentową przepustnicę wentylatora zaprojektowaną i wykonaną na wzór irysowej przysłony aparatu fotograficznego. Mechanizm przepustnicy składający się z dwunastu segmentów (listków), wykonanych z blachy kwasoodpornej napędzany jest za pomocą siłownika elektrycznego. Umożliwia on bezstopniową redukcję średnicy otworu

wlotowego od 360 do 30 mm, i tym samym regulację ilości zasysanego przez wentylator powietrza, a więc także jego wydatku. Konstrukcja przepustnicy wraz z rysunkami przedstawiona jest w opisie patentowym **H.3**.

W górnej części wentylatora, na wylocie powietrza zamocowano specjalnie zaprojektowany i wykonany kolektor w postaci skrzyni. Znajduje się w niej napędzana silownikiem elektrycznym obrotowa kierownica powietrza w formie przepustnicy płytowej, która dzieli przestrzeń kolektora na dwie komory. Budowa kolektora z kierownicą powietrza wraz z rysunkami przedstawiona jest w opisie patentowy **H.3**. Zadaniem kierownicy jest rozdział powietrza, które w zależności od jej położenia może być tłoczone w odpowiedniej proporcji do prawej i lewej komory kolektora. Jej skrajne położenia odcinają przepływ powietrza do prawej lub lewej komory, a położenie centralne rozdziela powietrze symetrycznie do obu komór. Każda komora kolektora posiada ujęcie powietrza poprzez osiem cylindrycznych otworów o średnicy 100 mm połączonych elastycznymi przewodami z płaskimi dyfuzorami powietrza typu „rybi ogon”. Z każdej strony opryskiwacza znajduje się zestaw ośmiu dyfuzorów z zamontowanymi na nich rozpylaczami.

Dzięki przepustnicy wielosegmentowej na wlocie wentylatora oraz kierownicy powietrza w kolektorze na jego wylocie możliwa jest płynna regulacja wydatku powietrza w czasie rzeczywistym, w zakresie od zera do wartości maksymalnej, indywidualnie dla każdej strony opryskiwacza. Regulacja ta przeprowadzana jest automatycznie za pośrednictwem modułu sterowania w zależności od lokalnej sytuacji monitorowanej przez moduł sensorów. Jest to innowacyjne w skali światowej rozwiązanie umożliwiające niezależną (asymetryczną) regulację wydajności strumienia powietrza z prawej i lewej strony opryskiwacza.

Prędkość powietrza emitowanego przez dyfuzory jest funkcją jego wydatku i parametrem charakteryzującym efektywność penetracji koron drzew. W publikacji **H.2** przedstawiono wyniki stanowiskowych pomiarów prędkości powietrza dla wszystkich 66 kombinacji 6 ustawień przepustnicy wielosegmentowej na wlocie i 11 pozycji kierownicy powietrza w kolektorze, na wylocie wentylatora. Przepustnica wielosegmentowa ustawiona była w położeniach, od S0 (całkowite zamknięcie: średnica wlotu = 30 mm) do S5 (całkowite otwarcie: średnica wlotu = 360 mm), a przepustnica płytowa w kolektorze w pozycjach, od V1 (odcięcie powietrza do prawej sekcji dyfuzorów), przez V6 (równomierna dystrybucja powietrza do obu sekcji), do V11 (odcięcie powietrza do lewej sekcji dyfuzorów). Jednoczesne pomiary dla wszystkich dyfuzorów z każdej strony opryskiwacza przeprowadzono przy użyciu zestawu ośmiu anemometrów temperaturowych typu „hot-film” i wielokanałowego loggera. Biorąc pod uwagę liczbę kombinacji (66), dyfuzorów (16) i powtórzeń (5) zebrano i przeanalizowano 5280 pomiarów prędkości powietrza. Rysunek 5 w publikacji **H.2** jest syntezą tych pomiarów, pokazującą średnie wartości prędkości powietrza dla prawej i lewej sekcji ośmiu dyfuzorów w różnych kombinacjach przepustnic na wlocie i wylocie wentylatora, przy stałych obrotach wirnika. Przy ustawieniu S2-V6, czyli przy w połowie otwartej przepustnicy na wlocie wentylatora i centralnym położeniu przepustnicy w kolektorze, średnia prędkość powietrza z dyfuzorów prawej i lewej sekcji wynosiła odpowiedni 14,0 i 15,6 m s⁻¹, co w warunkach pełnego ulistnienia nawet największych drzew we współczesnych modelach sadów owoców ziarnkowych jest prędkością wystarczającą do efektywnej penetracji koron. Z tego powodu położenie to i uzyskiwane przy nim prędkości powietrza przyjęto jako wyjściowe (referencyjne). W sytuacji wymagającej silniejszego strumienia powietrza, np. w warunkach bardzo wysokiej prędkości roboczej system EDAS pozwala na zwiększenie jego prędkości dwustronnie do 18,3 i 17,5 m s⁻¹ (S4-V6), a w przypadku bocznego wiatru jednostronnie, na lewej sekcji do 22,1 m s⁻¹ (S4-V1) lub na prawej do 21,0 m s⁻¹ (S4-V11). Kiedy strumień

powietrza jest zbyt silny, np. w przypadku małego ulistnienia drzew lub bardzo małej miąższości koron, prędkość strumienia powietrza można zmniejszyć dwustronnie do 11,6 i 13,1 m s⁻¹ (S0-V6), lub stopniowo redukować jednostronnie do zera przesuwając przepustnicę w kolektorze do skrajnych pozycji V1 lub V11. W razie konieczności pracy przy niższych zakresach prędkości strumienia powietrza, np. w sadach karłowatych lub nowo posadzonych pozostaje możliwość redukcji obrotów wirnika wentylatora i przeprowadzenie analogicznych regulacji przy niższej wyjściowej (referencyjnej) prędkości.

Wyniki uzyskane podczas badań stanowiskowych pokazały, że opracowane urządzenia systemu EDAS pozwalają na niezależną regulację prędkości powietrza na prawej i lewej sekcji opryskiwacza w zakresie umożliwiającym realizację niskoznoszeniowych scenariuszy zabiegów w sadach. Różne ich warianty i efekty testowano w toku badań polowych i opisano w publikacjach **H.2** i **H.5** (patrz rozdziale 2.5.1.4).

Zespół rozpylający

Każdy dyfuzor powietrza systemu **EDAS** wyposażony jest w dwie alternatywnie działające sekcje rozpylające: drobnokroplistą i grubokroplistą (niskoznoszeniową). Każda sekcja posiada cztery niezależnie otwierane rozpylacze. W integracji z systemem CIS (patrz rozdział 2.5.2.2) na sekcji montowane są rozpylacze o różnych wydatkach cieczy, co pozwala na regulację w czasie rzeczywistym dawki cieczy, i tym samym dawki środków ochrony roślin poprzez włączanie odpowiedniej kombinacji rozpylaczy o odpowiednich wydatkach. W ten sposób realizowane jest zróżnicowane dawkowanie środków ochrony roślin wg koncepcji VRA. Na obu sekcjach montowane są rozpylacze o tej samej konfiguracji wydatków cieczy lecz wytwarzające krople o kontrastowo odmiennej wielkości. W skład sekcji drobnokroplistej wchodzi rozpylacze standardowe, a grubokroplistej rozpylacze eżektorowe, sklasyfikowane jako niskoznoszeniowe. W zależności od sytuacji, która wymaga określonej wielkości kropeł, następuje w czasie rzeczywistym automatyczne przełączanie sekcji rozpylających. Zdublowane sekcje rozpylaczy na poszczególnych dyfuzorach włączane są niezależnie. Niezależna praca poszczególnych sekcji oraz rozpylaczy w ramach każdej sekcji wymagała rozbudowanego układu sterowania pracą podzespołu rozpylającego. Rozpylacze włączane są przy użyciu zaworów pneumatycznych, które z kolei sterowane są za pomocą zaworów elektromagnetycznych (solenoidowych). W tym celu opryskiwacz doświadczalny wyposażono w sprężarkę powietrza.

W zdefiniowanych przez użytkownika, opisanych poniżej sytuacjach (patrz rozdział 2.5.1.4), po automatycznym włączeniu sekcji rozpylaczy grubokroplistych i automatycznej regulacji wydatku powietrza opryskiwacz przechodzi w tryb pracy o ograniczonym znoszeniu środków ochrony roślin. W ten sposób moduł wykonawczy realizuje funkcję systemu **EDAS** zgodnie z założoną koncepcją ochrony środowiska przed zanieczyszczeniem.

2.5.1.4. Funkcjonowanie systemu

W publikacji **H.2** przedstawiono warianty regulacji dwóch kluczowych parametrów zabiegów ochrony roślin, tzn. dystrybucji i prędkości strumienia powietrza oraz wielkości kropeł, z użyciem systemu EDAS. Kombinacje tych parametrów pozwalają na realizację niskoznoszeniowych scenariuszy zabiegów w sytuacjach rodzących ryzyko zanieczyszczenia obszarów wrażliwych, takich jak studnie, wody powierzchniowe czy pasieki. Dla środków ochrony roślin stwarzających takie ryzyko określone są w toku rejestracji właściwe dla nich szerokości stref buforowych w sąsiedztwie obszarów wrażliwych. Stosowanie środków w wyznaczonych i podanych w etykiecie strefach buforowych jest zabronione, co oznacza, że jeśli opryskiwacz znajdzie się w granicach takiej strefy to jego operator powinien bezwzględnie

wyłączyć rozpylacze. Ponadto w celu ograniczenia ryzyka zanieczyszczenia obszarów wrażliwych dobrą praktyką jest także realizacja scenariuszy niskoznoszeniowych w pasie terenu bezpośrednio przylegającym do strefy buforowej. Realizacja scenariusza niskoznoszeniowego w sadach polega na zwiększeniu wielkości kropeł i zredukowaniu prędkości strumienia powietrza tak aby zminimalizować ryzyko znoszenia środków ochrony roślin w kierunku obiektów wrażliwych. Wykonywanie tych zaleceń w przypadku standardowego opryskiwacza sadowniczego wymaga zatrzymania ciągnika, odłączenia napędu WOM oraz ręcznej zmiany rozpylaczy i biegu przekładni napędowej wentylatora i/lub zmiany kąta ustawienia łopat wirnika wentylatora. Opryskiwacz z systemem EDAS realizuje scenariusze niskoznoszeniowe automatycznie według założeń operatora i w czasie rzeczywistym, a więc odpowiednio do lokalnie monitorowanych okoliczności zabiegu.

Oprogramowanie systemu EDAS w terminalu sterowania (komputerze HMI) umożliwia korzystanie z map GIS z zaznaczonymi obiektami wrażliwymi lub tworzenie i zapisanie w bibliotece własnych uproszczonych map poprzez naniesienie wszelkich obiektów i nadanie im jednej z dwóch kategorii: obiekty poddawane zabiegom opryskiwania (rzędy drzew w sadzie) lub obiekty wrażliwe objęte strefą buforową. Następnie operator wprowadza w ustawieniach programu odczytaną na etykiecie danego środka ochrony roślin szerokość strefy buforowej dla naniesionych obszarów wrażliwych, oraz przyjętą arbitralnie szerokość przyległego do tej strefy pasa terenu. Program rysuje na mapie zadeklarowany obszar objęty strefą buforową, gdzie środek ochrony roślin nie może być stosowany, oraz przylegający do niej pas terenu, gdzie ma być stosowany według scenariusza niskoznoszeniowego. Tak zaprogramowany system EDAS sprawia, że opryskiwacz pracujący z użyciem rozpylaczy drobnokroplistych i tradycyjnie działającym wentylatorem, wytwarzającym dwustronnie symetryczny strumień powietrza z chwilą wjazdu w pas przylegający do strefy buforowej automatycznie przestawia się na niskoznoszeniowy tryb pracy. W tym celu na polecenie modułu sterowania moduł wykonawczy systemu wyłącza rozpylacze drobnokropliste i uruchamia grubokropliste oraz redukuje w zadanym stopniu, lub całkowicie odcina strumień powietrza działający w kierunku obiektów wrażliwych. Kiedy opryskiwacz zbliża się do obiektów wrażliwych na odległość mniejszą niż szerokość strefy buforowej następuje całkowite wyłączenie rozpylaczy.

Dobrą praktyką jest także stosowanie scenariuszy niskoznoszeniowych na obrzeżach sadu aby zminimalizować emisję środków ochrony roślin poza obszar ich bezpośredniego stosowania. W takim przypadku scenariusze niskoznoszeniowe polegają na zastosowaniu rozpylaczy grubokroplistych oraz istotnej redukcji lub całkowitym odcięciu strumienia powietrza skierowanego na zewnątrz sadu podczas opryskiwania skrajnego rzędu drzew, lub także jednego lub dwóch kolejnych rzędów. System EDAS umożliwia niezależne zaprogramowanie regulacji strumienia powietrza i jakości rozpylania na jednym, dwóch lub trzech brzegowych rzędach sadu i tym samym realizację dziewięciu wersji scenariuszy niskoznoszeniowych będących kombinacjami obu parametrów zabiegu. Efekt ich realizacji wyrażony stopniem redukcji znoszenia przedstawiono w publikacji **H.5** – Tabela 2. Podczas przeprowadzonych w Polsce pomiarów stwierdzono, że scenariusz polegający na zastosowaniu rozpylaczy grubokroplistych na pierwszym i drugim rzędzie drzew oraz jednostronnym zmniejszeniu prędkości strumienia powietrza o połowę na drugim rzędzie i całkowitym jednostronnym odcięciu powietrza na pierwszym rzędzie (kombinacja EDAS-C3) spowodował redukcję znoszenia środków ochrony roślin poza sad o 83,2% w porównaniu z tradycyjnie działającym opryskiwaczem deflektorowym (kombinacja CROSS-FLOW), oraz o 71,3% w stosunku do opryskiwacza EDAS nie realizującego scenariusza niskoznoszeniowego (kombinacja EDAS-A1). Tylko jednostronne odcięcie strumienia powietrza na pierwszym

rzędzie drzew jednostronna i jego redukcja na drugim rzędzie z użyciem rozpylaczy drobnokroplistych (kombinacja EDAS-A3) ograniczyła znoszenie o 60%. W kolejnych badaniach własnych, przeprowadzonych w WUR-Wageningen (Holandia) (Wenneker i in., 2012) system EDAS przy użyciu rozpylaczy grubokroplistych i jednostronnie, stopniowo zmniejszanej do zera prędkości strumienia powietrza począwszy od piątego, a skończywszy na pierwszym rzędzie drzew umożliwił redukcję znoszenia cieczy w strefie wód powierzchniowych (4,5 – 5,5 m od sadu) o 95% w stosunku do standardowej techniki z wykorzystaniem opryskiwacza deflektorowego z rozpylaczami drobnokroplistymi. Zgodnie z holenderskimi zasadami klasyfikacji technik ograniczających znoszenie taki scenariusz z użyciem systemu EDAS zostałby zaszerogowany na równi z opryskiwaczami tunelowymi, uważanymi za szczytowe osiągnięcie w zakresie redukcji znoszenia środków ochrony roślin.

Innym newralgicznym punktem z perspektywy ryzyka znoszenia jest początek i koniec każdego rzędu drzew, a więc miejsce gdzie ciągnik z opryskiwaczem wykonuje nawrót. W celu ograniczenia emisji środków ochrony roślin poza obszar sadu wyłączenie i włączenie rozpylaczy musi następować w momencie gdy sekcje opryskowe znajdują się dokładnie na końcu rzędu. Opryskiwacz z systemem EDAS prowadzony zgodnie z mapą sadu, na której każdy rząd drzew ma dokładnie określony początek i koniec precyzyjnie włącza i wyłącza rozpylacze podczas wykonywania nawrotów. Dodatkowo operator może zaprogramować jeszcze inny scenariusz niskoznoszeniowy zaznaczając na mapie sadu pas obejmujący skrajne odcinki rzędów jako obszar podwyższonego ryzyka znoszenia. W takim przypadku system EDAS włącza rozpylacze grubokropliste na zaznaczonych odcinkach za każdym razem gdy opryskiwacz zaczyna lub kończy opryskiwanie rzędów drzew.

Asymetryczna regulacja strumienia powietrza systemu EDAS pozwala także na przeciwdziałanie bocznym podmuchom wiatru. Na sygnał z anemometru automatycznie zmieniają się ustawienia przepustnic na wlocie i wylocie wentylatora w taki sposób, że strumień powietrza działający pod wiatr zostaje odpowiednio wzmocniony, a działający z wiatrem zostaje zredukowany wyrównując tym samym warunki penetracji drzew przez krople cieczy po oby stronach opryskiwacza (**H.2** – rys. 6). Ponadto po przekroczeniu krytycznej prędkości wiatru zdefiniowanej przez operatora (np. $>2,0 \text{ m s}^{-1}$), system EDAS może automatycznie przełączyć rozpylacze drobnokropliste na grubokropliste (**H.2** – rys. 3).

Jednostronne obniżanie prędkości strumienia powietrza lub całkowite jednostronne jego odcinanie w celu realizacji scenariuszy niskoznoszeniowych może budzić obawy o pogorszenie penetracji szerokich koron drzew przez ciecz użytkową. Wątpliwość tę rozwiały wyniki pomiarów naniesienia substancji w drzewach jabłoni o miąższości koron dochodzącej nawet do 2,0 m podczas zabiegów wykonanych z użyciem systemu EDAS zgodnie z niskoznoszeniowymi scenariuszami opisanymi w publikacji **H.5** (Doruchowski i in., 2009). Żaden ze scenariuszy, w których zastosowano rozpylacze grubokropliste nie spowodował istotnie mniejszego naniesienia substancji w drzewach. Jedynie w przypadku scenariuszy z użyciem rozpylaczy drobnokroplistych w pierwszym rzędzie drzew opryskiwanych przy udziale jednostronnie działającego strumienia powietrza stwierdzono istotnie mniejsze naniesienie niż to jakie uzyskano na rzędach opryskiwanych z dwustronnie działającym powietrzem. Wyniki doświadczenia wskazują, że jeśli tylko scenariusze niskoznoszeniowe realizowane są z zastosowaniem rozpylaczy grubokroplistych to nie ma obaw, że zredukowany strumień powietrza pogarsza naniesienie cieczy w drzewach. Duża masa i tym samym duża energia kinetyczna grubych kropel kompensuje wówczas brak strumienia powietrza w procesie penetracji nawet szerokich koron drzew.

2.5.2. CASA - inteligentny opryskiwacz sadowniczy

Opryskiwacz CASA, w którego skład wchodzi opisany powyżej system EDAS jest przedmiotem publikacji H.5. Celem omówionych w niej prac było opracowanie i ocena efektów działania satelitarnie nawigowanego opryskiwacza do precyzyjnej i bezpiecznej ochrony sadów według koncepcji zmiennego dawkowania pestycydów (VRA), zgodnie z programowanymi i automatycznie kontrolowanymi, niskoznoszeniowymi scenariuszami zabiegów. W opracowaniu pozostałych dwóch komponentów opryskiwacza CASA wiodącą rolę odegrali zagraniczni partnerzy projektu ISAFRUIT: Uniwersytet Wageningen – system CHS, i Uniwersytet Turyński – system CIS. Mój udział w ich tworzeniu polegał na współuczestnictwie w opracowaniu założeń funkcjonalnych dla tych systemów oraz kierowaniu całością prac w ramach pakietu ECOFRUIT, w tym integracji systemów na opryskiwaczu CASA.

2.5.2.1. CHS - rozpoznawanie zdrowotnego statusu roślin

Czujnik zdrowotności roślin CHS (*Crop Health Sensor*) opracowany został w oparciu o spektroskopową technikę identyfikacji upraw polowych (Schut, 2003). Jego zadaniem była identyfikacja stresu roślin powodowanego zaburzeniem fotosyntezy przez czynniki chorobotwórcze w bardzo wczesnych fazach infekcji. Ponieważ każdy czynnik stresotwórczy pozostawia odmienny, unikalny ślad w spektralnej charakterystyce intensywności światła odbitego od badanego obiektu skoncentrowano się na opracowaniu algorytmu identyfikacji anomalii powodowanych przez grzyby *Venturia inaequalis* i *Podosphaera leucotricha*, sprawców najgroźniejszych chorób jabłoni. Dlatego obiektem badań były choroby parch jabłoni i mączniak jabłoni, na liściach najpowszechniej uprawianych odmian: Elstar, Jonagold, Rubens, Gala oraz podkładki M9. W tym celu przeprowadzano hiperspektralne obrazowanie liści zdrowych oraz zainfekowanych w różnych okresach po inokulacji grzybów (2 h, 4 h, 8 h, 24 h, 2 dni, 14 dni i 28 dni) z wykorzystaniem hiperspektralnych kamer: ImSpector V9 w zakresie długości fali 450-900 nm, przy rozdzielczości kanałów 5 nm, oraz ImSpector N17 w spectrum 900-1650 nm z rozdzielczością 10 nm. Kryterium identyfikacji zaburzeń fotosyntezy był znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), który podlegał żmudnej i czasochłonnej obróbce statystycznej według algorytmu z wykorzystaniem sieci neuronowych. Wynikiem obliczeń prowadzonych zgodnie z tym algorytmem był indeks zdrowotności CHI (*crop health index*) określany dla każdego milimetra kwadratowego powierzchni liścia. CHI wyznaczony dla długości fali 630, 655, 730 i 770 nm (górny zakres światła widzialnego) identyfikował chorobowy stres roślin już 4 godziny po infekcji przez grzyby *V. inaequalis* i *P. leucotricha* na liściach odmiany Gala i podkładki M9 (H.5 – rys. 3). Widoczne symptomy chorób powodowanych przez te grzyby ujawniają się dopiero po 10-12 dniach, a więc na bardzo późnym etapie ich rozwoju, kiedy opanowanie chorób wymaga już stosowania bardzo intensywnej ochrony chemicznej. Chociaż holenderskim partnerom nie udało się wyjść poza fazę badań laboratoryjnych w skali pojedynczych liści i zbudować czujnika, który mógłby być zainstalowany na opryskiwaczu do identyfikacji zakażonych drzew w sadzie to opracowany algorytm identyfikacji chorób na bardzo wczesnym etapie ich rozwoju otwiera perspektywę nowej strategii precyzyjnej ochrony roślin z użyciem biologicznych stymulatorów odporności lub przynajmniej stosowaniem mniejszych ilości fungicydów mniej szkodliwych dla ludzi i środowiska.

2.5.2.2. CIS - zmienne dawkowanie środków ochrony roślin

System identyfikacji upraw CIS (*Crop Identification System*) został opracowany we współpracy z firmą COBO-3B6. Założeniem systemu było zmienne dawkowanie środków ochrony roślin w sadach wg koncepcji VRA poprzez różnicowanie ilości emitowanej cieczy użytkowej w zależności od rozmiarów i gęstości koron drzew. Działanie systemu w czasie rzeczywistym wymagało zastosowania układu identyfikacji charakterystyki obiektów o możliwie niskich wymaganiach co do mocy obliczeniowej. Możliwość takie oferują czujniki ultradźwiękowe, które wcześniej wykorzystywano jedynie do określania wielkości obiektów na podstawie pomiaru czasu między transmisją sygnału dźwiękowego a odbiorem jego echa. Wyzwaniem pozostało określenie gęstości identyfikowanych obiektów, co uzyskano poprzez opracowanie algorytmu analizy echa także w aspekcie jego intensywności (amplitudy natężenia) oraz czasu trwania (czasu zaniku). Wynikiem obliczeń wg tego algorytmu był indeks gęstości drzewa najlepiej skorelowany z liczbą warstw liści w jego koronie. Ten innowacyjny sposób identyfikacji zarówno wielkości jak i gęstości drzew testowano przy użyciu czujników ultradźwiękowych emitujących sygnał o częstotliwości 45 kHz w pakietach wysyłanych co 100 ms. Wyniki skanowania drzew przez układ czujników umieszczonych na trzech wysokościach w trakcie przejazdu w sadzie oceniane były pod kątem powtarzalności oraz dokładności pomiarów w zależności od prędkości jazdy i efektu wzajemnej interferencji czujników. Publikacje przedstawiające nową metodę identyfikacji upraw systemu CIS i pomyslnie wyniki testów (Balsari in in., 2008; Doruchowski i in., 2009) były pierwszymi w literaturze światowej doniesieniami o wykorzystaniu czujników ultradźwiękowych do określania gęstości drzew.

W systemie CIS dane uzyskiwane z czujników mierzących szerokość i gęstość koron drzew na trzech poziomach stosowane są przez system sterujący układem cieczowym do różnicowania ilości cieczy emitowanej przez rozpylacze do poszczególnych partii koron. Każdy z trzech czujników kontroluje pracę dwóch dyfuzorów strumienia powietrza, z których każdy wyposażony jest w sekcję czterech indywidualnie włączanych rozpylaczy o różnym wydatku. Dawka cieczy emitowana przez dyfuzor regulowana jest w szerokim zakresie przez włączenie odpowiedniej kombinacji rozpylaczy w sekcji za pomocą indywidualnych zaworów elektro-pneumatycznych oraz precyzyjnie dostrajana w wąskich zakresach za pomocą szybko działających, sekcyjnych zaworów regulacji ciśnienia (**H.5** - rys.1).

System CIS badano w sadach jabłoniowych w aspekcie precyzji działania, możliwości redukcji zużycia cieczy użytkowej, i proporcjonalnie środków ochrony roślin, oraz skuteczności zredukowanych dawek. Syntezą szeroko zakrojonych badań są wyniki przedstawione w publikacji **H.5** - rys. 4. Wskazują one, że w 11-letnim sadzie z drzewami o wysokości 4 m (odm. Red Chief) uzyskane przy użyciu systemu CIS oszczędności środków ochrony roślin wynosiły 45% we wczesnej fazie wzrostu i 31% w okresie dojrzewania owoców. W młodym, 2-letnim sadzie z drzewami o wysokości 2,2 m (odm. Gala) oszczędności te wynosiły odpowiednio 82 i 64%. Tak zredukowane dawki pestycydów nie miały istotnego wpływu na poziom i równomierność ich naniesienia w drzewach, a ich straty mierzone na ziemi były istotnie mniejsze niż dla standardowej techniki opryskiwania przy użyciu konwencjonalnego opryskiwacza sadowniczego z wentylatorem osiowym. Wyniki oceny skuteczności zredukowanych dawek w ochronie przed chorobami, parchem jabłoni i mączniakiem jabłoni, oraz w zwalczaniu mszycy jabłoniowej (*Aphis pomi*) były w pełni satysfakcjonujące i nie odbiegały istotnie od wyników uzyskanych przy pełnych dawkach środków stosowanych przy użyciu standardowej techniki opryskiwania.

2.5.2.3. Integracja systemów

Ze względu na szeroki zakres projektu ISAFRUIT prace rozwojowe i badania polowe opracowanych systemów prowadzono równolegle w trzech ośrodkach badawczych. Badania funkcjonalne układu EDAS przeprowadzono w Polsce i Holandii, CHS w Holandii (badania laboratoryjne), a CIS we Włoszech. Kierowanemu przeze mnie zespołowi Pracowni Techniki Ochrony i Nawożenia w Zakładzie Agrotechnologii Instytutu Ogrodnictwa przypadło w udziale koordynowanie prac nad integracją opracowanych komponentów oraz przygotowanie kompletnego opryskiwacza CASA do prezentacji na szerokim europejskim forum potencjalnych odbiorców i innych osób zainteresowanych nową technologią dla rolnictwa zrównoważonego.

Systemy EDAS i CIS zostały zintegrowane na podwoziu drugiego opryskiwacza Hardi Arrow 1500 (ILEMO HARDI - Hiszpania), przeznaczonego do ostatecznych testów i pokazów polowych. Na opryskiwaczu zainstalowano zmodyfikowany wentylator systemu EDAS, pionowe belki z dwunastoma dyfuzorami typu „rybi ogon” (po sześć dyfuzorów z każdej strony opryskiwacza), maszt z sześcioma czujnikami ultradźwiękowymi (po trzy na każdą stronę) zamontowany w przedniej części opryskiwacza, układ elektrycznych zaworów regulacyjnych i elektro-pneumatycznych zaworów odcinających sekcji opryskowych, antenę i odbiornik sygnałów GPS, odbiornik sygnałów korekcyjnych ze stacji referencyjnej, odbiornik sygnałów z anemometru, komputer HMI z oprogramowaniem oraz osobne dla EDAS i CIS jednostki CPU skomunikowane z magistralą CAN. Współpraca obu systemów pozwala na precyzyjne dawkowanie środków ochrony roślin w zależności od charakterystyki drzew (zgodnie z opisem w rozdziale 2.5.2.2) z jednoczesną realizacją niskoznoszeniowych scenariuszy zabiegu w zależności od prędkości wiatru i położenia opryskiwacza względem obiektów wrażliwych, granicy sadu lub uwroci (zgodnie z opisem w rozdziale 2.5.1.4).

Jednym z celów projektu ISAFRUIT było upowszechnienie uzyskanych wyników prac badawczo-rozwojowych, obejmujące demonstrację prototypu opryskiwacza CASA, prezentującego innowacyjną technologię precyzyjnej ochrony roślin dla rolnictwa zrównoważonego. W ramach tych działań zorganizowano pokazy pracy opryskiwacza CASA na specjalnie wykonanych, zróżnicowanych modelach drzew w otoczeniu symulowanych obiektów wrażliwych, według specjalnie opracowanego scenariusza, który umożliwił pokazanie wszystkich jego funkcji i możliwości. Demonstracje przeprowadzono latem i jesienią 2009 roku w siedmiu najważniejszych regionach sadowniczych w UE: Aarslev, Dania (9 czerwca), San Michelle, Włochy (9 lipca), Randwijk, Holandia (14 sierpnia i 1 października), Jork, Niemcy (26 sierpnia), Lanxade, Francja (10 września), Skierniewice, Polska (14 października) oraz Castell del Remei, Hiszpania (28 października). W pokazach udział wzięli naukowcy, sadownicy, doradcy z zakresu ochrony roślin oraz przedstawiciele przemysłu, lokalnych władz i mediów, w łącznej liczbie 1750 osób.

Materiał filmowy z pokazu opryskiwacza CASA w San Michelle dostępny jest w internetowych zasobach YouTube pod adresem: <https://www.youtube.com/watch?v=FFD0znlba50>

2.5.3. Biologiczna skuteczność niskoznoszeniowych zabiegów grubokroplistych

Z badań opisanych w publikacji H.5 oraz z doniesienia Wennekera i in. (2012) wynika, że niskoznoszeniowe scenariusze zabiegów ochrony roślin, polegające na jednostronnej redukcji lub eliminacji strumienia powietrza podczas opryskiwania zewnętrznych rzędów sadu mają największy potencjał redukcji znoszenia jeśli ich stosowanie związane jest z użyciem rozpylaczy grubokroplistych (patrz rozdział 2.5.1.4). Wdrożenie do praktyki sadowniczej tych korzystnych dla środowiska naturalnego scenariuszy wymaga dostarczenia naukowych dowodów na to, że użycie grubych kropeł nie ma negatywnego wpływu na biologiczną skuteczność środków ochrony roślin. Efekt środowiskowy w postaci redukcji ich znoszenia nie może być osiągnięty kosztem pogorszenia ich działania i w końcowym efekcie kosztem jakości owoców. Byłoby to zaprzeczeniem idei integrowanej ochrony roślin i rolnictwa zrównoważonego. Zagadnieniu temu poświęcono czteroletnie badania skutecznościowe, opisane w publikacji H.6.

Szczegółowym celem badań była ocena skuteczności ochrony jabłoni przed chorobami i efektywności zwalczania szkodników jabłoni przy użyciu dwóch kontrastowo różnych wielkości kropeł oraz trzech dawek cieczy użytkowej. Hipoteza badawcza zakładała, że stosowanie nowoczesnych środków ochrony roślin, w przeważającej liczbie działających kontaktowo, przy użyciu grubokroplistych rozpylaczy eżektorowych o udokumentowanym potencjale redukcji znoszenia pozwala na uzyskanie zadowalającej skuteczności ochrony jabłoni przed chorobami i szkodnikami. Do postawienia takiej hipotezy skłoniły mnie publikowane, obiecujące wyniki badań (Heinkel i in., 2000; Knewitz i in., 2002; Friessleben, 2003; Leśnik i in., 2005).

Własne badania przeprowadzono w latach 2010-2013 w Sadzie Pomologicznym Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach na dziesięcioletnich jabłoniach odmiany Jonagold/M26, o wysokości 3,0 m i szerokości koron 1,8 m, sadzonych w rzędach o rozstawie 4 m. Wskaźnik TRV (*tree row volume*) określający objętość koron drzew dla potrzeb wyznaczania racjonalnej dawki cieczy wynosił 13 500 m³ha⁻¹. Eksperymentalna kwatery sadu podzielona była na dwa bloki stanowiące powtórzenia. W każdym bloku rozmieszczono losowo sześć poletek, na których przeprowadzano zabiegi według kombinacji dwóch wielkości kropeł i trzech dawek cieczy (H.6 – Tabela 1), oraz dodatkowo nie opryskiwane poletko kontrolne. Kombinacje drobnokropliste (VMD = 152-158 μm) realizowano przy użyciu standardowych rozpylaczy wirowych TR80, a kombinacje grubokropliste (VMD = 371-386 μm) za pomocą eżektorowych rozpylaczy płaskostrumieniowych ID90 (w obu przypadkach LECHLER, Niemcy). Zabiegi przy użyciu tych rozpylaczy przeprowadzono w dawkach cieczy 250, 500 i 750 l ha⁻¹, przy czym dawka 500 l ha⁻¹ była właściwa dla wskaźnika TRV sadu.

Zabiegi opryskiwania przeprowadzono zgodnie z sygnalizacją zagrożeń infekcji przez patogeny i po przekroczeniu progów szkodliwości dla szkodników (H.6 – Tabela 2). Przedmiotem obserwacji były choroby: parch jabłoni (*Venturia inaequalis*), mączniak jabłoni (*Podosphaera leucotricha*) i gorka zgnilizna jabłek (*Pezicula spp.*), oraz szkodniki: mszyca jabłoniowa (*Aphis pomi*), mszyca jabłoniowo-babkowa (*Dysaphis plantaginea* Pass.), pordzewiacz jabłoniowy (*Aculus schlechtendali*), kwiecień jabłkowiec (*Anthonomus pomorum* L.) i bawełnica korówka (*Eriosoma lanigerum*). Ocenę skuteczności ochrony jabłoni przed chorobami i efektywności zwalczania szkodników przeprowadzono we współpracy z Zakładem Ochrony Roślin Sadowniczych Instytutu Ogrodnictwa według standardowych metodyk.

Wyniki czteroletnich badań potwierdziły słuszność hipotezy badawczej niemal w całej rozciągłości. W przypadku dawki cieczy 500 l ha⁻¹ ochrona przed parchem jabłoni była statystycznie równie skuteczna dla zabiegów drobnokroplistych jak i grubokroplistych (H.6 – Tabela 4). Zwiększenie tej dawki o 50%, do 750 l ha⁻¹ i tym samym zmniejszenie stężenia fungicydu w cieczy użytkowej w roku 2010, o wyjątkowo wysokiej presji infekcyjnej (29 silnych

infekcji), jak również zredukowanie dawki o 50%, do 250 l ha⁻¹, pociągające za sobą zmniejszenie stopnia pokrycia powierzchni przez ciecz w roku 2012, o bardzo niskiej presji patogena, spowodowało istotne zwiększenie udziału owoców porażonych przez chorobę.

Przekropany rok 2010 sprzyjał także ponadprzeciętnemu rozwojowi mączniaka jabłoni i dlatego w tym trudnym sezonie skuteczność grubych kropel w ochronie przed chorobą ustąpiła kroplom drobnym (H.6 – Tabela 5). W pozostałych latach, mniej lub bardziej zróżnicowanych pod względem presji infekcyjnej nie stwierdzono istotnych różnic między rozpylaczami w udziale zainfekowanych przez chorobę pędów jabłoni.

Gorzka zgnilizna jabłek obserwowana była tylko w roku 2012. Ocena rozwoju choroby na jabłkach po ponad sześciu miesiącach przechowywania w kontrolowanej atmosferze nie wykazała różnic między rozpylaczami w udziale porażonych owoców (H.6 – Tabela 7).

Zwalczanie mszycy jabłoniowej i mszycy jabłoniowo-babkowej oraz porzewiacza jabłoniowego i kwieciaka jabłkowca było statystycznie równie skuteczne przy użyciu obu rodzajów rozpylaczy (H.6 – Tabele 6 i 7). W większości ocen skuteczność grubych kropel była nawet wyższa niż kropel drobnych choć tylko w dwóch przypadkach, dotyczących mszycy jabłoniowo-babkowej i kwieciaka jabłkowca zwalczanych zwiększoną dawką cieczy 750 l ha⁻¹, przewaga grubych kropel okazała się statystycznie istotna.

Odmienne na wielkość kropel reagowała natomiast bawełnica korówka (H.6 – Tabela 7). Choć dla żadnej dawki cieczy nie stwierdzono istotnych różnic między rozpylaczami w skuteczności zwalczania szkodnika to uwidoczniła się tendencja lepszej skuteczności kropel drobnych. Warto przy tym zauważyć, że efektywność zwalczania bawełnicy dla dawek cieczy 250 i 500 l ha⁻¹ była bardzo niska, i osiągnęła zadowalający poziom dopiero po zastosowaniu insektycydu w dawce cieczy 750 l ha⁻¹. Wynika to z natury owada, który żerując na pędach i korze drzew otacza się watowatym nalotem trudnym do przeniknięcia przez krople cieczy. Wysoka jej dawka, pozwalająca na przekroczenie granicy zlewności kropel powoduje spływanie cieczy po pędach podwyższając tym samym prawdopodobieństwo dotarcia do szkodnika.

Na podstawie uzyskanych wyników można z dużym przekonaniem zalecać stosowanie w sadach rozpylaczy grubokroplistych które stanowią korzystną dla środowiska alternatywę w stosunku do standardowych rozpylaczy wirowych. Jedynym przeciwskazaniem dla rozpylaczy grubokroplistych może być wyjątkowo wysoka presja infekcyjna patogenów. W takim przypadku zastosowanie standardowych rozpylaczy drobnokroplistych, powodujących bardzo dobre pokrycie powierzchni przez środki działające kontaktowo, może przynieść lepsze efekty biologiczne. Dotyczy to jednak tylko sprzyjających warunków pogodowych podczas wykonywania zabiegów ponieważ podczas wietrznej pogody, gdy wiatr osiąga prędkość 3-4 m s⁻¹ straty cieczy w wyniku znoszenia drobnych kropel mogą być na tyle duże, że rozpylacze grubokropliste mogą mimo wszystko okazać się bardziej skuteczne.

2.6. Miejsce i innowacyjność osiągnięcia na tle współczesnych rozwiązań

Monograficzna publikacja H.7 miała na celu przegląd osiągnięć i innowacji w technice ochrony upraw sadowniczych u progu drugiej dekady XXI wieku z uwzględnieniem osiągnięcia, które jest przedmiotem mojej rozprawy habilitacyjnej. Nakreślony w niej kontekst współczesnych rozwiązań technicznych w tym obszarze pozwolił na określenie miejsca i stopnia innowacyjności systemu EDAS, działającego na opryskiwaczu CASA.

Innowacja jest procesem twórczym polegającym na realizacji nowych idei w oparciu o istniejące możliwości i przenoszeniu tych idei na grunt praktyczny. Jej efektem jest nowy lub istotnie ulepszony produkt, zastosowanie nowej technologii lub unowocześnienie systemu

organizacyjnego. Kryteria oceny innowacyjności jakiegoś osiągnięcia należy wywodzić z jej definicji, w której najistotniejsze są dwa aspekty: istotność pomysłu oraz możliwość jego praktycznego zastosowania. Miernikiem istotności pomysłu jest zazwyczaj stopień spełnienia oczekiwań odbiorców, choć w przypadku innowacji powinien nim być stopień ich wyprzedzenia. Koncepcja systemu EDAS, oraz szerzej koncepcja opryskiwacza CASA, którego system EDAS jest komponentem, w istotnej mierze wyprzedza obecne oczekiwania producentów i użytkowników sprzętu ochrony roślin koncentrujące się przeważnie na doraźnych korzyściach, takich jak wydajność, skuteczność, trwałość oraz wygoda i bezpieczeństwo obsługi. Nie wyręczając producentów opryskiwaczy, którzy w przeważającej liczbie skupiają swoje wysiłki na realizacji bieżących oczekiwań ich użytkowników w swojej pracy badawczo-rozwojowej miałem na uwadze długofalowe korzyści odbiorców płynące ze spełnienia wymagań rolnictwa zrównoważonego. Wartość mojego osiągnięcia polega na stworzeniu nowatorskiego w skali światowej produktu, który wyznacza nowe kierunki rozwoju precyzyjnych opryskiwaczy sadowniczych i wykazaniu potencjalnych efektów jego zastosowania. Kluczowe efekty opisanych prac to udokumentowane naukowo oszczędności w zużyciu środków ochrony roślin w wyniku ich precyzyjnego stosowania, oraz minimalizacja negatywnego wpływu zabiegów ochrony roślin na środowisko poprzez istotną redukcję znoszenia cieczy użytkowej podczas opryskiwania sadów. W dłuższej, dającej się przewidzieć perspektywie, efekty te staną się podstawowym przedmiotem oczekiwań odbiorców ponieważ przełożą się na bezpośrednie korzyści dla sadowników, od których wymagać się będzie wysokiej jakości produktów z zerowym poziomem pozostałości środków ochrony roślin oraz bezemisyjnych metod ochrony sadów. Niespełnienie tych wymagań prowadzi do obniżenia konkurencyjności producentów owoców i w konsekwencji ich eliminację z rynku. Aspekt środowiskowy chemicznej ochrony roślin już obecnie dotyka interesów sadowników. Tradycyjne techniki opryskiwania, wymagające ręcznego sterowania opryskiwaczem stwarzają duże pole dla licznych błędów rodząc tym samym wysokie ryzyko zanieczyszczenia gleby i wody oraz wyniszczenia organizmów pożytecznych, w tym pszczół. Efektem tego jest fatalny wizerunek chemicznej ochrony roślin i idące za nim restrykcyjne decyzje administracyjne, ograniczające dostęp producentów rolnych do środków ochrony roślin. Racjonalnym i świadomym przeciwdziałaniem dla takich decyzji jest stosowanie nowatorskich technik ochrony, w tym zwłaszcza z zakresu rolnictwa precyzyjnego, które w najwyższym stopniu ograniczają ryzyko dla środowiska. Koncepcja systemu EDAS w ramach opryskiwacza CASA wyznacza trendy rozwojowe dla sadowniczych opryskiwaczy wentylatorowych, gdyż wyprzedza obecne oczekiwania producentów owoców. Można oczekiwać, że w nadchodzącym dziesięcioleciu opracowane w ramach opisanych powyżej badań koncepcje i propozycje rozwiązań technicznych znajdą komercyjnie zastosowanie.

Nieodzownym warunkiem innowacji jest praktyczność, a więc możliwość wdrożenia nowopowstałych rozwiązań. W toku prac nad systemem EDAS i opryskiwaczem CASA koncentrowano się zatem na zastosowaniu lub doskonaleniu istniejących i komercyjnie dostępnych lecz wciąż zaawansowanych technologii mając na uwadze możliwość ich wdrożenia do praktyki. Jednocześnie zadbano o to by zastosowane podzespoły takie jak komputer, nawigacja satelitarna i czujniki ultradźwiękowe reprezentowały najwyższy poziom technologiczny w swojej klasie.

Mózg systemu EDAS, tzn. komputer przemysłowy typu HMI posiada interfejs użytkownika w postaci ekranu dotykowego LCD umożliwiający łatwą komunikację i czytelną wizualizację obsługiwanych procesów. Opracowane oprogramowanie wiąże funkcje nawigacyjne opryskiwacza z możliwościami programowania zadań i monitorowania przebiegu

regulacji modułów wykonawczych. W tym zakresie moduł sterowania spełnia wszystkie wymagania stawiane tego typu urządzeniom stosowanym w rolnictwie precyzyjnym. Różnicowy system nawigacji DGPS z wykorzystaniem własnej naziemnej stacji referencyjnej zapewnia pozycjonowanie opryskiwacza z precyzją submetrową, a więc taką samą jaką oferują abonamentowe, dwukanałowe różnicowe systemy satelitarne typu Omni-STAR-HP czy StarFire-2.

Układ identyfikacji charakterystyki drzew opryskiwacza CASA, w którym wykorzystano czujniki ultradźwiękowe dzięki prostocie działania i małym wymaganiom co do mocy obliczeniowej modułu sterowania umożliwiają pracę systemu CIS w czasie rzeczywistym. Udoskonalony algorytm interpretacji sygnałów z czujników ultradźwiękowych pozwolił na rozszerzenie ich możliwości o rozpoznawanie nie tylko wielkości lecz także gęstości koron drzew, co pozostaje unikalnym rozwiązaniem o pionierskim charakterze. Z powodu ograniczeń laserowych systemów identyfikacji obiektów typu LIDAR tym samym tropem poszli inni badacze publikujący w ostatnim okresie wyniki swoich prac nad wykorzystaniem czujników ultradźwiękowych (Stajenko i in., 2012; Palleja i Landers, 2015; Li i in., 2017; Palleja i Landers, 2017).

Podobnie unikalnym rozwiązaniem jest system EDAS z niezależną i asymetryczną regulacją strumienia powietrza za pomocą przepustnic zainstalowanych na wlocie o wylocie standardowego wentylatora promieniowego i automatyzacją tej regulacji w czasie rzeczywistym w powiązaniu z nawigacją opryskiwacza oraz aktualną prędkością i kierunkiem wiatru. Oryginalność tego rozwiązania została potwierdzona patentem. Jak dotąd w światowej literaturze naukowej brak jest doniesień o podobnych systemach niezależnej regulacji strumienia powietrza. Tymczasem wybrane elementy systemu EDAS można obecnie znaleźć w opryskiwaczach oferowanych przez takich producentów jak KWH (Holandia), FAVARO (Włochy) czy RICOSMA (Włochy).

Wyniki laboratoryjnych prac nad rozpoznawaniem zdrowotnego statusu roślin na podstawie hiperspektralnych zobrażeń liści jest dobrym punktem wyjścia do dalszych prac nad systemem CHS. Bezsporne osiągnięcie zespołu badawczego z WUR Wageningen na polega na opracowaniu nowatorskiej metody identyfikacji infekcji wybranych patogenów na liściach wybranych odmian jabłoni. Tym samym stworzono podstawę do opracowania czujnika, który mógłby rozpoznawać porażone drzewa w sadzie w najwcześniejszym stadium infekcji.

Inteligentny opryskiwacz CASA realizujący założenia precyzyjnej ochrony roślin powstał w wyniku powiązania działających samodzielnie systemów CIS i EDAS z klasycznym opryskiwaczem sadowniczym. Tak stworzony doświadczalny model opryskiwacza na etapie gotowości technologicznej TRL 5 poddano testom funkcjonalnym i badaniom efektów w środowisku operacyjnym, tzn. w warunkach sadowniczej produkcji towarowej w Polsce, Holandii i we Włoszech. Po modyfikacjach cechy użytkowe prototypu opryskiwacza zaprezentowano podczas demonstracji w siedmiu krajach europejskich. W ten sposób opryskiwacz CASA z systemem EDAS osiągnął poziom TRL 7 potwierdzając możliwość praktycznego zastosowania i tym samym spełniając ostatecznie kryterium innowacyjności.

2.7. Podsumowanie wyników w odniesieniu do celów naukowych

Nadrzędny cel prac badawczych polegający na doskonaleniu technologii dla rolnictwa zrównoważonego w zakresie stosowania środków ochrony roślin może być zrealizowany poprzez opracowanie opryskiwaczy wykorzystujących elementy i narzędzia rolnictwa precyzyjnego (H.1). Precyzyjne stosowanie środków ochrony roślin jest gwarantem ich racjonalnego wykorzystania, a więc spełnienia wymagań stawianych przez integrowaną ochronę roślin, która jest obowiązującym standardem produkcji rolniczej w krajach członkowskich Unii Europejskiej. Stworzenie modelu precyzyjnego opryskiwacza sadowniczego CASA i dostarczenie przesłanek pozwalających na wdrożenia go do praktyki sadowniczej wymagało realizacji szczegółowych celów naukowych

Cel 1. Opracowanie dla opryskiwaczy sadowniczych innowacyjnych rozwiązań technicznych do precyzyjnej ochrony roślin zgodnie z wymaganiami integrowanej ochrony roślin.

W toku kierowanych przeze mnie prac badawczo rozwojowych opracowano koncepcje i stworzono model opryskiwacza sadowniczego z innowacyjnym w skali światowej system precyzyjnej ochrony sadów (EDAS) (H.2). W skład systemu wchodzi układ asymetrycznej regulacji strumienia powietrza i wielkości kropeł, układ automatycznego sterowania pracą wentylatora i sekcji rozpylających z dedykowanym oprogramowaniem oraz układ monitorowania okoliczności zabiegu z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej i anemometru ultradźwiękowego. Potwierdzona patentami (H.3; H.4) oryginalność rozwiązania polega na możliwości automatycznej regulacji ilości zasysanego powietrza na wlocie wentylatora promieniowego (przepustnica wielosegmentowa) i dystrybucji powietrza na jego wylocie (przepustnica płytowa), oraz automatycznym doborze wielkości kropeł wytwarzanych przez sekcje rozpylające (rozpylacze drobnokropliste lub grubokropliste). Regulacje te przeprowadzane są w czasie rzeczywistym w zależności od chwilowych i lokalnych okoliczności zabiegu, czyli kierunku i prędkości wiatru oraz położenia opryskiwacza względem newralgicznych z ekologicznego punktu widzenia obiektów. Monitorowane okoliczności zabiegu określają ryzyko zanieczyszczenia obiektów wrażliwych (np. wód powierzchniowych, pasiek, obszarów nieużytkowanych rolniczo), które jest podstawą do automatycznej regulacji wspomnianych zespołów opryskiwacza i tym samym przestawieniu ich na niskoznoszeniowy tryb pracy. Pozwala to na realizację przez opryskiwacz niskoznoszeniowych scenariuszy zabiegów w sposób precyzyjny i zautomatyzowany, zgodnie z założeniami integrowanej ochrony roślin o minimalizacji ryzyka zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

W ramach koordynowanych przeze mnie prac międzynarodowego projektu badawczego opracowano także przy moim udziale unikalny w skali światowej system wczesnej identyfikacji infekcji jabłoni przez grzyby chorobotwórcze (CHS) oraz innowacyjny system identyfikacji wielkości i gęstości koron drzew, sterujący układem zróżnicowanego dawkowania środków ochrony roślin w czasie rzeczywistym (CIS) (H.5). Powstałe rozwiązania pozwalają na daleko idące oszczędności środków ochrony roślin realizując podstawową ideę integrowanej ochrony roślin, postulującą ograniczenie stosowania metod chemicznych.

Cel 2. Ocena efektów działania opracowanych rozwiązań w badaniach stanowiskowych i polowych.

Stanowiskowe badania układu regulacji wentylatora systemu EDAS (H.2; H.5) wykazały unikalną w skali światowej właściwość asymetrycznej regulacji prędkości strumienia powietrza, tzn. niezależnie na prawej i lewej sekcji opryskiwacza. Pomiar rozkładu prędkości powietrza przy różnych kombinacjach położenia przepustnicy wielosegmentowej na wlocie wentylatora i przepustnicy płytowej na jego wylocie pokazał możliwość jednostronnej, płynnej

regulacji prędkości strumienia powietrza od wartości maksymalnej do całkowitego jego odjęcia na każdej stronie opryskiwacza. Pozwala to na kompensowanie bocznych podmuchów wiatru i zagwarantowanie równomiernej penetracji drzew po nawietrznej i zawietrznej stronie wentylatora. Ponadto, w połączeniu z automatyczną zamianą rozpylaczy drobnokroplistych na grubokropliste system EDAS umożliwia realizację różnorakich, ustalanych przez operatora scenariuszy niskoznoszeniowych w sytuacjach podwyższonego ryzyka zanieczyszczenia obszarów wrażliwych, np. gdy opryskiwacz zbliża się do granicy sadu, robi nawrót na końcach rzędów drzew lub przejeżdża w pobliżu obiektów wrażliwych. Badania polowe wykazały, że scenariusze te ograniczają znoszenie środków ochrony roślin o ponad 80% w porównaniu z zabiegami przeprowadzanymi konwencjonalnie, lub nawet o 95% w stosunku do standardowych opryskiwaczy deflektorowych.

System CIS (**H.5**) do zróżnicowanego dawkowania środków ochrony roślin w zależności od charakterystyki drzew badany był w sadach jabłoniowych. Uzyskane oszczędności środków ochrony roślin w 11-letnim sadzie z drzewami o wysokości 4 m wynosiły od 45% we wczesnej fazie wzrostu do 31% w okresie dojrzewania owoców. W młodym, 2-letnim sadzie z drzewami o wysokości 2,2 m oszczędności te wynosiły odpowiednio 82 i 64%. Na podkreślenie zasługuje fakt, że uzyskana w ten sposób istotna redukcja dawek środków ochrony roślin nie wpłynęła istotnie na obniżenie skuteczności zwalczania szkodników i ochrony przed chorobami.

Efekty uzyskiwane przez opracowane systemy EDAS i CIS przynoszą udokumentowane korzyści ekologiczne i ekonomiczne stając się atrakcyjną propozycją praktycznych rozwiązań technologicznych dla integrowanej ochrony sadów.

Cel 3. Weryfikacja skuteczności biologicznej niskoznoszeniowej techniki ochrony, będącej elementem precyzyjnej ochrony roślin.

W toku badań polowych porównywano tradycyjnie stosowane rozpylacze drobnokropliste i wykorzystywane w scenariuszach niskoznoszeniowych rozpylacze grubokropliste w aspekcie skuteczności zwalczania szkodników i ochrony jabłoni przed chorobami (**H.6**). Doniesienia literatury światowej uzasadniały hipotezę o równorzędnej skuteczności obu rodzajów rozpylaczy wytwarzających krople o kontrastowo różnej wielkości. Wyniki czteroletnich badań prowadzonych na przestrzeni sezonów o różnym nasileniu agrofagów, w których obserwacji poddano najważniejsze choroby (parch jabłoni, mączniak jabłoni, gorzka zgnilizna jabłek) i szkodniki (mszyca jabłoniowa, mszyca jabłoniowo-babkowa, pordzewiacz jabłoniowy, kwiecień jabłkowiec, bawełnica korówka) należy uznać za w pełni reprezentatywne i wiarygodne. Potwierdziły one postawioną hipotezę nie wykazując istotnych różnic między kroplami drobnymi i grubymi w skuteczności ochrony jabłoni. Niskoznoszeniowe zabiegi przeprowadzane z użyciem rozpylaczy grubokroplistych zweryfikowały się pozytywnie w aspekcie skuteczności biologicznej i z przekonaniem mogą być zalecane do stosowania w praktyce sadowniczej.

Nowatorska koncepcja precyzyjnego opryskiwacza sadowniczego CASA wyznacza kierunki rozwoju techniki ochrony sadów i wyprzedza oczekiwania użytkowników sprzętu ochrony roślin (**H.7**). Model opryskiwacza, wykonany na bazie zaawansowanych technologicznie i dostępnych komercyjnie komponentów został przebadany w środowisku operacyjnym potwierdzając swoją gotowość do zastosowania w praktyce sadowniczej. Tym samym spełnił on kryteria istotnej innowacji technologicznej, którą poczytuję sobie za osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

2.8. Bibliografia

- Andersson, U. 2013. Laser Navigation System for Automatic Guided Vehicles. From Research Prototype to Commercial Product. Research Report. Luleå University of Technology, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Division of Systems and Interaction, ISBN 978-91-7439-814-4.
- Balsari P., Doruchowski G., Marucco P., Tamagnone M., van de Zande J.C., Wenneker M. 2008. A system for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agricultural Engineering International, CIGR E-journal*, X, ISSN 1682-1130:1–11.
<http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1237/1095>
- Behmann, J., Steinrücken, J., Plümer, L. 2014. Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93: 98–111.
- Benson, E., Reid, J., Zhang, Q. 2003. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection, *Biosystems Engineering*, 86:389-398.
- Bertschinger, L., Baur, R., Carlen, C., Doruchowski, G. 2009. Sustainability of Horticulture in Europe (Environmental, Social, Economic): Examples from the Pre- and the Post-Harvest Food Chain. *Acta Horticulturae* 817 (Edited by: Dixon, G.R.): 187-194.
- Billingsley, J., Schoenfisch, M. 1997. The successful development of a vision guidance system for agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 16:147-163.
- Doruchowski, G., Hołownicki, R., Godyn, A. 1996a. Deposit and loss of spray in orchard as affected by spray discharge system and air jet setting. *Acta Horticulturae* 422: 383-384. DOI: 10.17660/ActaHortic.1996.422.90
- Doruchowski, G., Hołownicki, R., Godyn, A. 1996b. Air-jet setting effect on spray deposition within apple tree canopy and loss of spray in orchard. *International Conference on Agricultural Engineering AngEng 96, Madrid, Spain, 23-26.08.1996. Proc.:* 285-286.
- Doruchowski G., Hołownicki R., Jaeken P. 1998a. Oszczędne stosowanie środków chemicznych w sadach przy użyciu opryskiwaczy z optycznym systemem identyfikacji obiektów. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCCIV, Ogrodnictwo*, 27:87-94.
- Doruchowski, G., Jaeken, P., Hołownicki, R. 1998b. Target detection as tool of selective spray application on trees and weeds in orchards. *Conference on Precision Agriculture and Biological Quality, Boston (MA), USA, 03-04.11.1998. Proceedings of SPIE, Vol. 3543 (Ed.: Meyer, G.E., DeShazer, J.A.):* 290-301.
- Doruchowski, G., Balsari, P., Van de Zande, J. 2009. Development of a Crop Adapted Spray Application System for sustainable plant protection in fruit growing. *Acta Horticulturae*, 824: 251-260. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.824.29,
- Doruchowski, G., Świechowski, W., Godyn, A., Hołownicki, R. 2009. Spray deposit in apple canopies as affected by low-drift application strategies with Environmentally Dependent Application System. *SuproFruit 2009 – 10th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing, September 30 – October 2, 2009, Wageningen, The Netherlands, Ed.: M. Wenneker, J.C. van de Zande, ISBN: 978-90-8585-482-1: 25-27.* <http://edepot.wur.nl/132891>
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania na rzecz zrównoważonego stosowania pestycydów. *Dz.Urz.UE, L 309/71, 24.11.2009.*
- Escolà, A., Planas, S., Rosell, J.R., Pomar, J., Camp, F., Solanelles, F., Gràcia, F., Llorens, J., Gil, E. 2011. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. *Sensors*, 11: 2459–2477.
- Friessleben, R., 2003. Influence of coarse droplet application via injector nozzles on the biological efficacy in apple production. *Proceedings of the 7th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing. Cuneo, Italy, 109–119.*
- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J.R., Planas, S., Val, L. 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26: 1287–1297.

- Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, J.R., Gallart, M., Escolà, A. 2014. Advanced Technologies for the Improvement of Spray Application Techniques in Spanish Viticulture: An Overview. *Sensors*, 14: 691-708.
- Harper, N., McKerrow, P. 2001. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation, *Robotics and autonomous systems*, 34: 71-82.
- Heinkel, R., Fried, A., Lange, E., 2000. The effect of air injector nozzles on crop penetration and biological performance of fruit sprayers. *Aspects Appl. Biol.*, 57, 301–307.
- Hočevar, M., Širok, B., Jejčič, V., Godeša, T., Lešnik, M., Stajko, D. 2010. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117 (2): 71–79, ISSN 1861-3829. <https://doi.org/10.1007/BF03356338>
- Hołownicki R., Doruchowski G., Jaeken P. 1998. Oszczędne techniki ochrony sadów. *Inżynieria Rolnicza*, 5(6): 178-185.
- Hołownicki R., Doruchowski G., Godyń A., Świechowski W. 2000a. Effects of air jet adjustment on spray loss in orchard. *Aspects of Applied Biology* 57: 293-300.
- Hołownicki R., Doruchowski G., Godyń A., Świechowski W. 2000b. Variation of spray deposit and loss with Air-jet directions applied in orchards. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77 (2): 129-136.
- Hołownicki, R., Doruchowski, G., Świechowski, W., Godyń, A. 2004. Automatic self adjusting air-jet sprayer concept for fruit trees. *Annual Review of Agricultural Engineering* 3(1)/2004, ISSN 1429-303X : 5 -13.
- Hyyppä, K. 1994. Design considerations in a laser navigation system for mobile robots. *Mechatronics*, 4(2): 199-206. [https://doi.org/10.1016/0957-4158\(94\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0957-4158(94)90043-4)
- Iida, M., Burks, T. 2002. Ultrasonic sensor development for automatic steering control of orchard tractor, *Proceedings of the Automation Technology for Off-Road Equipment Chicago, Illinois*, p. 221-229.
- Jeon, H.Y., Zhu, H., Derksen, R., Ozkan, E., Krause, C. 2011. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75: 213–221.
- Knewitz, H., Weisser, P., Koch, H., 2002. Drift-reducing spray application in orchard and biological efficacy of pesticides. *International advances in pesticide application. Aspects Appl. Biol.*, 66, 231–236.
- Koch, H., Weisser, P. 2000. Sensor equipped orchard spraying - Efficacy, savings and drift reduction. *Aspects of Applied Biology*, 57: 357-362.
- Kukuła, S., Krasowicz, S. 2001. Główne problemy i uwarunkowania rozwoju zrównoważonego rolnictwa w Polsce. *Probl. Inż. Rol.* 1(55): 5–15.
- Lešnik, M., Pintar, C., Lobnik, A., Kolar, M., 2005. Comparison of the effectiveness of standard and drift-reducing nozzles for control of some pests of apple. *Crop Prot.*, 24, 93–100.
- Li, H., Zhai, C., Weckler, P., Wang, N., Yang, S., Zhang, B. 2017. A Canopy Density Model for Planar Orchard Target Detection Based on Ultrasonic Sensors. *Sensors*, 17: 31.
- Llorens Calveras, J., Landers, A., Larzelere, W. 2013. Precision Application of Pesticides in Orchards – Adjusting Liquid Flow. *New York Fruit Quarterly*, 21(4): 7-10.
- Lowe, A., Harrison, N., French, A.P. 2017. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods*, 13:80. DOI: 10.1186/s13007-017-0233-z.
- M.P. 2013. Obwieszczenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 6 maja 2013 r. w sprawie krajowego planu działania na rzecz ograniczenia ryzyka związanego ze stosowaniem środków ochrony roślin. *Monitor Polski* 2013, poz. 536.
- Nemecek T., Dubois D., Huguenin-Elie O., Gaillard G. 2011. Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, 104(3): 217-232.
- Okamoto, H., Hamada, K., Kataoka, T., Terawaki, M. & Hata, S. 2002. Automatic guidance system with crop row sensor, *Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment, Chicago, USA*, p. 307-316.

- Palleja, T., Landers, A.J., 2015. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155: 108–117.
- Palleja, T., Landers, A.J. 2017. Real time canopy density validation using ultrasonic envelope signals and point quadrat analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, **134** (Supplement C):43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.012>
- Rosell, J.R., Sanz, R. 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81: 124–141.
- Rovira-Más, F., Reid, J., Zhang, Q. 2006. Stereovision data processing with 3D density maps for agricultural vehicles. *Transactions of the ASABE*, 49(4):1213-1222.
- Rumpf, T., Mahlein, A.-K., Steiner, U., Oerke, E.-C., Dehne, H.-W., Plümer, L. 2010. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74: 91–99.
- Schut, A. G. T. 2003. Imaging spectroscopy for characterization of grass swards. PhD Thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands: 264 str.
- Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J.R., Camp, F., Gràcia, F. 2006. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering*, 95: 473–481.
- Stajanko, D., Berk, P., Lešnik, M., Jejčič, V., Lakota, M., Štrancar, A., Hočevar, M., Rakun, J. 2012. Programmable Ultrasonic Sensing System for Targeted Spraying in Orchards. *Sensors*, 12: 15500-15519.
- Śmieszek, M., Dobrzańska, M., Dobrzański, P. 2015. Laser navigation applications for automated guided vehicles. *Measurement Automation Monitoring*, 61(11): 503-506.
- Tyburski W. 2011. *Zasady kształtowania postaw sprzyjających wdrażaniu zrównoważonego rozwoju*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, Toruń.
- Walklate, P.J., Cross, J.V, Richardson, G.M., Murray, R.A., Baker, D.E. 2002. IT—Information Technology and the Human Interface: Comparison of Different Spray Volume Deposition Models Using LIDAR Measurements of Apple Orchards. *Biosystems Engineering*, 82(3): 253-267.
- Weiss, U., Biber, P. 2011. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor, *Robotics and autonomous systems*, 59: 265-273.
- Wenneker, M., Nieuwenhuizen, A.T., Van De Zande, J.C., Balsari, P., Doruchowski, G, Marucco, P. 2012. Advanced drift reduction in orchard spraying. *Aspects of Applied Biology* 114, Ed. P.G. Anderson i in., ISSN 0265-1491, AAB, Warwick, UK, 2012: 421-427.
- Zadrozniak, M. 2015. Jakość życia w kontekście koncepcji zrównoważonego rozwoju. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Oeconomica* 2 (313): 21-36.
- Zhang, Zhi., Wang, X., Lai, Q., Zhang, Zha. 2018. Review of Variable-Rate Sprayer Applications Based on Real-Time Sensor Technologies. Chapter 4 in: *Automation in Agriculture - Securing Food Supplies for Future Generations*, (Ed. Prof. Dr.-Ing. Stephan Hussmann), InTech, ISBN 978-953-51-3873-0. DOI: 10.5772/intechopen.73622. (<https://mts.intechopen.com/books/automation-in-agriculture-securing-food-supplies-for-future-generations/review-of-variable-rate-sprayer-applications-based-on-real-time-sensor-technologies>)

3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

W rozdziale opisującym pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze odwołuję się za pomocą odnośników wyróżnionych pogrubioną czcionką do projektów badawczych oraz wynikających z ich realizacji publikacji, patentów i innych form prezentacji mojego dorobku, wyszczególnionych w Załączniku 3 - *Wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki*.

3.1. Działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora nauk rolniczych

W latach 1978-1983 studiowałem na Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego – Akademii Rolniczej w Warszawie. Jako stypendysta Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa w Skierniewicach badania polowe i laboratoryjne do mojej pracy dyplomowej pt. „Badania porównawcze opryskiwaczy sadowniczych tunelowego i wentylatorowego w aspekcie skuteczności i kosztów zwalczania parcha jabłoni” przeprowadziłem w Zakładzie Mechanizacji Instytutu. Tytuł magistra inżyniera uzyskałem 8 marca 1983 r., a 2 maja rozpocząłem pracę w Zakładzie Mechanizacji skierniewickiego Instytutu. Pracując pod kierunkiem doc. dr hab. Bolesława Bery kontynuowałem badania nad wykorzystaniem opryskiwaczy tunelowych w sadach i na plantacjach owoców jagodowych. Owocem tych badań było 14 oryginalnych prac twórczych (II-A, II-C) oraz liczne referaty na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych (II-J).

W latach 1989-1994 odbyłem trzy staże naukowe na Szwedzkim Uniwersytecie Nauk Rolniczych (*Swedish University of Agricultural Sciences - Alnarp*), gdzie miałem okazję uczestniczyć w pracach doświadczalnych nad nowoczesnymi technikami opryskiwania sadów i plantacji truskawek oraz prowadzić samodzielne badania nad techniką ochrony łąnowych plantacji porzeczek czarnej. Badania te stały się podstawą mojej późniejszej pracy doktorskiej.

W ramach koordynowanego przeze mnie bilateralnego, polsko-belgijskiego projektu *Phare (III-E-1)* w latach 1996 i 1997 odbyłem kolejne dwa staże naukowe w Sadowniczej Stacji Badawczej Gorsem w Belgii (*Fruit Research Station of Gorsem - Saint Truiden*). W ich trakcie prowadziłem doświadczenia z wykorzystaniem czujników spektralnych do rozpoznawania obiektów i selektywnego stosowania herbicydów i pestycydów w sadach. Zdobyte w kraju i za granicą doświadczenia wykorzystałem w swojej działalności upowszechnieniowej i dydaktycznej, a przede wszystkim do prowadzenia badań związanych z techniką ochrony upraw, obejmujących następujące zagadnienia:

- równomierność nanoszenia środków ochrony roślin w uprawach przy wykorzystaniu różnych technik opryskiwania,
- wpływ podstawowych parametrów zabiegów, takich jak wielkość kropeł oraz prędkość i kierunek strumienia powietrza na jakość zabiegów,
- rozwój technik ograniczających znoszenie środków ochrony roślin,
- precyzyjna ochrona roślin z wykorzystaniem systemów identyfikacji obiektów,
- ocena skuteczności biologicznej zabiegów prowadzonych z wykorzystaniem różnych technik i parametrów opryskiwania.

Tematem mojej pracy doktorskiej, nagrodzonej przez Radę Naukową Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa był „Wpływ techniki opryskiwania na jakość zabiegów ochronnych w łąnowej uprawie porzeczek czarnej”. Stopień Doktora uzyskałem 10 grudnia 2001 r.

3.2. Działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych

Okres od 2002 do 2018 roku to czas postępującej intensyfikacji chemicznej ochrony roślin ze szczególną troską o zachowanie czystości środowiska. To także czas przygotowania i akcesji Polski do struktur Unii Europejskiej, a więc dostosowania i opracowania nowych przepisów prawa w zakresie stosowania środków ochrony roślin zgodnie z wytycznymi uzgodnionej już po akcesji dyrektywy o zrównoważonym stosowaniu pestycydów. Tak zdefiniowane cele w obszarze ochrony roślin stymulowały dynamiczny rozwój integrowanych metod ochrony, precyzyjnych technik stosowania agrochemikaliów tam gdzie to konieczne, oraz wymagały opracowania i wdrażania dobrych praktyk stosowania środków chemicznych w celu ochrony środowiska przed ich negatywnym wpływem.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych kontynuowałem pracę w Zakładzie Mechanizacji (od 2006 roku w Zakładzie Agrotechnologii) Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarnictwa (od 2011 roku Instytutu Ogrodnictwa) w Skierniewicach, koncentrując się w swojej działalności naukowo-badawczej na zagadnieniach wynikających z wyzwań stojących u progu nowego wieku i szczególnego okresu rozwoju naszego kraju. Moje prace badawcze obejmowały szerokie spektrum zagadnień związanych z techniką ochrony upraw:

- i. opracowanie i wdrażanie obowiązkowej inspekcji sprzętu ochrony roślin,
- ii. doskonalenie konstrukcji sprzętu ochrony roślin oraz ocena uzyskanych efektów, w tym skuteczności biologicznej badanych technik,
- iii. opracowanie systemów automatycznego sterowania pracą opryskiwacza,
- iv. badania nad techniką ochrony upraw w produkcji ekologicznej,
- v. opracowanie i wdrażanie technicznych, infrastrukturalnych i organizacyjnych rozwiązań na rzecz ochrony zdrowia ludzi i środowiska przed zanieczyszczeniami miejscowymi i obszarowymi, wynikającymi ze stosowania środków ochrony roślin.

i. **Opracowanie i wdrażanie obowiązkowej inspekcji sprzętu ochrony roślin**

Jednym z celów koordynowanego przeze mnie polsko-belgijskiego projektu *Phare (III-E-1)* było poznanie zasad obowiązkowej inspekcji sprzętu ochrony roślin w Belgii, Holandii i w Niemczech oraz stworzenie podstaw do wdrożenia podobnego systemu w Polsce w ramach procesu przedakcesyjnego do Unii Europejskiej. Obowiązek badania sprawności technicznej opryskiwaczy polowych i sadowniczych został wprowadzony w Polsce w roku 1999 przyjmując procedurę inspekcji wzorowaną na metodyce niemieckiej (**II-C-42**). Na podstawie porozumienia Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarnictwa z Głównym Inspektoratem Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa 23 marca 1999 r. powołano Centrum Badawczo-Szkoleniowe Techniki Ochrony Roślin (CBSTOR) działające przy Pracowni Techniki Ochrony i Nawożenia. Zakres działalności Centrum obejmuje organizację kursów dla pracowników Stacji Oceny Opryskiwaczy, rozwój aparatury i metod oceny sprzętu ochrony roślin oraz jego badania funkcjonalne.

Pierwsze lata funkcjonowania systemu badań sprzętu ochrony roślin zrodziły potrzebę zrewidowania metody oceny jakości rozpylaczy w opryskiwaczach polowych, badanych za pomocą pomiaru poprzecznego rozkładu cieczy pod belką polową. Alternatywną metodą, stosowaną w Belgii jest pomiar natężenia wyływu cieczy z rozpylaczy i ich ocena na podstawie zmienności wyników. Własne badania porównawcze obu metod (**II-C-43**, **II-C-44**, **II-A-15**) przemawiały za utrzymaniem obowiązującej w owym czasie metodyki badań podkreślając fakt, że metoda ta jest mniej pracochłonna i pozwala na identyfikację niedrożnych, uszkodzonych lub zużytych rozpylaczy przy jednoczesnej weryfikacji równomiernego rozkładu cieczy, będącego podstawowym wymaganiem dla opryskiwaczy polowych. Ostatecznie w

procedurze badania opryskiwaczy polowych dopuszczono także alternatywną metodę oceny rozpylaczy na podstawie natężenia wyptywu cieczy, przyjmując argumentację innych ośrodków badawczych, przemawiającą za bezpieczeństwem dla wykonawców badań oraz mniejszymi kosztami wymaganej aparatury diagnostycznej.

Realizacja wytycznych europejskiej dyrektywy o zrównoważonym stosowaniu pestycydów (2009/128/WE) zrodziła potrzebę włączenia w zakres obowiązkowej inspekcji także innych sprzętów ochrony roślin, dla których należało opracować procedurę badań sprawności technicznej. Zagadnieniu temu poświęcone było jedno z zadań Programu Wieloletniego realizowanego w Instytucie Ogrodnictwa w latach 2008-2014 (II-H-3) oraz obecnie realizowanego Programu Wieloletniego na lata 2015-2020 (II-H-6). W ramach tych zadań uczestniczyłem w badaniach stacjonarnych i studyjnych prowadzących do opracowania nowych metodyk i instrukcji badania opryskiwaczy montowanych na pojazdach kolejowych (II-C-63) i zaprawiarek do nasion (II-D-60) oraz aktualizacji instrukcji badania opryskiwaczy polowych i sadowniczych (II-D-59).

Warunkiem wyłączenia opryskiwaczy ręcznych i plecakowych z obowiązkowych badań sprawności technicznej jest przeprowadzenie analizy związanego ze stosowaniem tych urządzeń ryzyka dla operatora i środowiska, oraz zapewnienie użytkownikom dostępu do szkoleń i materiałów informacyjnych dotyczących użytkowania tego rodzaju sprzętu. Na podstawie analizy ryzyka przeprowadzonej z wykorzystaniem wyników badań wykonanych przez kierowany przeze mnie zespół i będącej przedmiotem publikacji (II-C-62), oraz po uwzględnieniu opracowanego przez ten zespół poradnika dobrych praktyk, dotyczącego samodzielnej kontroli opryskiwaczy ręcznych i plecakowych (II-D-56) sprzęt ten został zwolniony z obowiązku okresowych badań sprawności technicznej. Podobne poradniki samodzielnej kontroli w ramach dobrych praktyk opracowano również w odniesieniu do sprzętu podlegającego obowiązkowym badaniom, tzn. opryskiwaczy polowych i sadowniczych (II-D-58) oraz zaprawiarek do nasion (II-D-57). Ze względu na nowatorski charakter tematyki tych materiałów, mogących służyć za pomoc w przygotowaniu podobnych pozycji w innych krajach europejskich koncepcję i zawartość poradników samodzielnej kontroli sprzętu ochrony roślin opublikowano (II-C-71, II-C-72) i przedstawiono na międzynarodowym forum podczas warsztatów SPISE 2016 i SPISE 2018 (*European Workshop on Standardized Procedure for Inspection of Sprayers in Europe*) (II-J-60, II-J-176).

ii. **Doskonalenie konstrukcji sprzętu ochrony roślin oraz ocena uzyskanych efektów, w tym skuteczności biologicznej badanych technik**

Przełom XX i XXI wieku to okres dynamicznego rozwoju produkcji owoców jagodowych, w tym zwłaszcza czarnej porzeczki. Wzrostowi areалу tych upraw towarzyszył wzrost zainteresowania odpowiednią dla nich techniką opryskiwania. Wychodząc naprzeciw tym zainteresowaniom kontynuowałem badania w tym obszarze. Opublikowałem główne tezy swojej pracy doktorskiej, w której oceniałem pod kątem technicznej jakości zabiegów różne techniki opryskiwania łanowych plantacji porzeczek (II-C-27). Plantacje łanowe, na których porzeczki sadzone są w dużym zagęszczeniu, np. w rozstawie 0,5 x 0,5 m stwarzają możliwości uzyskania wyższych plonów, oraz poprzez fakt ich zbioru w procesie koszenia i tym samym odnawiania w cyklu dwuletnim ograniczają ryzyko występowania chorobotwórczych patogenów i szkodników. Nie eliminuje to potrzeby stosowania środków ochrony roślin, co ze względu na duże zagęszczenie roślin wymaga specjalnych rozwiązań technicznych. W swoich badaniach przeprowadzonych w Szwecji i Danii porównywałem poprzeczny rozkład i penetrację cieczy użytkowej w zwartym łanie porzeczek przy wykorzystaniu opryskiwacza

polowego działającego konwencjonalnie i z pomocniczym strumieniem powietrza oraz prototypowego opryskiwacza z pomocniczym strumieniem powietrza i rozpylaczami rotacyjnymi. Wyniki badań wykazały, że strumień powietrza poprawia zarówno poprzeczną jak i pionową równomierność naniesienia cieczy w łanie umożliwiając stosowanie niższych dawek cieczy, a więc obniżając nakłady pracy i koszty zabiegów w porównaniu z konwencjonalnym opryskiwaniem upraw łanowych.

We współpracy z Zakładem Ochrony Roślin Instytutu Ogrodnictwa prowadziłem także trzyletnie badania na rządowej plantacji porzeczek, których celem było porównanie równomierności naniesienia i strat cieczy użytkowej oraz skuteczności biologicznej zabiegów z wykorzystaniem tradycyjnego opryskiwacza sadowniczego o radialnej emisji strumienia powietrza oraz opryskiwacza o precyzyjnie ukierunkowanym strumieniu powietrza za pomocą ustawnych dyfuzorów (II-C-26). Poziom i równomierność naniesienia w krzewach porzeczki były statystycznie podobne dla obu technik w pełnym zakresie stosowanych dawek cieczy, od 260 do 600 l/ha, jednak straty cieczy podczas stosowania opryskiwacza o ukierunkowanym strumieniu powietrza były kilkukrotnie niższe niż w przypadku tradycyjnego opryskiwacza. Na podstawie skuteczności ochrony porzeczek przed rdzą wejmutkowo-porzeczkową (*Cronartium ribicola* J.C. Fisher) i skuteczności zwalczania przędziorka chmielowca (*Tetranychus urticae* Koch) badania dowiodły ponadto możliwości uzyskania zadowalającej ochrony przy użyciu istotnie niższych dawek cieczy niż powszechnie zalecane dawki na poziomie 1000 lub nawet 1500 l/ha. Uwzględniłem to w zaleceniach zawartych w metodykach integrowanej ochrony porzeczek dla doradców (II-D-23) i producentów (II-D-24) oraz w poradnikach dobrych praktyk w ochronie roślin (II-D-43, II-D-44, II-D-45)

Współpraca z Zakładem Ochrony Roślin zaowocowała także wynikami badań prowadzonych w różnych sadach jabłoniowych nad skutecznością biologiczną zabiegów z użyciem dawek cieczy wyznaczanych na podstawie objętości koron drzew (metoda TRV – *Tree Row Volume*) (II-C-33, II-C-38). Wyniki te dowiodły, że stosując niższe dawki cieczy w sadach z drzewami o mniejszej objętości koron i obliczając je na podstawie wysokości i szerokości koron oraz rozstawy rzędów można uzyskać poprawną ochronę jabłoni przed najpowszechniej występującymi chorobami, a mianowicie parchem jabłoni i mączniakiem jabłoni. Dlatego przygotowując rozdziały dotyczące techniki ochrony w metodykach integrowanej ochrony roślin dla doradców (II-D-11, II-D-15, II-D-17, II-D-19, II-D-25, II-D-29, II-D-39) i producentów (II-D-12, II-D-16, II-D-18, II-D-20, II-D-26, II-D-30, II-D-40,), oraz opracowując poradniki dobrych praktyk w ochronie roślin (II-D-43, II-D-44, II-D-45) uwzględniłem metodę TRV jako zalecany sposób określania dawki cieczy dla drzew owocowych. Dawki TRV stosowane były także jako dawki referencyjne w badaniach opisanych w publikacji H.6, włączonej w skład osiągnięcia naukowego na rzecz postępowania habilitacyjnego.

Stosowanie grubokroplistych rozpylaczy eżektorowych w ochronie sadów wciąż budzi zainteresowanie badaczy i praktyków. Badania, w których uczestniczyłem miały na celu określenie technicznych efektów wykorzystania rozpylaczy eżektorowych takich jak poziom i rozkład naniesienia oraz straty cieczy w zależności od prędkości roboczej opryskiwacza (II-C-36), konfiguracji rozpylaczy (II-C-67) lub dawki cieczy i fazy fenologicznej jabłoni (II-C-68). Wyniki tych badań, prowadzonych w porównaniu z drobnokroplistymi rozpylaczami wirowymi wskazywały jednoznacznie na pełną przydatność rozpylaczy eżektorowych w praktyce sadowniczej. Ograniczając straty cieczy użytkowej jednocześnie zapewniały one nieróżne statystycznie naniesienie substancji i pokrycie powierzchni, a w trudnych warunkach, tzn. przy dużej prędkości roboczej opryskiwacza i w późnej fazie wzrostu jabłoni nawet lepsze efekty niż tradycyjnie stosowane rozpylacze wirowe. Wyniki badań własnych, wchodzące w skład

habilitacyjnego osiągnięcia naukowego (H.6), pozytywnie zweryfikowały przydatność rozpylaczy eżektorowych także w aspekcie skuteczności biologicznej.

Innym istotnym przedmiotem badań w zakresie techniki ochrony upraw sadowniczych jest efekt pomocniczego strumienia powietrza na jakość zabiegów. Celem badań prowadzonych w kierowanej przeze mnie pracowni było określenie wpływu wydatku powietrza na poziom i równomierność naniesienia cieczy użytkowej w koronach jabłoni oraz sposobu emisji strumienia powietrza (radialna, poprzeczna, ukierunkowana) na penetrację koron jabłoni, rozkład cieczy użytkowej i wtórne naniesienie na drzewach. Przy zastosowaniu opryskiwacza deflektorowego, najodpowiedniejszego dla obecnego modelu szpalerowych i półkarłowych sadów jabłoniowych, wzrost wydatku strumienia powietrza powoduje we wczesnym okresie rozwoju drzew spadek poziomu naniesienia cieczy użytkowej przy jednoczesnej poprawie równomierności jej rozkładu. Zależności te tracą na znaczeniu gdy korony drzew się zagęszczają w późniejszej fazie wzrostu (II-C-28). Porównując efekty działania strumieni powietrza wytwarzanego przez opryskiwacz deflektorowy (emisja poprzeczna), konwencjonalny (emisja radialna) i z ustawionymi dyfuzorami (emisja ukierunkowana) okazało się, że poprzeczna i ukierunkowana emisja strumienia najlepiej zachowuje jego prędkość w interakcji z koroną drzewa (II-C-32). Opryskiwacz o ukierunkowanej emisji powietrza zapewnił także najwyższe naniesienie cieczy użytkowej w drzewach, i to niezależnie od prędkości roboczej w zakresie od 4 do 8 km/h (II-C-40). Precyzja z jaką opryskiwacz ten kieruje rozpyloną cieczą użytkową na drzewa sprawia, że wtórne naniesienie podczas opryskiwania sąsiednich rzędów jest najmniejsze spośród trzech badanych opryskiwaczy (II-C-35). Powoduje to najmniejsze ryzyko przedawkowania środków ochrony roślin, mogące skutkować przekroczeniem dopuszczalnych poziomów pozostałości substancji czynnych w owocach. W przypadku opryskiwacza o radialnej emisji powietrza wtórne naniesienie w ekstremalnym przypadku sięgało 30% naniesienia pierwotnego.

Wysoko prowadzone drzewa w sadach owoców ziarnkowych, zrodziło zainteresowanie sadowników opryskiwaczami dwuwentylatorowymi. W tym kierunku poszły także prace konstrukcyjne kierowanego przeze mnie zespołu badawczego. W ramach projektu celowego realizowanego we współpracy z polskim producentem opryskiwaczy, firmą AGROLA (II-F-10), zaprojektowano i skonstruowano prototyp opryskiwacza sadowniczego z dwoma niezależnie napędzanymi wentylatorami, z których każdy wyposażony był w deflektor do poprzecznej emisji strumienia powietrza. Ponadto górny wentylator miał regulowaną wysokość położenia. Konstrukcja ta chroniona jest dwoma patentami (II-B-5, II-B-8). Prototyp został poddany badaniom stanowiskowym i polowym, których celem było określenie równomierności pionowego rozkładu cieczy użytkowej w wysokich drzewach owocowych. Wyniki badań potwierdziły oczekiwania związane z opryskiwaczami dwuwentylatorowymi wskazując na znaczną poprawę naniesienia cieczy w górnych partiach koron wysokich drzew w porównaniu z typowymi opryskiwaczami deflektorowymi (II-C-46, II-C-48, II-C-61). Po wdrożeniu prototypu do produkcji opryskiwacz dwuwentylatorowy znalazł się w ofercie firmy AGROLA.

W ramach innych projektów realizowanych w kierowanej przeze mnie Pracowni Techniki Ochrony Roślin i Nawożenia powstały lub są w trakcie tworzenia prototypy następujących opryskiwaczy:

- we współpracy z KFMR Krukowiak:
 - sadowniczy opryskiwacz tunelowy z recyrkulacją cieczy (II-F-8)
 - samojezdny opryskiwacz tunelowy z recyrkulacją cieczy do ochrony krzewów jagodowych (II-F-9)

- we współpracy z ZHP AGROLA:
 - opryskiwacz dwurzędowy do ochrony krzewów jagodowych (II-F-11)
 - opryskiwacz dwuwentylatorowy z asymetryczną regulacją powietrza (II-F-13)
- we współpracy z BURY-MASZYNY ROLNICZE
 - rodzina tunelowych opryskiwaczy sadowniczych z odzyskiem cieczy (II-F-12)

iii. Opracowanie systemów automatycznego sterowania pracą opryskiwacza

Istotny wpływ na jakość zabiegów w sadach mają warunki atmosferyczne, zwłaszcza wiatr zakłócający proces penetracji drzew i nanoszenia cieczy użytkowej na chronione obiekty. Zarówno wielkość kropeł cieczy jak i pomocniczy strumień powietrza powinny być dobierane tak aby kompensować niekorzystne działanie wiatru. Uczestniczyłem w pracach nad systemem automatycznego odchylenia strumienia powietrza (II-C-31) oraz układem automatycznego przełączania rozpylaczy drobnokroplistych na grubokropliste w zależności od prędkości i kierunku wiatru. W układzie automatycznego przełączania rozpylaczy VarioWindSelect wykorzystano pneumatycznie sterowane, podwójne korpusy rozpylaczy VarioSelect (Lechler, Niemcy), sterownik mikroprocesorowy specjalnie do tego celu zaprojektowany przez firmę Mueller-Elektronik (Niemcy), oraz anemometr mierzący prędkość wiatru podczas ruchu opryskiwacza. Gdy wiatr przekracza graniczną, zdefiniowaną przez operatora prędkość sterownik wyłącza standardowe rozpylacze wirowe i włącza rozpylacze eżektorowe. System VarioWindSelect został opatentowany (II-B-4) i w roku 2004 zaprezentowany na targach Intervitis Interfructa w Stuttgarcie, gdzie uzyskał nominację do nagrody "Innovation Prize". Opisane rozwiązania stały się inspiracją do opracowania systemu EDAS wykorzystanego w precyzyjnym opryskiwaczu CASA, który jest przedmiotem mojego osiągnięcia naukowego na rzecz postępowania habilitacyjnego oraz innych, nie opisanych w rozdziale 2 publikacji (II-A-10, II-C-47, II-C-49, II-C-5).

Wśród prac prowadzonych przez kierowany przeze mnie zespół na uwagę zasługują także badania nad wykorzystaniem laserowego skanera LIDAR do identyfikacji przestrzennych cech drzew jabłoni w celu zmiennego dawkowania środków ochrony roślin (II-C-60), oraz koncepcja automatycznego systemu niezależnej regulacji prędkości i kierunku strumienia powietrza w zależności od zmienności opryskiwanych obiektów i wiatru (II-A-16).

iv. Badania nad techniką ochrony upraw w produkcji ekologicznej

W ramach projektu EkoTechProdukt (II-H-4) kierowałem pracami nad wpływem czynników działających w układzie cieczowym opryskiwacza sadowniczego na bakterie wchodzące w skład biocydów stosowanych w ekologicznej produkcji owoców. Celem tych prac była ocena przeżywalności mikroorganizmów poddanych działaniu temperatury, zmiennego ciśnienia, oraz przepływu przez filtry, zawory i rozpylacze opryskiwacza i tym samym określenie skuteczności biocydów stosowanych przy użyciu typowych opryskiwaczy. Na potrzeby badań opracowano koncepcję i skonstruowano stanowisko badawcze umożliwiające wierną symulację zabiegów z użyciem hydraulicznego systemu rozpylania cieczy wymagającego wysokiego ciśnienia lub rozpylania pneumatycznego działającego przy niskim ciśnieniu i burzliwym przepływie cieczy. Stanowisko chronione jest patentem (II-B-9). W wyniku pomiarów stwierdzono, że bakterie *Pseudomonas fluorescens* i *Enterobacter nimipressuralis* są bardzo tolerancyjne i dobrze znoszą wzrost temperatury cieczy do blisko 40°C oraz zmiany ciśnienia od zera do 1,5 MPa z częstotliwością 10-50 Hz. Jedynym czynnikiem zmniejszającym żywotność bakterii było długotrwałe krążenie ich zawiesiny w układzie cieczowym w warunkach wysokiego ciśnienia (II-A-14).

v. Opracowanie i wdrażanie technicznych, infrastrukturalnych i organizacyjnych rozwiązań na rzecz ochrony zdrowia ludzi i środowiska przed zanieczyszczeniami miejscowymi i obszarowymi, wynikającymi ze stosowania środków ochrony roślin

W latach 2006-2018 koordynowałem cztery projekty europejskie w ramach inicjatywy TOPPS – *Training the Operators to Prevent Pollution from Point Sources*, których wspólnym celem była ochrona wody przed zanieczyszczeniami przez środki ochrony roślin. Pierwszy projekt dotyczył metod zapobiegania zanieczyszczeniom miejscowym (III-E-2). W jego trakcie opracowano europejski kodeks dobrych praktyk postępowania ze środkami ochrony roślin w całym łańcuchu operacji związanych z ich stosowaniem, tzn. podczas ich transportu i przechowywania, sporządzania cieczy użytkowej, prowadzenia zabiegu, mycia sprzętu ochrony roślin oraz zagospodarowania stałych i ciekłych pozostałości po zabiegach. Kodeks ten stał się podstawą do opracowania materiałów informacyjnych i szkoleniowych w formie poradników (II-D-44, II-D-45, II-D-46, II-D-47), ulotek, prezentacji oraz filmu (III-H-1). Materiały te są powszechnie wykorzystywane w działalności upowszechnieniowej i szkoleniowej. Inicjatywy Projektu TOPPS zostały włączone w proces realizacji przyjętego przez Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi „Krajowego planu działania na lata 2013-2017 na rzecz ograniczenia ryzyka związanego ze stosowaniem środków ochrony roślin” (M. P. 2013, poz. 536) w ramach Działania 8: „Promowanie dobrych praktyk bezpiecznego stosowania środków ochrony roślin”. Niektóre zalecenia opracowanego kodeksu dobrych praktyk wg. TOPPS znalazły także odzwierciedlenie w nowych regulacjach prawnych przyjętych w celu realizacji założeń dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/128/WE o zrównoważonym stosowaniu pestycydów (Dz.Urz.UE, L 309/71, 2009). Dotyczy to głównie rozporządzenia MRiRW w sprawie sposobu postępowania przy stosowaniu i przechowywaniu środków ochrony roślin (Dz.U. 2013, poz. 625) i zawartych w nim wymagań związanych ze sporządzaniem cieczy użytkowej, czyszczeniem sprzętu ochrony roślin oraz zagospodarowaniem pozostałości po zabiegach. W rozporządzeniu tym uznaje się bioremediację, rozpropagowaną przez dobre praktyki TOPPS, jako metodę neutralizacji substancji czynnych w ciekłych pozostałościach po zabiegach ochrony roślin do zastosowania na poziomie gospodarstw rolniczych.

Drugi z projektów TOPPS (III-E-3) poświęcony był opracowaniu aplikacji EOS – *Environmentally Optimized Sprayer*, będącej narzędziem oceny opryskiwaczy w aspekcie ich bezpieczeństwa dla środowiska (II-A-13, II-C-50, II-C-58, III-H). W jego trakcie opracowano także podręcznik opisujący właściwości opryskiwaczy i ich potencjał ograniczania ryzyka powstawania zanieczyszczeń miejscowych (II-D-48).

Kolejny projekt TOPPS (III-E-4) miał na celu opracowanie i promowanie dobrych praktyk na rzecz ograniczania ryzyka powstawania zanieczyszczeń obszarowych w wyniku znoszenia cieczy użytkowej i spływu powierzchniowego. W ramach tego projektu opracowano europejski kodeks dobrych praktyk w celu ograniczania znoszenia (II-D-49), poradnik dobrych praktyk ochrony roślin (II-D-50), filmy szkoleniowe o metodach ograniczania znoszenia podczas opryskiwania upraw polowych (III-H-2) i sadowniczych (III-H-3), oraz aplikację będącą narzędziem oceny ryzyka znoszenia i wspomagania decyzji o wyborze metod jego ograniczania (II-A-12, III-H).

Ostatni z projektów TOPPS (III-E-5) był syntezą osiągnięć wcześniejszych projektów oraz okazją do rozwinięcia i aktualizacji powstałych w ich trakcie materiałów szkoleniowych. Jego owocem były uzupełnione poradniki dobrych praktyk postępowania ze środkami ochrony roślin (II-D-52), a także nowe poradniki dobrych praktyk dotyczących spływu

powierzchniowego i erozji gleby (**II-D-53**) oraz bioremediacji płynnych pozostałości zanieczyszczonych środkami ochrony roślin (**II-D-54**).

Zagadnienia związane z ochroną zdrowia ludzi i środowiska przed skutkami stosowania środków ochrony roślin były także przedmiotem kierowanych przeze mnie zadań w ramach Programów Wieloletnich realizowanych w Instytucie Ogrodnictwa i finansowanych przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. W trakcie Programu Wieloletniego na lata 2008-2014 (**II-H-3**) kierowałem doświadczeniami nad efektywnością różnych metod mycia opryskiwaczy oraz skutecznością bioremediacji, zastosowanej do neutralizacji środków ochrony roślin w ciekłych pozostałościach po myciu sprzętu (**II-C-53**). W tym celu opracowałem i koordynowałem budowę kompaktowego stanowiska bioremediacyjnego pod nazwą VERTIBAC, przeznaczonego dla gospodarstw ogrodniczych. Wyniki badań nad efektywnością biodegradacji środków ochrony roślin w tym stanowisku potwierdziły jego pełną przydatność praktyczną do zastosowania w ramach dobrych praktyk (**II-J-51, II-J-55, II-J-104**). Ostatecznie stanowisko bioremediacyjne znalazło się w wykazie rodzajów inwestycji służących ochronie środowiska i będących przedmiotem pomocy finansowej na modernizację gospodarstwa w ramach Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020 (Dz.U. 2015, poz. 1371). Wyniki prac prowadzonych w ramach zadania wykorzystano do opracowania poradnika dobrych praktyk postępowania ze środkami ochrony roślin w gospodarstwie (**II-D-51**).

W obecnie realizowanym Programie Wieloletnim na lata 2015-2020 (**II-H-6**) kieruję Zadaniem 2.4, którego celem jest opracowanie i ocena metod ograniczania ryzyka związanego ze stosowaniem środków ochrony roślin. W ramach zadania prowadzę badania nad możliwościami ograniczania znoszenia cieczy użytkowej przy wykorzystaniu struktur towarzyszących uprawom, takich jak siatki przeciwgradowe w sadach czy zielne pasy buforowe na granicach pól. Badania te mają charakter pionierski i mają dostarczyć dane umożliwiające włączenie tych struktur do sklasyfikowanych metod ograniczania znoszenia. Dotychczasowe wyniki cząstkowe publikowane są w corocznych sprawozdaniach dla MRiRW.

Pomiary znoszenia prowadzone są wg. uzgodnionej na poziomie europejskim metodyki, testowanej w ramach kierowanego przeze mnie międzynarodowego projektu SETAC-DRAW (**III-E-7**). Badania prowadzone równolegle w Polsce, Holandii, Francji, Włoszech i Niemczech, w podobnych warunkach polowych i według tej samej metodyki wskazały na ogromną zmienność warunków pogodowych, ich ściśle lokalny charakter w obrębie stanowisk pomiarowych, i tym samym istotny wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów znoszenia. Problemem znoszenia cieczy użytkowej zajmowałem się także wcześniej, w ramach projektu ISAFRUIT (**II-H-2**), oraz uczestnicząc w badaniach nad wpływem różnych parametrów roboczych na znoszenie, prowadzonych w kraju i zagranicą (**II-C-59, II-C-64, II-C-70**). Uzyskane wyniki znalazły swój praktyczny wyraz w poradniku dobrej praktyki na rzecz ograniczania znoszenia środków ochrony roślin w uprawach sadowniczych (**II-D-55**).

Wiedzę i doświadczenie zdobyte w trakcie realizacji prac badawczych i konstrukcyjnych, opisanych w powyższym rozdziale, wykorzystałem w pracach przeglądowych (**II-A-11, II-C-30, II-C-34, II-C-37, II-C-39, II-C-65**) i monograficznych (**II-C-1, II-C-2, II-C-4**) oraz w rozdziałach książek i prac zbiorowych przeznaczonych dla producentów owoców (**II-D-1, II-D-2, II-D-3, II-D-4, II-D-5, II-D-6, II-D-7, II-D-8, II-D-9, II-D-10**).

3.3. Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego

W Tabeli 2 zestawiono całkowity opublikowany dorobek naukowy, a w Tabeli 3 przedstawiono punktację oraz *Impact Factor* prac opublikowanych w poszczególnych czasopismach naukowych.

Tabela 2. Syntetyczne zestawienie opublikowanego dorobku naukowego **bez publikacji i patentów wchodzących w skład osiągnięcia, będącego przedmiotem rozprawy habilitacyjnej**

Lp.	Kategoria	Liczba pozycji		
		przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora	ogółem
1.	Publikacje w czasopismach naukowych posiadających IF, wymienionych w części A wykazu MNiSW	2	3	5
2.	Publikacje w czasopismach naukowych nieposiadających IF, wymienionych w części B wykazu MNiSW	12	32	44
3.	Rozdziały w monografiach	-	4	4
4.	Patenty na wynalazki	3	8	11
5.	Publikacje w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, uwzględnione w Web of Science Core Collection	7	5	12
6.	Pozostałe publikacje, streszczenia lub doniesienia na konferencjach międzynarodowych	25	80	105
7.	Publikacje, streszczenia lub doniesienia na konferencjach krajowych	40	61	101
8.	Ekspertyzy	-	3	3
19.	Rozdziały w książkach lub pracach zbiorowych	3	7	10
10.	Poradniki, instrukcje, metodyki	-	50	50
11.	Artykuły popularno-naukowe	37	82	119
12.	Aplikacje komputerowe (narzędzia wspomaganie decyzji)	-	2	2
13.	Filmy szkoleniowo-upowszechnieniowe (scenariusz, reżyseria i montaż)	-	3	3
14.	Recenzje dla czasopism posiadających IF	-	43	43
15.	Referaty na konferencjach międzynarodowych, w tym:	34	93	127
	- wygłoszone referaty	19	44	63
	- współautorstwo referatów	15	49	64
16.	Referaty na konferencjach krajowych, w tym:	42	65	107
	- wygłoszone referaty	19	30	49
	- współautorstwo referatów	23	35	58
RAZEM – suma pozycji w wierszach 1-14		129	383	512

Tabela 3. Punktacja oraz *Impact Factor* opublikowanych prac naukowych bez publikacji wchodzących w skład osiągnięcia, będącego przedmiotem rozprawy habilitacyjnej

Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	Impact Faktor		Suma punktów MNiSW	
		Zgodnie z rokiem opublikowania	Wg punktacji z roku 2017	Zgodnie z rokiem opublikowania	Wg punktacji z roku 2017
Crop Protection	1	0,573	1,920	30	30
Journal of Agricultural Engineering Research *	1	0,585	2,132	35	40
Computers and Electronics in Agriculture	1	1,486	2,427	35	40
Science of the Total Environment	1	4,099	4,610	35	40
Biosystems Engineering	1	2,132	2,132	40	40
Pozostałe czasopisma punktowane					
Fruit Science Report **	3	-	-	9	42
Journal of Fruit and Ornamental Plant Research **	5	-	-	18	70
Progress in Plant Protection / Postępy w Ochronie Roślin	1	-	-	5	12
Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu	3	-	-	9	12
Inżynieria Rolnicza / Agricultural Engineering	21	-	-	110	210
Electronic Journal of Polish Agricultural Universities	3	-	-	21	36
Annual Review of Agricultural Engineering	4	-	-	28	28
Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych	1	-	-	9	13
Problemy Inżynierii Rolniczej	2	-	-	8	14
Roczniki Państwowego Zakładu Higieny	1	-	-	6	14
Monografie	4	-	-	20	20
Publikacje punktowane łącznie przed uzyskaniem stopnia doktora	14	1,158	4,052	105	202
Publikacje punktowane łącznie po uzyskaniu stopnia doktora	39	7,717	9,169	313	459
RAZEM	53	8,875	13,221	418	661

* obecnie: Biosystems Engineering

** obecnie: Journal of Horticultural Research

4. Sumaryczny *Impact Factor*, liczba cytowani publikacji oraz Indeks Hirscha

Sumaryczny *Impact Factor* wg *Journal Citation Reports* (JCR):

- zgodnie z rokiem opublikowania	8,875
- wg punktacji z roku 2017	13,221
Liczba cytowani wg bazy <i>Web of Science</i> (w tym bez samocytowań)	90 (86)
Indeks Hirscha wg. bazy <i>Web of Science</i>	6
Liczba punktów MNiSW:	
- zgodnie z rokiem opublikowania	418
- wg punktacji z roku 2017	661

5. Nagrody za działalność naukową, upowszechnieniową, dydaktyczną i organizacyjną

Moje osiągnięcia w zakresie działalności naukowej, upowszechnieniowej i organizacyjnej zostały wyróżnione następującymi nagrodami (II-I):

- Odznaka honorowa „Zasłużony dla Rolnictwa”
- Nagroda Rady Naukowej ISK za wyróżniający poziom naukowy pracy doktorskiej
- Wyróżnienie Wojewody Łódzkiego za opracowanie opryskiwacza tunelowego
- Złoty Medal Międzynarodowych Targów Poznańskich POLAGRA PREMIERY 2010 za innowacyjny produkt: precyzyjny opryskiwacz sadowniczy EDAS
- Nagroda Towarzystwa Przyjaciół Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa za opracowanie koncepcji inteligentnego opryskiwacza EDAS
- Dyplom uznania Dyrektora IO za udział w opracowaniu „Metodyk integrowanej ochrony roślin ogrodniczych przed agrofagami”
- Nagroda Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi za opracowanie cyklu metodyk obowiązkowej inspekcji oraz samodzielnej kontroli sprzętu do ochrony roślin.

6. Wygłoszenie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

Jestem autorem lub współautorem 127 referatów wygłoszonych na konferencjach międzynarodowych oraz 107 referatów na konferencjach krajowych (II-J).

Na konferencjach międzynarodowych zaprezentowałem 63 referaty (44 po uzyskaniu stopnia doktora), a na konferencjach krajowych 49 referatów (30 po doktoracie).

7. Dorobek w zakresie upowszechniania wyników działalności naukowej

Moja działalność upowszechnieniowa ukierunkowana była na szerokie grono odbiorców, wśród których główne grupy docelowe stanowili producenci owoców, diagnostyki prowadzący badania sprzętu ochrony roślin, doradcy rolniczy oraz pracownicy nauki, administracji i przemysłu działający w obszarze ochrony roślin (III-H).

W ramach szkoleń dot. integrowanej produkcji owoców, prowadzonych przez Instytut Sadownictwa i Kwiaciarstwa w latach 2004-2010 oraz przez Śląski ODR w roku 2015 przeprowadziłem 52 wykłady w zakresie techniki ochrony upraw sadowniczych.

W latach 1999-2006 brałem udział w obowiązkowych kursach szkoleniowych dla diagnostów stacji kontroli sprzętu ochrony roślin, organizowanych przez Centrum Badawczo-Szkoleniowym Techniki Ochrony Roślin, prowadząc wykłady i ćwiczenia w zakresie stosowania opryskiwaczy, doboru rozpylaczy, oraz kalibracji sprzętu. W trakcie 21 kursów przeszkolono i przeegzaminowano 420 uczestników.

W ramach czterech projektów TOPPS (**III-E-2, III-E-3, III-E-4, III-E-5**) realizowanych w latach 2006-2018 prowadziłem szkolenia z udziałem praktycznych ćwiczeń polowych dla doradców rolniczych. Celem szkoleń było promowanie dobrych praktyk na rzecz ograniczania ryzyka zanieczyszczenia wód ze źródeł miejscowych i obszarowych. Opracowałem program, przygotowałem materiały i koordynowałem realizację łącznie 27 szkoleń, podczas których przeszkolono 834 doradców.

Ważną docelową grupą mojej działalności upowszechnieniowej były także środowiska opiniotwórcze i decyzyjne, tzn. pracownicy naukowcy, przedstawiciele administracji, głównie Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi i Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa, organizacji branżowych, mediów oraz pracowników branży chemicznej i maszynowej. Dla tej grupy odbiorców organizowałem i koordynowałem przebieg jedno- i dwudniowych warsztatów szkoleniowych o tematyce związanej z bezpiecznym i efektywnym stosowaniem środków ochrony roślin oraz metodach ograniczania ich negatywnego wpływu na środowisko. W toku 18 warsztatów przeszkolono 512 uczestników.

Innym przejawem upowszechniania wiedzy i popularyzacji nauki jest moja działalność publikacyjna. Jestem autorem 119 artykułów popularno-naukowych opublikowanych w czasopismach branżowych (**III-N**).

8. Dorobek w zakresie dydaktycznym i organizacyjnym

8.1. Współpraca międzynarodowa

Działalność na arenie międzynarodowej stanowi istotny udział w moim dorobku naukowym. W latach 1986-1998 odbyłem 7 staży w europejskich ośrodkach naukowych oraz staż zawodowy w Stanach Zjednoczonych (**III-J**). Od 2002 roku jestem członkiem zarządu organizacji EUFRIN - *European Fruit Research Institute Network* oraz koordynatorem Grupy Roboczej „*Spray Application Technology*” działającej przy tej organizacji (**III-D**). W ramach tej grupy koordynowałem organizację 10 międzynarodowych warsztatów naukowych *SuProFruit*, odbywających się w dwuletnim cyklu w różnych krajach europejskich (**III-A**).

Ogółem brałem udział w komitetach organizacyjnych albo naukowych, lub byłem przewodniczącym sesji tematycznych 17 konferencji międzynarodowych, a na 14 konferencjach zagranicznych występowałem w charakterze zaproszonego prelegenta (**III-B**). Ponadto współorganizowałem oraz prowadziłem wykłady i ćwiczenia praktyczne 4 międzynarodowych szkoleń dla ekspertów w zakresie techniki ochrony upraw i bezpiecznego stosowania środków ochrony roślin (**III-C**).

Przejawem mojej działalności międzynarodowej jest także krajowa koordynacja 7 europejskich projektów (**II-H, III-E**) oraz opracowanie 49 recenzji manuskryptów dla międzynarodowych czasopism naukowych, w tym 43 recenzji dla czasopism z IF: *Crop Protection, Computers and Electronics in Agriculture, Biosystems Engineering, Science of the Total Environment* oraz *Europeaan Journal of Plant Pathology* (**III-M**).

8.2. Funkcje o charakterze organizacyjnym pełnione w Instytucie Ogrodnictwa

- 1996 – 1999 r. - Członek Rady Naukowej Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa drugiej kadencji
- 1999 – 2003 r. - Członek Rady Naukowej Instytutu Sadownictwa i Kwiaciarstwa trzeciej kadencji
- od 1 stycznia 2002 r. do chwili obecnej - Kierownik Pracowni Techniki Ochrony i Nawożenia w Zakładzie Agrotechnologii

8.3. Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego

Decyzją Rady Naukowej Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach z dn. 20 kwietnia 2017 r. jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr Pawła Białkowskiego z Zakładu Agrotechnologii Instytutu. Tytuł pracy brzmi: „Wpływ parametrów roboczych kombajnu na jakość zbioru owoców wiśni” (III-I).

8.4. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki

Moja działalność dydaktyczna koncentrowała się na organizacji i prowadzeniu zajęć obejmujących wykłady i ćwiczenia w ramach obowiązkowych lub fakultatywnych programów dydaktycznych dla studentów Wydziałów Rolniczego i Ogrodniczego SGGW w Warszawie (III-H). Zajęcia odbywały się w Zakładzie Agrotechnologii Instytutu Ogrodnictwa w Skierniewicach z wykorzystaniem należących do Instytutu maszyn i obiektów. W latach 2002-2005 oraz 2013-2015 przeprowadziłem 7 zajęć z udziałem 168 studentów.

Ponadto w ramach projektu TOPPS (III-E-5) przygotowałem merytorycznie i przeprowadziłem seminaria dla studentów i nauczycieli akademickich, zorganizowane na 9 polskich uniwersytetach prowadzących nauczanie w zakresie rolnictwa, ogrodnictwa, inżynierii rolniczej lub ochrony środowiska (III-H). Tematyka seminariów obejmowała metody ograniczania ryzyka zanieczyszczenia środowiska, zwłaszcza wody, przez środki ochrony roślin w wyniku ich znoszenia, spływu powierzchniowego i skażeń miejscowych. Podczas seminariów przeprowadzono także ćwiczenia polegające na ocenie właściwości gleby pod kątem podatności na spływ powierzchniowy oraz dla wybranej grupy studentów warsztaty w zakresie użytkowania aplikacji DET (*Drift Evaluation Tool*) do oceny ryzyka znoszenia i podejmowania decyzji o wyborze metod ograniczania tego ryzyka. W seminariach uczestniczyło łącznie 1940 słuchaczy.

