



Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Inżynierii Mechanicznej

Mgr inż. Krzysztof Kulpa

Numer albumu D/3026

Wpływ położenia roślin w uprawie rzędowej oraz obecności chwastów na trajektorię ruchu noży pielących

The influence of the position of plants in row crops and the
presence of weeds on the trajectory of the weeding blades

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Praca wykonana pod kierunkiem
dr hab. inż. Karola Tuckiego, prof. SGGW
Katedra Inżynierii Produkcji

Warszawa, 2025

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data ..28.02.2025.....

Czytelny podpis promotora.....

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej


Świadom/a odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przez mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej

Data ..28.02.2025.....

Czytelny podpis autora rozprawy.....

Streszczenie

Wpływ położenia roślin w uprawie rzędowej oraz obecności chwastów na trajektorię ruchu noży pielących

Celem pracy było wykazanie przydatności identyfikacji roślin za pomocą sieci neuronowych w autorskim mechanizmie do niszczenia chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin. Badania w pierwszym etapie obejmowały określenie wymogów agrotechnicznych, stworzenie koncepcji mechanizmu oraz jej opatentowanie. Następnie opracowano model matematyczny zawierający równania określające właściwości geometryczne wszystkich elementów mechanizmu oraz przeprowadzono szereg analiz geometrycznych i kinematycznych weryfikujących przydatność w rzeczywistych warunkach agrotechnicznych. W dalszym kroku opracowano kompleksowy proces tworzenia modeli sieci neuronowych rozpoznającej rośliny w danej uprawie oraz dokonano wyboru rozwiązań technicznych umożliwiających budowę prototypu. Po zbudowaniu prototypu zaimplementowano autorskie oprogramowanie umożliwiające sterowanie sekcją roboczą w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin zanieczyszczonych chwastami na podstawie obrazu z kamery wykorzystując autorską metodę wyznaczania trajektorii ruchu noży dłutowych. Dalszy etap obejmował szereg badań na kanale glebowym. W tym celu wykorzystano sztuczne rośliny imitujące kapustę oraz sztuczne rośliny imitujące chwasty. Badania przeprowadzono dla 4 różnych trajektorii toru roślin oraz 3 prędkości roboczych wynoszących 0,8 km/h, 1,0 km/h oraz 1,2 km/h, w wariacie samych roślin uprawnych oraz roślin uprawnych zanieczyszczonych chwastami. Prototyp był wyposażony w system rejestrujący przemieszczenia poszczególnych elementów układu, co umożliwiło odtworzenie trajektorii ruchu noży podczas przejazdu. Następnie, na podstawie wcześniej opracowanych modelowych trajektorii ruchu dokonano weryfikacji spełnienia założeń modelu.

Słowa kluczowe: pielnik, pielenie w rzędzie, detekcja obiektów, model matematyczny

Summary

The influence of the position of plants in row crops and the presence of weeds on the trajectory of the weeding blades

The aim of the thesis was to demonstrate the usefulness of plant identification using neural networks in the author's mechanism for weed control in curvilinear and non-parallel rows of plants. The research in the first stage included determining the agrotechnical requirements, creating the concept of the mechanism and patenting it. Then, a mathematical model was developed containing equations defining the geometric properties of all the elements of the mechanism and a series of geometric and kinematic analyses were carried out to verify its usefulness in real agrotechnical conditions. In the next step, a comprehensive process of creating models of neural networks recognizing plants in a given crop was developed and technical solutions were selected to enable the construction of a prototype. After building the prototype, the author's software was implemented to control the working section in curvilinear and non-parallel rows of plants contaminated with weeds based on the image from the camera, using the original method of determining the trajectory of weeding knives. The next stage included a series of tests on the soil channel. For this purpose, artificial plants imitating cabbage and artificial plants imitating weeds were used. The tests were carried out for 4 different plant trajectories and 3 working speeds of 0,8 km/h, 1,0 km/h and 1,2 km/h, in the variant of crop plants alone and crop plants contaminated with weeds. The prototype was equipped with a system recording the displacements of individual system elements, which enabled the reproduction of the blade movement trajectory during the drive. Then, based on previously developed model movement trajectories, the verification of the fulfillment of the model assumptions was carried out.

Keywords: weeder, in-row weeding, object detection, mathematical model

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	9
1. Wstęp.....	11
2. Przegląd literatury	13
2.1. Rozwiązania konstrukcyjne pielników	13
2.2. Elementy robocze narzędzi do uprawy międzyrzędowej	15
2.3. Pielniki z aktywnymi elementami roboczymi	24
2.4. Systemy prowadzenia pielnika wzdłuż rzędów	26
2.5. Systemy do zwalczania chwastów w rzędach	30
2.6. Alternatywne metody zwalczania chwastów	33
2.7. Perspektywy rozwoju mechanicznego zwalczania chwastów	35
2.8. Podsumowanie	37
3. Cel i zakres pracy	38
4. Wymagania agrotechniczne dla sekcji pielącej.....	42
5. Koncepcja mechanizmu sekcji pielącej	46
6. Model matematyczny mechanizmu sekcji pielącej.....	49
6.1. Opis matematyczny punktów charakterystycznych sekcji pielnika w przestrzeni 3D	50
6.2. Wizualizacja obliczonych punktów mechanizmu pielącego w przestrzeni 3D.....	57
6.3. Wpływ wybranych parametrów roboczych na zachowanie mechanizmu pielącego	60
6.4. Symulacje trajektorii ruchu poszczególnych elementów sekcji pielącej.....	69
6.5. Podsumowanie	74
7. Wybór technologii rozpoznawania roślin	75
7.1. Proces tworzenia modeli sieci neuronowych do rozpoznawania roślin w danej uprawie	75
7.2. Wybór jednostki sterującej	80
7.3. Optymalizacja modelu TensorFlow do technologii TensorRT	83
7.4. Podsumowanie	84
8. Budowa stanowiska badawczego	85
8.1. Model geometryczny 3D	85
8.2. Koncepcja automatyki i sterowania sekcją pielącą.....	86
8.3. Budowa sekcji pielącej	88

9. Wyznaczanie trajektorii ruchu noży dłutowych	90
9.1. Koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin”	90
9.2. Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”	91
9.3. Porównanie i wybór koncepcji	92
9.4. Opracowanie metody wyznaczania ścieżki noży zgodnej z koncepcją „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”	95
9.5. Program do wyznaczania trajektorii ruchu noży zgodnej z koncepcją „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”	97
10. Oprogramowanie sterujące sekcją pielącą	99
10.1. Algorytm oprogramowania sterującego sekcją pielącą	99
10.2. Weryfikacja działania programu sterującego	104
11. Metodyka badań w kanale glebowym	106
11.1. Przygotowanie torów roślin i chwastów	107
11.2. System rejestracji sygnałów	110
11.3. Kalibracja systemu rejestracji sygnałów	118
12. Wyniki badań sekcji pielącej na kanale glebowym	119
12.1. Uruchomienie stanowiska badawczego i przejazdu próbne	119
12.2. Badania czasów opóźnień elementów roboczych sekcji pielącej i wyznaczenie opóźnień reakcji	124
12.3. Interpretacja wyników z enkoderów obrotowych	128
12.4. Przedstawienie wyników prób przejazdów	130
13. Dyskusja wyników badań	136
13.1. Zdarzenie zniszczenia uprawianej rośliny	136
13.2. Zdarzenia omijania chwastów	137
13.3. Poziom odwzorowania ścieżek modelowych trajektorii ruchu noży pielących podczas przejazdów sekcji pielącej	137
13.4. Problem przesterowania mechanizmu przesuwu poprzecznego sekcji pielącej ..	138
13.5. Ocena jakości pracy sekcji pielącej	140
13.6. Zastosowanie innego rodzaju noża pielącego niż nóż dłutowy	142
14. Podsumowanie i wnioski	145
15. Spis literatury	147
16. Spis rysunków i tabel	155

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- A_x, A_y, A_z – położenie punktu A w modelu matematycznym, odpowiednio w osiach x, y oraz z , analogicznie w przypadku punktów $B, C, D, E, E', F, F', H, I$; mm
- AB – Odległość pomiędzy punktami A i B w modelu matematycznym, analogicznie w przypadku odległości: $AD, AF, BC, CD, CE, FF', FE, J_1L_1, L_1M_1, N_1O_1, O_1Q_1, O_1P_1, O_1S_1, Q_1R_1, U_1Y_1, Y_1T_1, K_1M_1, J_1K_1, T_1U_1, I_1I_2, J_2L_2, L_2M_2, N_2O_2, O_2Q_2, O_2P_2, O_2S_2, Q_2R_2, U_2Y_2, Y_2T_2, K_2M_2, J_2K_2, T_2U_2$; mm
- I_1x, I_1y, I_1z – położenie punktu I_1 w modelu matematycznym, odpowiednio w osiach x, y oraz z , analogicznie w przypadku punktów $J_1, K_1, L_1, M_1, N_1, O_1, P_1, Q_1, R_1, S_1, T_1, U_1, W_1, Y_1, J_2, K_2, L_2, M_2, N_2, O_2, P_2, Q_2, R_2, S_2, T_2, U_2, W_2, Y_2$; mm
- R – promień bezpieczny rośliny; m
- $S_1W_1x, S_1W_1y, S_1W_1z$ – Odległość pomiędzy punktami S_1 i W_1 w modelu matematycznym rzutowana na osie, odpowiednio x, y i z , analogicznie w przypadku $F'E, CD, S_1U_1, U_1T_1, S_2W_2, S_2U_2, U_2T_2$; mm
- a, b – zmienne współczynniki określające stopień wysunięcia siłownika przesuwu poprzecznego oraz siłowników noży dłutowych w modelu matematycznym w położeniu środkowym oraz siłowników noży dłutowych w położeniu środkowym w modelu matematycznym
- a_{min}, a_0, a_{max} – minimalne, bazowe oraz maksymalne wartości współczynnika a w modelu matematycznym, analogicznie w przypadku $b_{min}, b_0, b_{max}, h_{min}, h_0, h_{max}$
- h – zmienny współczynnik określający zmienność wysokości terenu w modelu matematycznym; mm
- o_p, o_n - odległość końca noży od poprzedniej i od następnej rośliny w osi x ; m
- $r_{T_1x}, r_{T_1y}, r_{T_1z}$ – wartości składowe promienia wodzącego punktu T_1 , odpowiednio w osiach x, y oraz z w modelu matematycznym; mm/s
- $r_{T_1}h_{min}, r_{T_1}h_0, r_{T_1}h_{max}$ – wartości promienia wodzącego punktu T_1 , przy współczynniku h wynoszącym odpowiednio h_{min}, h_0, h_{max} ; mm
- s_0 – odległość wyprzedzenia ruchu noży wahliwych przed rośliną; m
- s_n – odległość pomiędzy bramką wychwytywania roślin w widoku kamery, a początkiem noży pielących, m

t_0, t_{fps}, t_r – czasy reakcji wynikające odpowiednio z: czasu ruchu noży dłutowych, prędkości działania programu, czasu załączania przesuwu poprzecznego; s
 t_n, t_p – czasy opóźnienia ruchu noży dłutowych oraz rozpoczęcia przesuwu poprzecznego po zniknięciu poprzedniej rośliny; s
 v_a – prędkość liniowa siłownika przesuwu poprzecznego w modelu matematycznym; mm/s
 v_b – prędkość liniowa siłowników noży wahliwych w modelu matematycznym; mm/s
 v_C, v_{Cx}, v_{Cy} – prędkości liniowe punktu C , odpowiednio: wypadkowa, rzutowana na oś x , rzutowana na oś y w modelu matematycznym, mm/s
 v_{T1}, v_{T1x}, v_{T1y} – prędkości liniowe punktu T_1 , odpowiednio: wypadkowa, rzutowana na oś x , rzutowana na oś y w modelu matematycznym, mm/s
 v_t – prędkość liniowa sekcji pielnika; m/s
 v_{t1}, v_{t2}, v_{t3} – prędkości liniowe sekcji pielnika podczas symulacji modelu matematycznego; m/s
 v_1, v_2, v_3 – prędkości liniowe pielnika podczas badań na kanale glebowym; km/h
 $\alpha_E, \alpha_F, \alpha_{F'}$ – wartości kątów $F'EF, EFF', FF'E$ w modelu matematycznym, rad
 α_{HI} – kąt pomiędzy osią x , a odcinkiem HI w modelu matematycznym, rad
 $\beta_{Y1}, \beta_{W1}, \beta_{U1}, \beta_{Y2}, \beta_{W2}, \beta_{U2}$ – wartości kątów $W_1Y_1U_1, U_1W_1Y_1, Y_1U_1W_1, W_2Y_2U_2, U_2W_2Y_2, Y_2U_2W_2$ w modelu matematycznym, rad
 Δ_x, Δ_y – zmiana położenia pielnika w kierunku wzdłużnym oraz poprzecznym względem położenia środkowego w modelu matematycznym; mm
 Δh_x – zmiana położenia pielnika w kierunku wzdłużnym pod wpływem zmiany wysokości terenu w modelu matematycznym; mm
 ω_a – prędkość kątowa ramion czworoboku przegubowego przesuwu poprzecznego w modelu matematycznym; rad/s
 ω_b – prędkość kątowa ramion noży dłutowych w modelu matematycznym; rad/s

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost zainteresowania rolnictwem ekologicznym, co skłania rolników do poszukiwania alternatywnych metod ochrony upraw. Jednym z kluczowych czynników wpływających na ten trend jest strategia Unii Europejskiej dotycząca zrównoważonego rozwoju. Celem tej inicjatywy jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku oraz zwiększenie powierzchni upraw ekologicznych do 25% całkowitej powierzchni rolniczej w Unii Europejskiej do 2030 roku. W ramach strategii Unii Europejskiej promowane są praktyki rolnicze ograniczające stosowanie chemicznych środków ochrony roślin. Strategia "Od pola do stołu" zakłada redukcję użycia pestycydów o 50% do 2030 roku, co skłania rolników do poszukiwania alternatywnych metod zwalczania chwastów [1]. W odpowiedzi na te wyzwania, mechaniczne metody usuwania chwastów zyskują na popularności, a specjalistyczne maszyny do mechanicznego pielienia (pielniki) stają się nieodzownym elementem nowoczesnych gospodarstw ekologicznych. Unia Europejska wspiera rolników w przechodzeniu na ekologiczne metody upraw poprzez programy dofinansowań i dotacji. W ramach Wspólnej Polityki Rolnej przewidziano środki finansowe na rozwój rolnictwa ekologicznego, co ma na celu zachęcenie producentów do wdrażania zrównoważonych praktyk rolniczych. Dzięki temu rolnicy mają możliwość inwestowania w nowoczesne technologie, takie jak zaawansowane pielniki do niszczenia chwastów, które nie tylko zwiększają efektywność produkcji, ale także przyczyniają się do ochrony środowiska.

Pielniki od dawna odgrywają kluczową rolę w uprawach rzędowych, eliminując chwasty konkurujące z roślinami uprawnymi o wodę, światło i składniki odżywcze. Tradycyjnie pielniki pracowały wyłącznie w obszarze międzyrzędowym, co wymagało precyzyjnego prowadzenia maszyny przez operatora. Jednak dynamiczny rozwój technologii rolniczych sprawił, że współczesne pielniki stały się bardziej efektywne i precyzyjne dzięki zaawansowanym systemom sterowania. Nowoczesne pielniki są wyposażone w automatyczne systemy sterowania, które pozwalają na precyzyjne prowadzenie narzędzia wzdłuż rzędu roślin. Zastosowanie kamer i czujników optycznych umożliwia identyfikację rzędu uprawnego i dostosowanie ruchu pielnika w czasie rzeczywistym.

Współczesne pielniki oferują znacznie więcej możliwości niż ich starsze odpowiedniki. Do najważniejszych innowacji należą:

- automatyczne prowadzenie wzdłuż rzędu – systemy kamer i czujników pozwalają na precyzyjne dopasowanie ruchu pielnika do rzeczywistego przebiegu rzędu roślin,
- usuwanie chwastów nie tylko w międzyrzędziach, ale również pomiędzy roślinami w rzędzie – specjalne mechanizmy tnące lub obracające się elementy robocze eliminują chwasty blisko roślin uprawnych, minimalizując ryzyko ich uszkodzenia,
- integracja z systemami rolnictwa precyzyjnego – połączenie pielników z bazami danych agronomicznych i mapowaniem pola pozwala na jeszcze bardziej efektywne zarządzanie zabiegami uprawowymi.

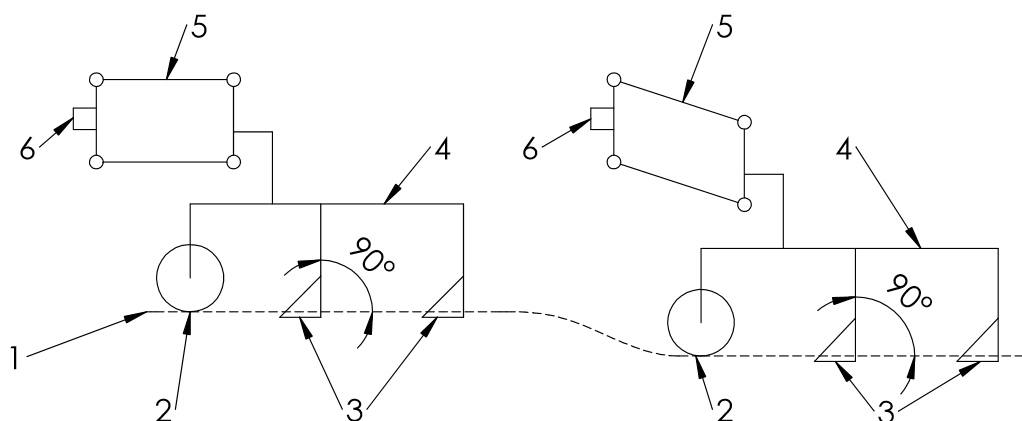
Postęp w technologii pielników przyczynia się do tworzenia nowoczesnego i zrównoważonego rolnictwa, w którym kluczowe znaczenie mają precyzja, wydajność oraz dbałość o środowisko.

2. Przegląd literatury

Pielenie to płytki zabieg uprawowy, który polega na spulchnianiu gleby pomiędzy rzędami roślin, a obecnie coraz częściej i w rzędach roślin, oraz jednoczesnym usuwaniu chwastów poprzez podcinanie ich korzeni. Dzięki temu ulega zniszczeniu zaskorupienie gleby, ograniczając parowanie wody z gleby oraz poprawiając jej przewietrzenie. W zależności od metody uprawy, narzędzia wykorzystywane do pielęgnacji międzyrzędzi można podzielić na dwa główne typy: narzędzia przeznaczone do uprawy płaskiej – czyli pielniki, oraz narzędzia do uprawy w redlinach – czyli obsypniki. Uwzględniając sposób działania elementów roboczych, pielniki dzieli się na: bierne, aktywne, kombinowane oraz termiczne.

2.1. Rozwiązania konstrukcyjne pielników

Pienik zawieszany w najprostszej postaci, posiada ramę składającą się ze wspornika zawieszenia i poprzecznej belki narzędziowej, do której za pomocą jarzm mocowane są sekcje robocze. W takich rozwiązaniach nie ma możliwości poprzecznego przesuwania ramy pielnika w stosunku do kierunku jazdy. W pielnikach najczęściej każdemu międzyrzędziu odpowiada osobna sekcja robocza. Każda sekcja robocza składa się z narzędzi roboczych, najczęściej są to gęsiostopki, noże kątowe, dłuta lub zęby spulchniające oraz z koła podporowego, które kopiuje nierówności terenu. Całość zamontowana jest na ruchomym układzie równoległoboku przegubowego (rys. 1). Taki system pozwala utrzymywać stałą pozycję elementów roboczych względem belki narzędziowej, nawet gdy maszyna porusza się po nierównej powierzchni. Położenie poszczególnych sekcji roboczych na ramie pielnika można regulować, co umożliwia dopasowanie ich do rozstawu rzędów roślin. Ustawienie narzędzi roboczych wewnątrz sekcji można dostosować do szerokości międzyrzędzi z uwzględnieniem strefy bezpieczeństwa rośliny (odległości od narzędzia roboczego do rośliny). W czasie pracy pielnika z równoległobokiem ustawienie elementów roboczych (noży czy gęsiostópek) pozostaje niezmiennie.



Rysunek 1. Zasada działania układu równoległoboku przegubowego w warunkach nierówności terenu: 1 – linia poziomu powierzchni gleby 2 – kółko podporowe, 3 – noże pielące, 4 – belka nośna sekcji, 5 – równoległobok przegubowy, 6 – belka narzędziowa.
Źródło: Opracowanie własne.

Bardziej złożone pieniki zbudowane są z ramy ze wspornikiem zawieszenia, do której ruchomo przymocowana jest belka narzędziowa. Układ połączenia belki narzędziowej z ramą umożliwia jej poprzeczne przesuwanie. Belka narzędziowa ma prowadnice, po których przesuwają się na rolkach sekcje zespołów roboczych. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie połączenia ramy z belką narzędziową za pomocą wahaczy i siłownika hydraulicznego, którego ruch pozwala na poprzeczny przesuw belki narzędziowej.

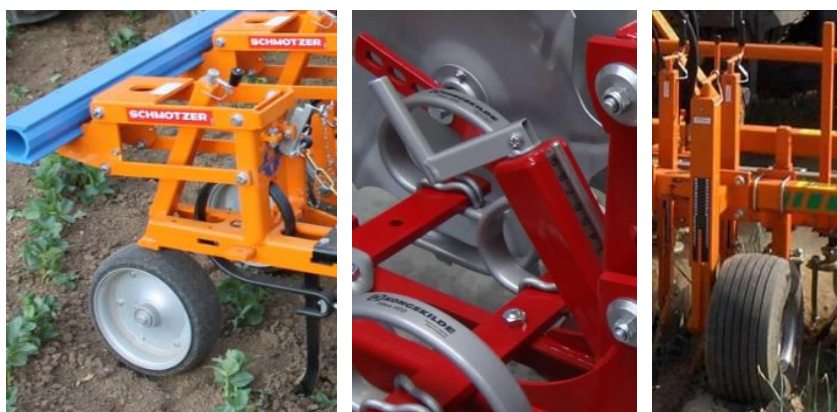
Pielniki najczęściej montuje się jako narzędzia zawieszane z tyłu (rys. 2a) lub z przodu ciągnika (rys. 2b). Istnieją również modele dostosowane do mocowania między osiami specjalistycznych ciągników (rys. 2c) lub nośników narzędzi (rys. 2d). Umieszczenie pielnika z przodu ciągnika lub pomiędzy jego kołami poprawia widoczność całego procesu pielienia, co ułatwia operatorowi kontrolowanie pracy maszyny. W przypadku pielników mocowanych z tyłu korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie specjalnych zaczepów, które umożliwiają jednoczesne połączenie narzędzia z przednim układem zawieszenia ciągnika.



Rysunek 2. Systemy zawieszenia pielników na ciągniku: a – z tyłu, b – z przodu, c – pomiędzy kołami specjalnych ciągników, d – na nośniku narzędzi
Źródło: [2-4].

2.2. Elementy robocze narzędzi do uprawy międzyrzędowej

Głębokość pracy narzędzi roboczych regulowana jest przez zmianę położenia kółek podporowych mocowanych do belki narzędziowej lub zmianę położenia kółek podporowych każdej sekcji roboczej. Do regulacji stosowana jest śruba regulacyjna, co pozwala na bezstopniową regulację głębokości (rys. 3).



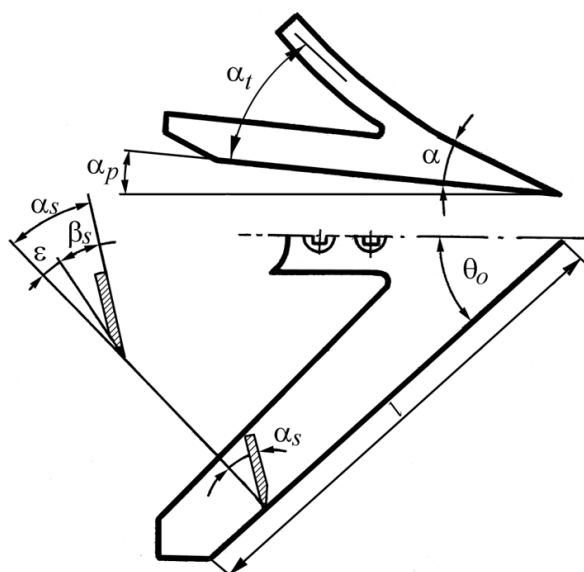
Rysunek 3. Mechaniczna regulacja głębokości pracy
Źródło: [5-7].

Dla pielników biernych Dobrzański i Adamczewski [8] zalecają ustawienie elementów roboczych na głębokości 2–3 cm, w zależności od dynamiki wzrastania chwastów, stanu wilgotności gleby, długości okresu w jakim można wykonać zabieg bez uszkodzenia rośliny uprawnej. Mała głębokość spulchniania jest wystarczająca do podcięcia chwastów i zerwania skorupy, jednocześnie pozostawia zagęszczone głębsze warstwy, co zapewnia podsiąkanie wody do młodych roślin uprawnych. Jak wskazują badania porównawcze pielienia w sadzie przy trzech głębokościach roboczych: 3, 5 i 10 cm z wykorzystaniem aktywnych elementów roboczych, zastosowanie głębokości 5 cm uważa się w tych warunkach za optymalne. Zastosowanie zbyt małych głębokości niesie ze sobą ryzyko małej efektywności niszczenia chwastów, szczególnie wieloletnich. Natomiast zbyt duża głębokość (10 cm) może powodować uszkodzenia systemu korzeniowego pielonych roślin i niepotrzebnie zwiększa opory narzędzia [9].

W pielnikach biernych mogą być stosowane następujące zespoły robocze:

- elementy skrawające: gęsiostopki, noże kątowe jednostronne lewe i prawe oraz dwustronne, noże dłutowe,
- elementy działające pod wpływem oporu gleby: aeratory, koszyki, gwiazdy palcowe, zęby sprężyste,
- elementy doprawiające: pręty sprężyste, wałki strunowe, kółka ugniatające.

Gęsiostopki i noże kątowe używane są do podcinania korzeni chwastów, a także częściowo do spulchniania gleby. Gęsiostopki pielników różnią się od gęsiostopek kultywatorów polowych mniejszymi kątami skrawania oraz grubością, która wynosi 2,5–3,0 mm. Gęsiostopki pielnika mogą mieć szerokość 6–26 cm, a odpowiadające tym szerokościom kąty (rys. 4) mają wartość: kąt wierzchołkowy $2\theta_0 = 55\text{--}70^\circ$, kąt natarcia narzędzia $\alpha = 10\text{--}13^\circ$, kąt skrawania $\alpha_s = 18\text{--}23^\circ$. Zakresy wyższych wartości odnoszą się do gęsiostopek o większych szerokościach roboczych. Istotnym parametrem charakteryzującym gęsiostopkę jest kąt skrawania (α_s), będący sumą kąta przyłożenia (ϵ) i kąta zaostrenia (β_s). Przy czym kąt zaostrenia β_s nie powinien być większy niż 10° , gdyż utrudniałoby to podcinanie korzeni chwastów. Większe szerokości gęsiostopek mogą powodować większe i nierównomierne zgarnianie gleby, co przyczynia się do częstszego zapychania narzędzi.

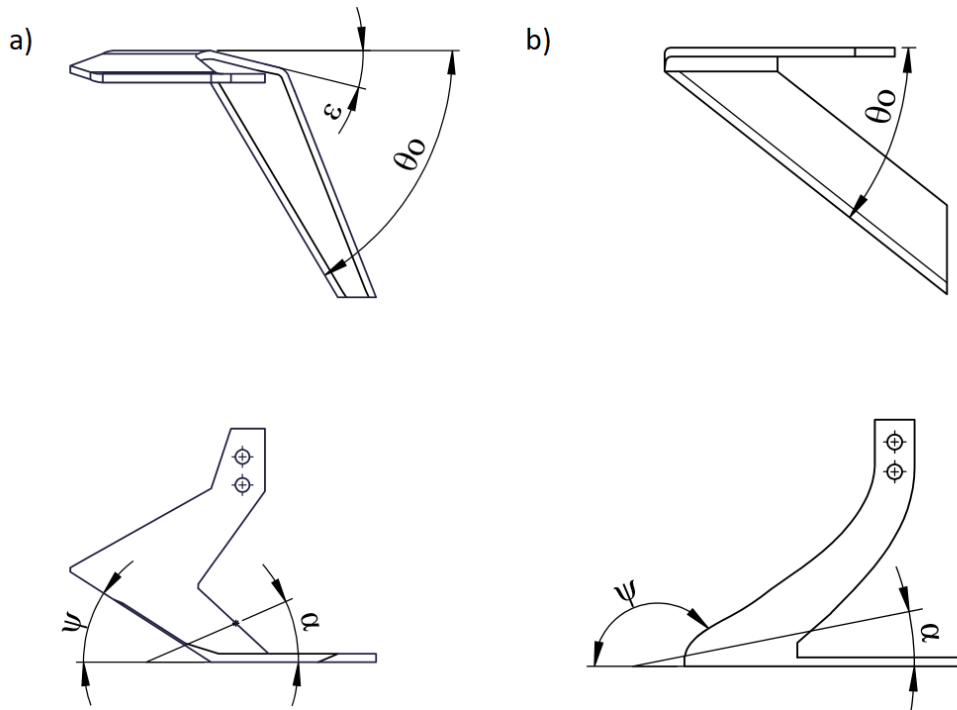


Rysunek 4. Parametry gęsiostopki stosowanej w uprawie międzyrzędowej: $2\theta_0$ – kąt wierzchołkowy, α – kąt natarcia narzędzia, α_s – kąt skrawania, β_s – kąt zaostrenia, ϵ – kąt przyłożenia, α_t – kąt nachylenia narzędzia, α_p – kąt pochylenia lemiesza, l – długość krawędzi skrawającej
Źródło: [10].

Lisowski i in. [10] w swoich badaniach analizowali wydajność trzech narzędzi typu gęsiostopka, A105, B135 i C200, odpowiadających szerokościom narzędzi wynoszącym odpowiednio 105, 133 i 202 mm. Narzędzia były połączone dwoma elastycznymi zębami; elastyczny ząb typu S i sztywny ząb typu VCO o sztywności $5,3$ i $8,3 \text{ N} \times \text{m}^{-1}$ i ustawienie kąta przyłożenia narzędzia odpowiednio 8° i 2° . Wyniki badań glebowych wskazały, że najlepsza konstrukcja zębów dla niskiego oporu właściwego i płytkiej uprawy powinna charakteryzować się małym kątem natarcia narzędzia i odpowiadać jego kątowi skrawania. Słowiński i Walczyk [11] w opublikowanych wynikach pomiaru oporów roboczych pielnika metodą pomiaru oporów pojedynczych elementów roboczych przy pomocy tensometrycznej ramy pomiarowej oraz metodą przeciągania całego agregatu podają, że średnia wartość oporów gęsiostopki w poziomie wyniosła $72,1 \text{ N}$ przy współczynniku zmienności $28,71\%$ (w pionie wartość siły była mniejsza i wynosiła $24,9 \text{ N}$). W przypadku redlicy średnia wartość oporów w poziomie wyniosła 99 N przy współczynniku zmienności $19,4\%$ (w pionie wartość siły była mniejsza i wynosiła $39,6 \text{ N}$) [11].

Noże kątowe posiadają dwa ostrza pionowe i poziome (rys. 4). Ostrze poziome może być z prawej lub z lewej strony ostrza pionowego, wtedy to jest nóż kątowy prawy lub lewy. Kąt nachylenia krawędzi przedniej (ψ) ostrza pionowego może być mniejszy od 90° , zwykle $\psi = 25\text{--}30^\circ$ (rys. 5a), lub większy od 90° zwykle $\psi = 155\text{--}160^\circ$ (rys. 5b).

W celu zabezpieczenia przed przysypywaniem małych roślin spulchnioną glebą, ostrze pionowe odchyła się od kierunku ruchu w zakresie $\varepsilon = 5-15^\circ$. Szerokość noży kątowych zwykle nie przekracza 250 mm.



Rysunek 5. Noże kątowe: a – z wygiętym ostrzem pionowym, kąt nachylenia krawędzi przedniej – $\psi < 90^\circ$; b – z płaskim ostrzem pionowym, kąt nachylenia krawędzi przedniej – $\psi > 90^\circ$; θ_0 – kąt wierzchołkowy, α – kąt natarcia narzędzia, ε – kąt odchylenia ostrza pionowego, b – szerokość robocza

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [12].

Sekcje robocze wyposażone w gęsiostopki lub noże kątowe oraz międzyrzędowe wałki strunowe mogą powodować, przy zbyt dużej wilgotności gleby, niekorzystne „zamazywanie” gleby. Taki zestaw daje lepszy efekt agrotechniczny, gdy wałki kruszą podciętą nożami glebę i wytrząsają z niej chwasty.

W przypadku większej wilgotności gleby i zwięzłości gleby, lepiej sprawdzają się dłuta i zęby spulchniające z redlicami (rys. 6). Ich użycie jest uzasadnione w celu przyspieszenia osuszania gleby po intensywnych opadach, na polu zalanym wodą, gdzie rośliny z powodu braku powietrza w glebie „duszą się”. W takim przypadku narzędzia te należy prowadzić głębiej, środkiem międzyrzędzia. Takie głębokie zabiegi prowadzone wąskim pasem w środku międzyrzędzia osuszają glebę, ale powodują wzrost zachwaszczenia wtórnego na skutek wyciągnięcia nasion chwastów z głębszych warstw.

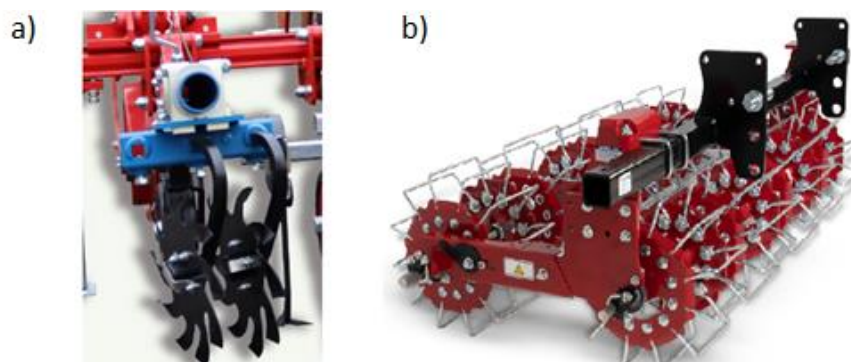
Elementy robocze pielników mogą być montowane na trzonkach o różnych właściwościach: sztywnych, półsztywnych lub sprężynowych. Mocowanie sprężynowe

pozwala na skuteczniejsze kruszenie zbrylonej gleby oraz chroni narzędzie przed uszkodzeniem w przypadku kontaktu z kamieniem. Zęby sprężynowe w trakcie pracy wibrują, co poprawia efektywność ich działania.



Rysunek 6. Sekcja pielnika Bomet Nembus. 1 – ząb spulniający z redlicą, 2 – ząb sprężysty gęsiostopką
Źródło: [13].

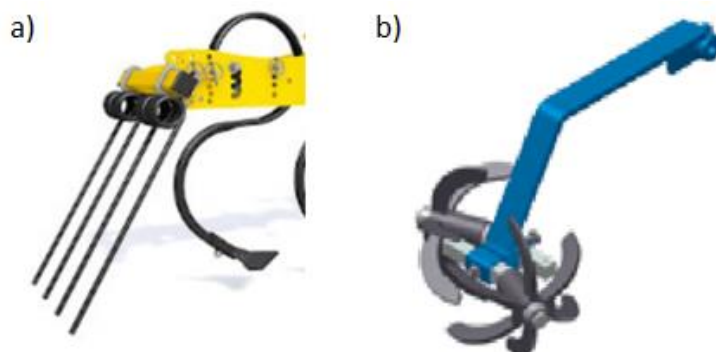
W przypadku spulchniaczy obrotowych, znanych również jako pielniki obrotowe lub aeratory (rys. 7a), napęd elementów roboczych opiera się na oporze gleby. Stosuje się je zarówno do pielęgnacji w międzyrzędziach, jak i w rzędach roślin uprawnych. Elementy robocze składają się z tarcz z wyprofilowanymi zębami. Pielniki obrotowe umożliwiają regulację kąta ustawienia tarcz z zębami w stosunku do roślin. Na glebach o średniej i dużej zwężności, dobre efekty pracy uzyskuje się po dwóch przejazdach, przy odpowiednim obciążeniu sekcji. Alternatywą jest pielnik z segmentami koszykowymi (rys. 7b), gdzie głównymi elementami roboczymi są koszyki ułożone jeden za drugim. Obrót koszyków odbywa się pod wpływem oporu gleby. Koszyki są zamontowane na dwóch poziomych wałach, które są połączone przekładnią łańcuchową o przełożeniu około 2. Pod wpływem oporu gleby pierwszy koszyk zaczyna się obracać, napędzając kolejny, co powoduje ich szybszy obrót. Koszyki mogą mieć różną średnicę zewnętrzną. Głębokość robocza wynosi od 30 mm do 70 mm, a szerokość robocza koszyków zależy od szerokości międzyrzędzi roślin, mieszcząc się w przedziale od 76 mm do 355 mm. Typowa prędkość robocza waha się od 6 km/h do 13 km/h, przy czym wyższe prędkości mogą powodować zasypywanie roślin uprawnych ziemią.



Rysunek 7. Pielniki obrotowe o poziomej osi obrotu: a – tarcze aeratora, b – koszyki.
Źródło: [14-15].

Najlepsze efekty w pracy pielników uzyskuje się, gdy stosuje się kombinowane metody zwalczania chwastów [16]. Dlatego oprócz głównych elementów roboczych w pielnikach stosuje się również inne bierne elementy doprawiające (rys. 8). Segmenty zgrzebeł wykonane są z elastycznych prętów, które drgają podczas ruchu pielnika w różnych kierunkach w trakcie pracy maszyny. Niszczą chwasty w międzyrzędziach oraz spulchniają glebę na całej szerokości roboczej narzędzia. Palce sprężyste działają selektywnie, ponieważ rośliny uprawne są lepiej zakorzenione niż chwasty. Jednak ta metoda wymaga częstszego stosowania pielników, aby niszczyć chwasty w początkowej fazie ich wzrostu [17].

Segmenty wałów strunowych mają za zadanie rozkruszenie brył gleby podciętych nożami i wydzielenie z nich chwastów. Wałki wyrównują powierzchnię gleby, nieznacznie ją ugniatając. Elementy doprawiające są często montowane na końcu ruchomej dźwigni, wymagają docisku do gleby za pomocą sprężyny lub regulowanego obciążnika.



Rysunek 8. Elementy doprawiające stosowane w uprawie międzyrzędowej: a – zgrzebło, b – wałki strunowe.
Źródło: [3,18].

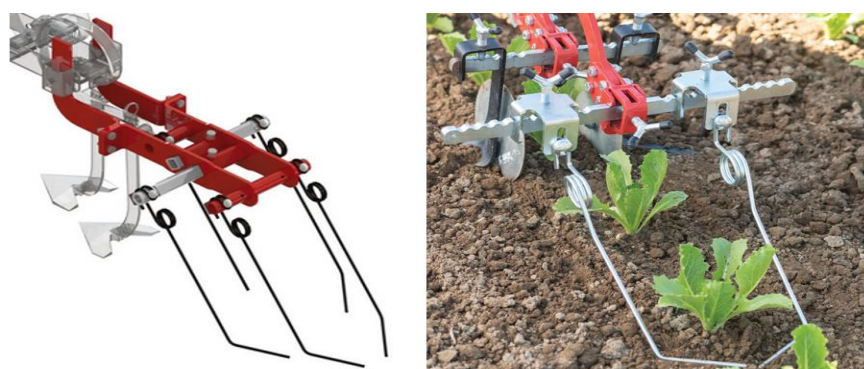
Prezentowane narzędzia robocze skutecznie niszczą chwasty w międzyrzędziach, pozostawiając jednocześnie strefy bezpieczeństwa wokół roślin uprawnych. W ostatnich latach coraz częściej w pielnikach stosuje się elementy, które usuwają chwasty nie tylko w międzyrzędziach, ale także u podstawy roślin lub w samych rzędach. Pielnik palcowy (rys. 9) wyposażony jest w półsftywne palce wykonane z gumy lub tworzywa sztucznego, które zamontowane są na stalowych tarczach. Kąt ustawienia tarcz jest regulowany w zależności od potrzeb [19]. Obracające się tarcze niszczą chwasty u podstawy roślin i wyrzucają je poza rzędy upraw. Pod palcami znajdują się stalowe zęby, które spulchniają glebę w międzyrzędziach. Tego typu pielnik sprawdza się szczególnie na glebach organicznych o luźnej strukturze, skutecznie eliminując chwasty w początkowej fazie ich wzrostu. Jego skuteczność maleje, gdy rzędy są silnie zachwaszczone. Dodatkowo, praca pielnika w obrębie rzędów roślin może pobudzać chwasty do wschodów. Aby zwiększyć efektywność, można zmniejszyć odstęp między tarczami sąsiadujących zespołów oraz sprawić, by palce przechodziły bardzo blisko roślin, jednak istnieje ryzyko uszkodzenia roślin uprawnych. Jest to technika wymagająca precyzyjnego ustawienia, a odpowiednia prędkość robocza pielnika ma kluczowe znaczenie. Zaleca się prędkość roboczą na poziomie 8–10 km/h oraz głębokość pracy wynoszącą od 12 do 19 mm. Dzięki sztywnemu mocowaniu osi gwiazdy można stosować długie trzonki, co umożliwia większy prześwit pod ramą i pozwala na zastosowanie narzędzia nawet wtedy, gdy rośliny, takie jak kukurydza, są już wyższe i mają silniej rozwinięty system korzeniowy niż chwasty.



Rysunek 9. Gwiazdy palcowe doprawiające glebę w rzędzie roślin.
Źródło: [5,20].

Kolejnym rozwiązaniem narzędzia pracującego w pobliżu rzędu roślin jest pielnik torsiyjny (rys. 10). Wyposażony jest w dwa zęby prętowe, wygięte w kierunku rzędu

roślin. Zęby te wykonane są z drutu sprężynowego o średnicy 5–6 mm lub 9–10 mm, w zależności od intensywności pracy. Wybór średnicy drutu zależy od rodzaju gleby oraz typu uprawianych roślin. Podczas pracy zęby wibrują, a ich drgania powodują wyrwanie i podcinanie chwastów. Pręty mocowane są na poprzecznych belkach, dzięki czemu można je przybliżać lub oddalać od rzędu roślin w zależności od etapu wzrostu roślin. W początkowej fazie, gdy rośliny są słabo ukorzenione, pręty pracują blisko roślin w obrębie rzędu. W późniejszym okresie, kiedy rośliny rosną, pręty mogą krzyżować się w rzędzie, co zwiększa efektywność pracy. Młodsze chwasty zostają usunięte, a gdy pręty napotkają silniej ukorzenioną roślinę, rozchylają się, omijając ją, a następnie wracają do swojej pozycji roboczej. Badania wykazały, że stosowanie tego narzędzia, nawet przy słabo ukorzenionych roślinach, zmniejsza rozprzestrzenianie się chwastów w rzędach o 60–80% [21].



Rysunek 10. Palce pielnika torsiyjnego.
Źródło: [20,22]

Podczas pracy narzędzi uprawowych na elementy robocze oddziałują siły wynikające z oporu gleby, który jest równoważony przez siłę pociągową. Energia zużywana przy uprawie gleby zależy od właściwości fizycznych i typu gleby, zastosowanych elementów roboczych pielnika oraz parametrów jego ustawień eksploatacyjnych. Przykładowo, opór roboczy dla jednej gęsiostopki wynosi około 0,25 kN, a dla noża jednostronnego 0,2 kN. Opór jednostkowy pielnika zależy od szerokości pracy narzędzia oraz rodzaju gleby: na glebach lekkich wynosi 0,35–0,5 kN·m⁻¹, na glebach średniozwięzłych 0,5–0,7 kN·m⁻¹, a na glebach ciężkich 0,7–1,5 kN·m⁻¹ [12]. Opór roboczy narzędzi jest także uzależniony od ich kształtu, głębokości pracy oraz zwięzłości gleby [23–27]. Badania Owsiaika i in. [28] wykazały, że różnice pomiędzy wartościami sił rejestrowanych a tymi obliczonymi przy stałej głębokości pracy redliczki kultywatora mogą wynosić nawet do 20% i zależeć od tej głębokości. Takie błędy mogą występować przy obliczaniu wpływu głębokości

skrawania na opory, gdy nie stosuje się systemu do rejestracji głębokości. Według Frída i in. [26] zapotrzebowanie na energię przez zęby kultywatora polowego rośnie liniowo wraz z głębokością pracy. Na wartość oporów roboczych wpływa także prędkość robocza [29]. W badaniach laboratoryjnych stwierdzono, że przy stałych parametrach gleby i narzędzia, zwiększenie głębokości pracy w przedziale 0,03-0,05 m oraz prędkości roboczej od $0,84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $1,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wystąpił wzrost poziomej składowej oporu skrawania gleby gęsiostopką o szerokości 135 mm [30].

W badaniach polowych narzędzi prostych i zaokrąglonych przy prędkościach roboczych w przedziale 5,4–64,8 km/h ustalono prędkość krytyczną (10,8–18 km/h), powyżej której siły oporu wzrastają wolniej [31]. Przeprowadzanie szczegółowej analizy dynamicznego oddziaływania narzędzi uprawowych na glebę przy dużych prędkościach roboczych napotyka trudności, związane z opisaniem pól naprężeń, przemieszczeń oraz prędkości na styku narzędzia z glebą. Brakuje również pełnej teorii dotyczącej wpływu wytrzymałości gleby na siłę uciągu. Znane modele teoretyczne nie dostarczają wystarczających danych do optymalnego przygotowania narzędzi uprawowych do pracy przy większych prędkościach. Jednym z rozwiązań mogących częściowo rozwiązać te trudności jest zastosowanie metody elementów skończonych, pozwalającej na obliczenie siły uciągu oraz pól naprężeń, przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń w miejscu kontaktu narzędzia z glebą, chociaż metoda ta była częściej stosowana przy obliczeniach dla orki lub kultywatorów polowych [32-35].

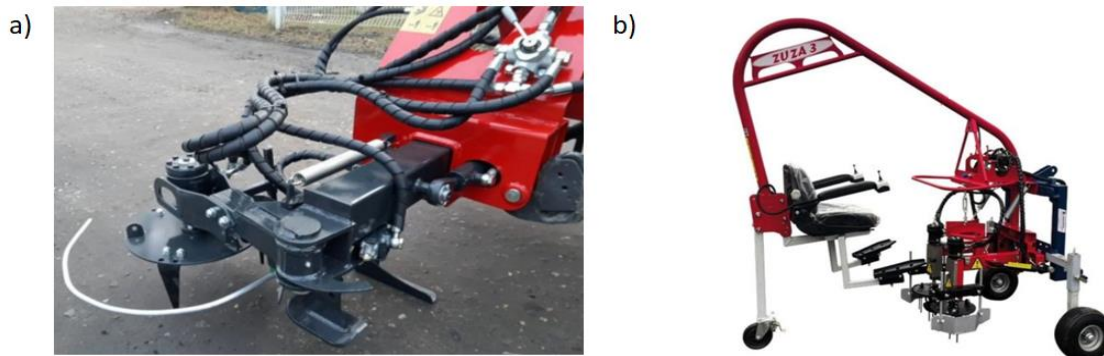
W produkcji roślinnej dąży się do uzyskania wyższej wydajności, co wiąże się ze zwiększaniem szerokości maszyn i prędkości roboczych agregatów. Wydajność pracy zależy od ujednolicenia międzyrzędzi w uprawach zagonowych oraz precyzyjnego prowadzenia narzędzi. Prędkość robocza zależy od warunków pracy oraz używanych narzędzi. W przeszłości prędkości robocze 3–6 km/h zalecano do pracy uprawach rzędowych o słabej widoczności, natomiast wyższe (6–10 km/h) w przypadku rzędów dobrze rozwiniętych i widocznych, co było również związane z możliwością percepcji operatora. Wprowadzenie urządzeń automatyzujących prowadzenie narzędzi umożliwia zwiększenie prędkości roboczej. Firma Kongskilde zaleca prędkości robocze 8–12 km/h przy pracy z narzędziami wyposażonymi w trzonek sprężysty, wskazując, że przy niższych prędkościach efekt kruszenia gleby jest niezadowolający, a przy wyższych prędkościach może dochodzić do niepożądanego rozpylania gleby, zwłaszcza gdy jest sucha. Zastosowanie wyższych prędkości w uprawie międzyrzędowej może stanowić

tańszą alternatywę dla stosowania herbicydów, nawet przy wielokrotnych przejazdach [36]. Wraz ze wzrostem prędkości pracy agregatów, pojawia się potrzeba automatyzacji prac polowych, związana z ograniczonymi możliwościami percepcji operatora przy dużych prędkościach i szerokich maszynach oraz z koniecznością precyzyjnego prowadzenia narzędzia w międzyrzędach. Dlatego opracowano wiele rozwiązań wspomagających operatorów lub automatyzujących manewrowanie agregatami [37-44]. Badania pokazują, że takie rozwiązania zapewniają wysoką dokładność prowadzenia agregatów, choć były przeprowadzane przy niższych prędkościach roboczych, zbliżonych do tych obecnie stosowanych w uprawach roślin.

2.3. Pielniki z aktywnymi elementami roboczymi

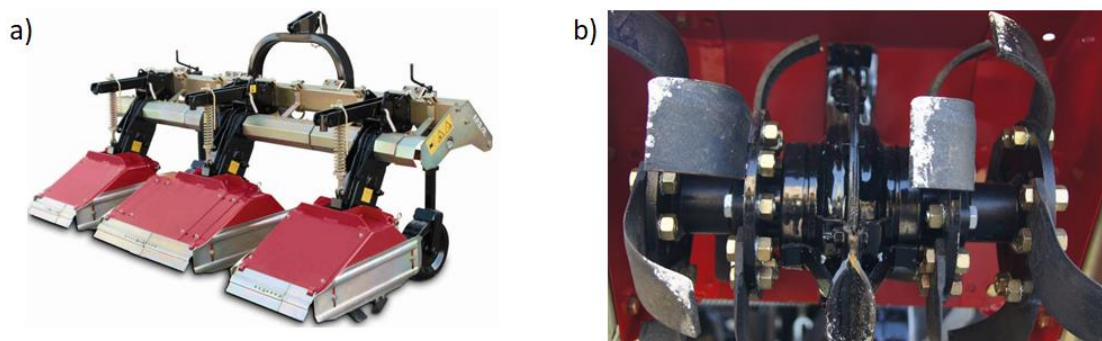
Pielniki z aktywnymi elementami roboczymi, posiadają wirniki, których wały mogą pracować w osi pionowej lub poziomej. W odróżnieniu od pielników biernych, pielniki z aktywnymi elementami roboczymi w jednym przejeździe pozwalają na uzyskanie wysokiej jakości uprawy, skutecznie niszczą chwasty, umożliwiają pracę w trudnych warunkach wilgotnościowych gleby, dobrze mieszają nawozy oraz zmniejszają liczbę wymaganych zabiegów [45]. Maszyny te, wykazują lepszą efektywność w porównaniu do narzędzi z biernymi elementami roboczymi, ponieważ są bardziej odporne na zapchania. Intensywność pracy tych maszyn jest duża, dlatego należy pamiętać o tym, że cząstek gleby nie można rozbijać silniej niż jest to konieczne dla ograniczenia występowania chwastów.

Pielniki o pionowej osi obrotu mogą być wyposażone w zespoły znane z bron wirnikowych w postaci zębów prostych lub tarczy wyposażonych w zęby (palce) sprężyste (rys. 11). Napęd na tarczy uzyskują od silników hydraulicznych zasilanych z hydrauliki ciągnika.



Rysunek 11. Pielnik o pionowej osi obrotu wyposażony w: a – zęby brony wirnikowej, b – palce sprężyste.
Źródło: [46,47].

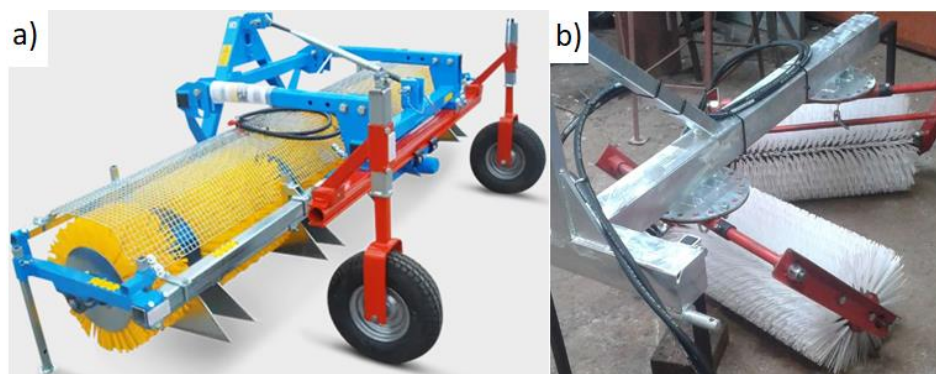
Pielniki o poziomej osi obrotu budową są zbliżone do glebogryzarki, która posiada oddzielne sekcje pielące (rys. 12). Każda sekcja zbudowana jest z wału z tarczami, na których mocowane są zęby łukowe. Szerokość sekcji zależy od ilości tarcz z zębami i jest stała. Szerokość robocza całego agregatu może być dopasowana przez przemieszczenie sekcji na ramie. Sekcje mogą mieć szerokość od 28 cm do nawet 75 cm i mogą być wyposażone w płozy lub kółka kopiujące. Dzięki takiemu rozwiązaniu sekcje mogą się dostosowywać do nierówności podłoża niezależnie od siebie. Przy takiej koncepcji budowa jest bardziej skomplikowana. Każda z sekcji ma oddzielnie przekazywany napęd poprzez przekładnię łańcuchową od wału znajdującego się na całej szerokości maszyny, przekładni kątownej i wału przegubowo-teleskopowego. Dodatkowo sekcje są dociskane do gleby za pomocą sprężyn.



Rysunek 12. Pielnik o poziomej osi obrotu: a – widok pielnika, b – widok zespołu roboczego.
Źródło: [48].

Oddzielną grupę stanowią pielniki szczotkowe, w których elementem roboczym są wirujące wały ze szczotkami, wykonane z półsztywnych “Włósów” z tworzywa sztucznego. Zastosowanie elastycznych szczotek pozwala na budowę pielników z wirnikami ustawionymi poziomo, pionowo i pod dowolnym kątem, pozwalając na dostosowanie konstrukcji pielnika do specyfiki uprawy. Ustawione w osi poziomej usuwają chwasty między rzędami, a gdy rośliny są chronione specjalnymi osłonami mogą pracować bardzo blisko rzędów (rys. 13). Głębokość robocza wynosi od 3 do 5 cm. W niektórych rozwiązaniach tych maszyn wał pielnika, wykonany jest w postaci wąskich tarcz ze szczotkami, nałożonymi na wał. Rozwiązanie to pozwala uzyskać różny rozstaw rzędów i międzyrzędzi. Powoduje jednak wysoki nakład pracy przy zmiennej szerokości międzyrzędzi. Wadą tych pielników jest konieczność utrzymania równej powierzchni pola. Szczotki ustawione poziomo mogą również różnić się kątem ustawienia względem

kierunku jazdy (rys. 13). Przy agregacie zaopatrzonej w dwie szczotki jedna za drugą ustawienie ich pod różnymi kątami umożliwia wzajemne uzupełnianie się obu szczotek. Ze względu na różny kąt szczotka znajdująca się z tyłu może wykonać zabieg pielienia w miejscach, do których pierwsza szczotka nie miała albo miała utrudniony dostęp.



Rysunek 13. Pielnik szczotkowy o poziomej osi obrotu: a – widok pielnika, b – widok zespołu roboczego.
Źródło: [49,50].

Badania porównawcze różnych metod pielienia, w tym z użyciem narzędzi biernych, oscylacyjnych, wielonożowych zespołów pielących oraz glebogryzarki wykazały, że narzędzia bierne zapewniają skuteczność pielienia na poziomie 50-70% (w przypadku wszystkich chwastów), co jest najniższym wynikiem wśród badanych technologii [51]. Choć aktywne elementy robocze dają lepsze rezultaty, ich praca wymaga niskich prędkości roboczych, aby nie rozpylać gleby, co ogranicza ich wydajność.

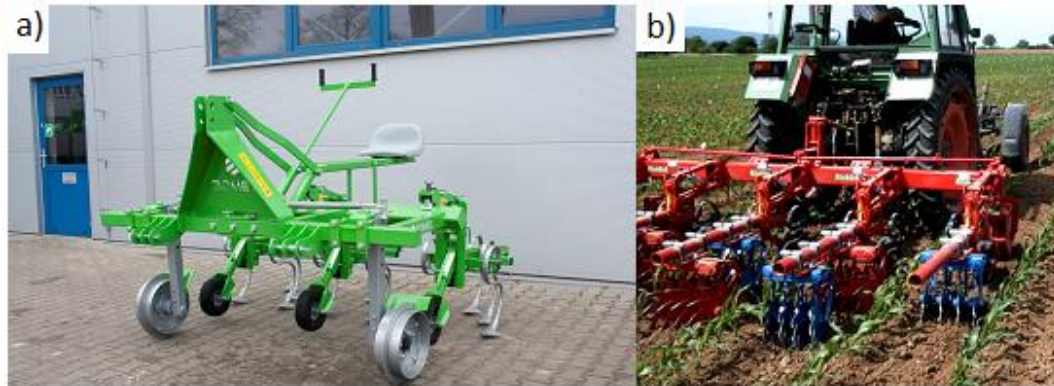
2.4. Systemy prowadzenia pielnika wzdłuż rzędów

Aby utrzymać właściwy tor pracy elementów roboczych pielnika, stosuje się zarówno systemy prowadzenia ręczne, jak i automatyczne. Pozwalają one na efektywną pracę nawet na polach, gdzie rzędy roślin nie są wysiane w idealnych liniach, chroniąc przy tym rośliny i zapewniając oczekiwane rezultaty.

W przypadku systemu ręcznego, kółka podporowe są przymocowane do ramy pielnika w sposób umożliwiający ich obrót (rys. 14a). Osie tych kółek połączone są z dźwignią sterowaną przez operatora za pomocą ramion i drążków. Dodatkowo, przy takim systemie, do ramy pielnika montuje się siedzisko dla osoby obsługującej.

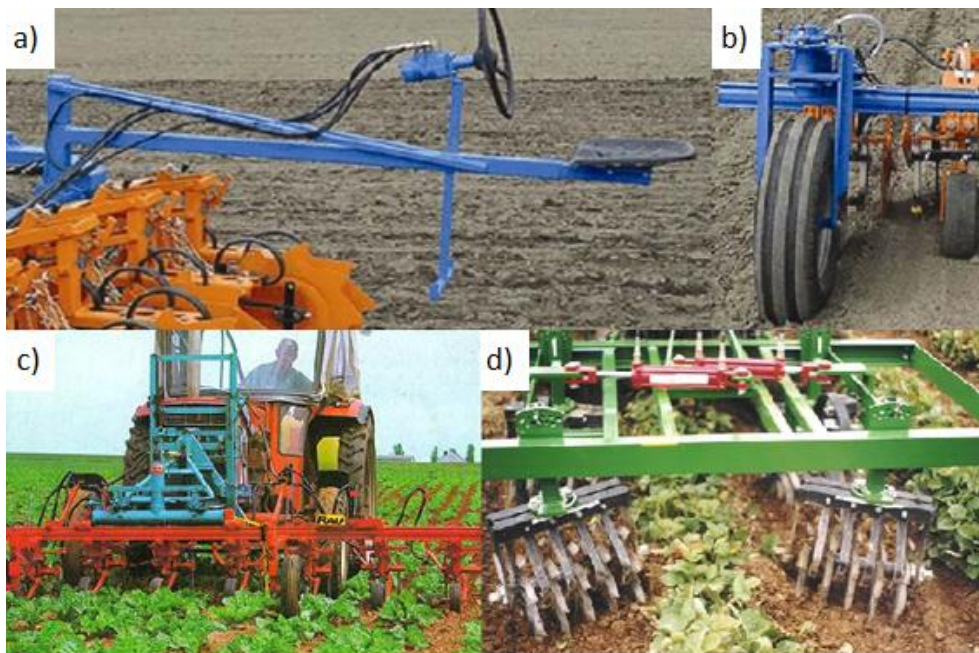
W systemie automatycznym nadążnym prowadzenie odbywa się za pomocą mechanizmu podążającego za ruchem ciągnika. W tym przypadku górny łącznik jest połączony z pionową osią, która za pośrednictwem drążków i ramion steruje obrotem

kółek podporowych (rys. 14b). Dzięki temu, na polach obsianych w sposób nieregularny, pielnik porusza się dokładnie po śladzie ciągnika.



Rysunek 14. Systemy kierowania pielnikiem: a – ręczne kierowanie, b – podążanie torem ciągnika za pomocą mechanizmu dźwigniowego.
Źródło: [13,22].

Ręczne sterowanie pielnikiem może być dodatkowo wyposażone w układ hydrauliczny. W takim przypadku na osi wału kierowniczego, którym operuje osoba obsługująca pielnik, zamontowany jest pompo-rozdziałacz (rys. 15a). Obracanie kołem kierowniczym powoduje przepływ oleju do układu odpowiedzialnego za zmianę położenia kółka podporowego (rys. 15b). W przypadku pielników montowanych z przodu ciągnika, często stosuje się przesuwne ramy umieszczone między układem zawieszenia ciągnika a narzędziem. Te ramy są poruszane za pomocą siłownika hydraulicznego o działaniu dwustronnym. Operator może sterować poprzecznym przesunięciem pielnika względem ciągnika bezpośrednio z kabiny. Specjalnym rozwiązaniem jest pielnik, w którym każdy zespół roboczy prowadzony jest indywidualnie, w zależności od rozstawu rosnących roślin. Tego typu konstrukcja znajduje zastosowanie przy uprawach o dużych odstępach między rzędami (rys. 15d).



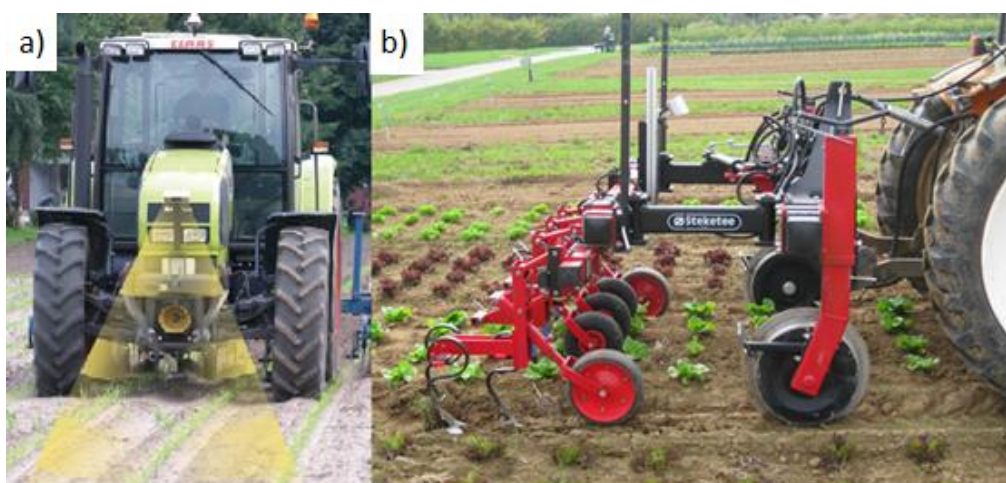
Rysunek 15. Systemy kierowania pielnikiem: a – sterowanie hydrauliczne przez operatora jadącego na pielniku, b – kółko podporowe sterowane hydraulicznie, c – sterowanie hydrauliczne przez operatora jadącego na ciągniku, d – prowadzenie indywidualne w zależności od szerokości rzędu roślin.
Źródło: [5].

Pełne systemy automatyczne stosowane w pielnikach są wyposażone w kamery monitorujące rzędy roślin lub identyfikujące pojedyncze rośliny oraz w system sterowania kontrolujący zarówno pracę ciągnika, jak i pozycję samego pielnika (przesuwanie go względem ciągnika).

W pierwszym wariantcie system wykorzystuje kamery do wykrywania ścieżek przejazdu i rzędów roślin, a następnie automatycznie prowadzi ciągnik po polu (rys. 16a). Tego typu rozwiązanie ogranicza ryzyko uszkodzeń roślin, odciąża operatora maszyny i zwiększa efektywność ekonomiczną całego procesu uprawy.

Drugie rozwiązanie bazuje na cyfrowych kamerach zamontowanych w szczelnych obudowach na ramie pielnika (rys. 16b). Kamery nieustannie rejestrują obraz rzędów roślin lub śladu rowka wyznaczonego przez znacznik podczas siewu. Obraz trafia do komputera, który przekształca go w linię odniesienia – równoległą do rzędów roślin lub śladu znacznika. System na bieżąco kontroluje pozycję pielnika względem tej linii. Jeśli pojawia się potrzeba korekty położenia, komputer wysyła odpowiednie sygnały do układu hydraulicznego sterującego pozycją narzędzia. Systemy tego typu mogą wykorzystywać jedną lub dwie kamery. Układ z pojedynczą kamerą, stosowany głównie w uprawach kukurydzy i warzyw, jest obecnie coraz rzadziej spotykany. Z kolei system z dwiema kamerami jest polecany w uprawie buraków oraz innych roślin, gdzie mogą

występować przerwy w rzędach spowodowane nierównomiernymi wschodami. W takim przypadku każda z kamer obserwuje inny rząd, co zwiększa szansę na utrzymanie poprawnej linii odniesienia. Do prowadzenia pielnika wzdłuż rowka wyznaczonego przez znacznik stosuje się system łączący kamerę z laserem. Laser pozwala na bezdotykowe śledzenie przebiegu rowka, co umożliwia wykonywanie zabiegów pielęgnacyjnych jeszcze przed wschodami roślin. Taka możliwość jest bardzo cenna, ponieważ w pieleniu kluczową zasadą jest zwalczanie chwastów lub ograniczanie ich rozwoju, zanim staną się widoczne [52,53]. Wykonywanie zabiegów przed wschodami, gdy chwasty dopiero zaczynają się pojawiać lub są w fazie liścieni, cechuje się najwyższą skutecznością [54].



Rysunek 16. Automatyczne systemy prowadzenia pielników: a – automatyczne prowadzenie całego agregatu ciągnik + pielnik, b – kamera sterująca belką narzędziową.
Źródło: [55,56].

Automatyczne systemy współpracują z mechanizmami wykonawczymi, które odpowiadają za poprzeczne przesuwanie pielnika. Do najczęściej stosowanych rozwiązań należą:

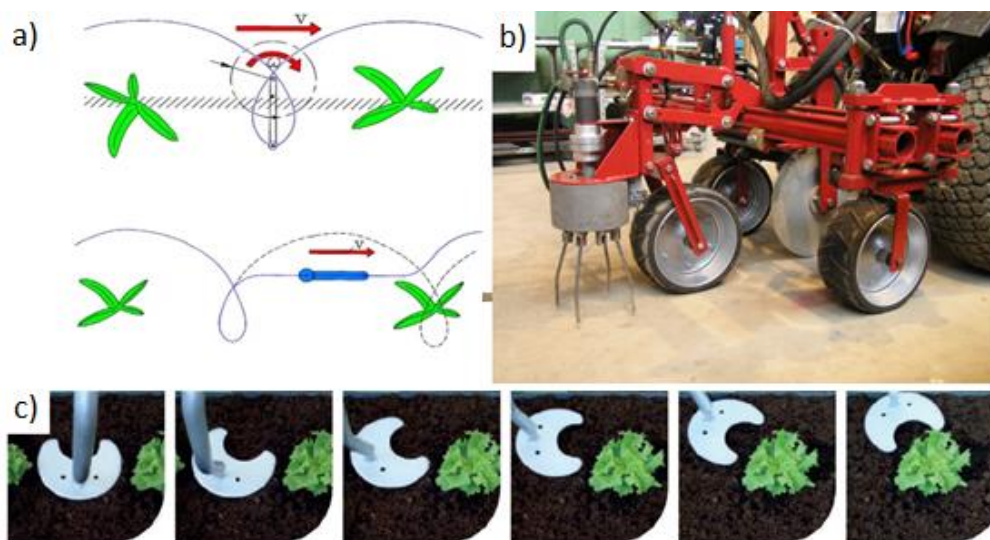
- tarczowy krój prowadzący, który jest obracany wokół pionowej osi za pomocą siłownika hydraulicznego,
- rama pielnika przymocowana do belki narzędziowej za pomocą wahaczy, a jej pozycja regulowana jest siłownikiem hydraulicznym,
- przesuwna rama umieszczona pomiędzy układem zawieszenia ciągnika z zawieszonym narzędziem, poruszana poprzecznie względem ciągnika przez dwustronny siłownik hydrauliczny,

- siłownik hydrauliczny zamocowany pomiędzy tylnym mostem ciągnika a dolnym ciągnem układu zawieszenia, który odpowiada za zmianę położenia narzędzia.

2.5. Systemy do zwalczania chwastów w rzędach

W uprawach rzędowych tradycyjne pielniki są w stanie skutecznie usuwać chwasty z około 80% powierzchni pola. Jednak problemem pozostają chwasty rosnące bezpośrednio między roślinami uprawnymi oraz wokół nich. To właśnie te chwasty mają największy wpływ na rozwój roślin i ostateczny plon. Z tego powodu istotnym kierunkiem rozwoju w technologii pielników jest tworzenie maszyn zdolnych do pracy bezpośrednio w rzędach roślin. Największym wyzwaniem jest skonstruowanie urządzenia, które będzie uniwersalne – przystosowane do różnych gatunków roślin, zróżnicowanych rozstawów rzędów oraz zmiennego odstępów roślin w rzędzie, a jednocześnie uwzględni fazy ich wzrostu. Powstające w tym obszarze maszyny stanowią nową kategorię urządzeń – łączą one cechy klasycznych pielników międzyrzędowych z precyzyjnymi narzędziami działającymi bezpośrednio w rzędach roślin [30,53]. Jednym z pierwszych rozwiązań są pielniki wykorzystujące cykloidalny ruch elementów roboczych [57]. Zostały one opracowane z myślą o pieleniu kukurydzy przez Osnabrück University we współpracy z firmą Amazone Werke [58]. Kluczowym elementem pielnika jest pionowy wirnik, do którego może być przymocowanych do ośmiu ramion obracających się wokół osi wirnika o średnicy 0,234 m [59]. W połączeniu z ruchem ciągnika, obrót ramion wirnika powoduje, że elementy robocze poruszają się po torze cykloidalnym (rys. 17a, 17b). Każde ramię jest sterowane indywidualnie za pomocą zaworu elektromagnetycznego, co pozwala na jego wyłączenie w odpowiednim momencie, aby ominąć roślinę uprawną.

Na bazie tego rozwiązania opracowano kolejny system przeznaczony do pielenia bezpośrednio w rzędach roślin wykorzystujący ruch cykloidalny. Rozwiązanie to zostało skomercjalizowane pod marką Garford. Nad linią roślin umieszczono obrotowe, pojedyncze ramiona wyposażone w noże, zamocowane na wykorbionym wale, który jest napędzany hydraulicznie (rys. 17c). Pracę systemu wspomagają dwie kamery, które monitorują rzędy i rozpoznają poszczególne rośliny. Na podstawie danych z kamer, ramiona są kierowane do wnętrza rzędu, aby usuwać chwasty, lub wycofywane, gdy w ich zasięgu znajduje się roślina uprawna [60,61].



Rysunek 17. Pielniki o cykloidalnym ruchu narzędzia, a – istota działania, b – rozwiązanie z wyłączanym ramieniem, c – fazy pracy elementu roboczego Garford.
Źródło: [59, 62].

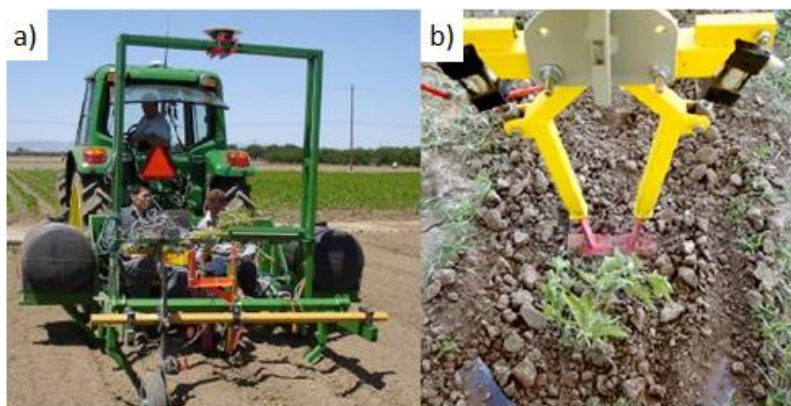
W kolejnym systemie zastosowano mechanizm składający się z dwóch ramion umieszczonych nad rzędami roślin, sterowanych za pomocą siłowników pneumatycznych (rys. 18). Do każdego z ramion przymocowano pionowy trzonek zakończony nożowym podcinaczem. Gdy tłok siłownika cofa się, ramiona zbliżają się do siebie, a podcinacze łączą się, tworząc dwustronny nóż ustawiony pod kątem. Natomiast w momencie wysunięcia tłoka, podcinacze rozchylają się, umożliwiając ominięcie rośliny uprawnej.



Rysunek 18. Nożycowy element roboczy. a – faza pracy pomiędzy roślinami w rzędzie, b – ominięcie rośliny.
Źródło: [56].

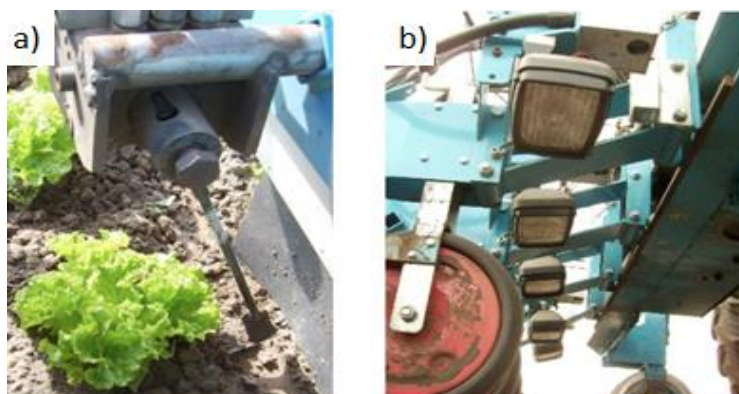
Kolejnym przykładem pielnika przeznaczonego do pracy bezpośrednio w rzędach roślin jest system opracowany przez naukowców z USA i Hiszpanii [43,63]. W tym rozwiązaniu zastosowano automatycznie tworzoną mapę GPS (Global Positioning System), która powstaje już w trakcie sadzenia roślin i stanowi później podstawę do

sterowania elementami roboczymi pielnika (rys. 19). Sadzarka, wyposażona w system GPS, podczas sadzenia rejestruje pozycję każdej rośliny, tworząc w czasie rzeczywistym mapę ich rozmieszczenia. Pielnik natomiast wyposażony jest w kontroler, do którego wgrywa się wcześniej opracowaną mapę.



Rysunek 19. System pielenia pomiędzy roślinami w oparciu o mapę GPS. a – sadzarka wyposażona w system rejestracji miejsca sadzenia, b – element roboczy.
Źródło: [63].

Kolejną metodą zwalczania chwastów pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie jest rozwiązanie oparte o obrotową motykę [64]. Zostało skomercjalizowane przez firmę Poulsen APS (rys. 20). System opiera się na biernym elemencie – pionowej motyce, która jest umieszczona promieniowo na osi wzdłużnej względem kierunku jazdy. Motyka może obracać się o około 30 stopni w każdą stronę, a jej ruch kontrolowany jest przez układ hydrauliczny, sterowany systemem wykrywania roślin wykorzystującym indywidualne kamery i dedykowane oświetlenie dla każdej sekcji. Podczas pracy motyka spulchnia ziemię w rzędzie, a w momencie wystąpienia rośliny zostaje przesunięta na bok.



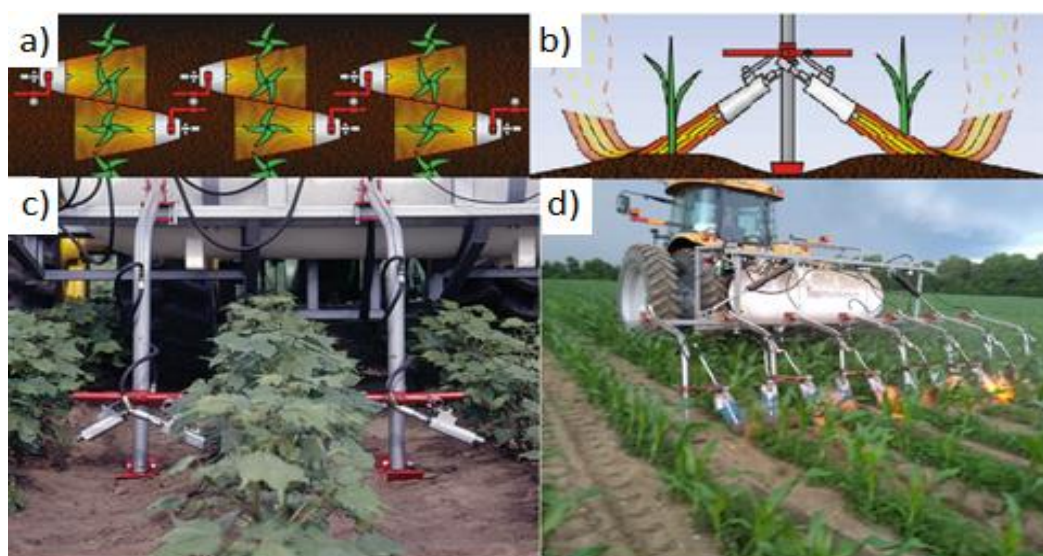
Rysunek 20. Pielnik z mechanizmem z obrotową motyką firmy Poulsen APS, a – motyka wahlowa b – lampy doświetlające rząd.
Źródło: [65].

2.6. Alternatywne metody zwalczania chwastów

Oprócz klasycznych, mechanicznych metod zwalczania chwastów obserwuje się rozwój metod alternatywnych. Polegają one na ekspozycji chwastu na medium, które nie jest pestycydem, lecz powoduje zniszczenie chwastu.

Termiczne zwalczanie chwastów polega na wykorzystaniu ciepła jako metody kontroli roślinności [66]. Techniki termicznego zwalczania chwastów opierają się na mechanizmach kontaktu dolistnego, w których przez kilka sekund stosuje się temperaturę około 100°C (temperatura krytyczna dla śmiertelności liści waha się od 55 °C do 70 °C), co powoduje wewnątrzkomórkową ekspansję wody i pęknięcie błony komórkowej [67]. Mechanizm oddziaływania ciepła na roślinę różni się w zależności od gatunku i jest złożony. Narzędzia termiczne do zwalczania chwastów mogą obejmować płomienie, promieniowanie podczerwone i ultrafioletowe B, gorącą wodę, mikrofałę i parę [68].

W sprzedaży dostępne są rozwiązania pielników wykorzystujących techniki termicznego zwalczania chwastów. Przykładem może być Row Crop Flamer, firmy Flame Engineering, Inc. Maszyna wyposażona jest w specjalnie zaprojektowane palniki na ciekły propan, które niszczą chwasty w rzędzie bez szkody dla upraw. Zazwyczaj palniki są ustawione pod kątem od 45 do 30 stopni w poziomie, w odległości od 10 do 25 cm od uprawy (ciśnienie od 0,172 do 0,48 MPa). Prędkość ciągnika waha się od 4,8 do 8 km/h. Podczas przemieszczania się w rzędzie palniki są rozmieszczone naprzemiennie, aby nie kolidowały z płomieniem z przeciwległego palnika (rys. 21).



Rysunek 21. Pielnik płomieniowy Row Crop Flamer: a – rozmieszczenie palników, b – ustawienie palników, c – odległość palnika od roślin, d – praca maszyny na polu.

Źródło: [69].

Innym medium wykorzystywanym do zwalczania chwastów jest użycie prądu elektrycznego. Firma AGXTEND specjalizująca się w elektrycznym zwalczaniu chwastów opracowała urządzenia XPOWER (rys. 22). W tych systemach wysokonapięciowy prąd generowany jest lokalnie i przekazywany przez pierwszy aplikator do roślin, a następnie przez drugi aplikator do gleby, co powoduje zamknięcie obwodu elektrycznego. Efekt działania polega na wędnięciu chwastów, a jego skuteczność zależy od odpowiedniej dawki energii i precyzyjnie dobranego aplikatora. Chwasty o wysokiej zawartości wody oraz stosunkowo niewielkiej liczbie łodyg i korzeni wymagają mniejszych dawek energii, co ułatwia ich usuwanie. Urządzenia wyposażone są w aplikatory o długości 50 cm z wysuwanymi ramionami. Rozwiązanie to umożliwia skuteczne zwalczanie chwastów pod winoroślą oraz precyzyjną kontrolę roślin wokół łodyg, bez uszkodzania upraw. Aplikatory o długości 50 lub 80 cm mogą być montowane zarówno z przodu, jak i z tyłu, przy czym prądnica zasilana z wału odbioru mocy generuje moc 24 lub 36 kW. Zalecana prędkość jazdy wynosi do 4 km/h.



Rysunek 22. Urządzenie XPOWER. a – agregacja z ciągnikiem b – aplikator wysokiego napięcia.
Źródło: [70], materiały własne.

Przeglądu teorii i najnowszych postępów w elektrycznym zwalczaniu chwastów dokonali w swojej pracy naukowej Slaven M.J. i in. [71]. Omówiono potencjał rozwoju odporności i zagrożeń bezpieczeństwa związanych z elektrycznym zwalczaniem chwastów oraz przedstawiono przegląd nowoczesnych maszyn i ich zastosowania w różnych warunkach pracy. Podkreślono również potrzebę dalszych badań w celu określenia możliwości zastosowania i skuteczności wdrożenia tej nowej metody zwalczania chwastów przed jej powszechnym przyjęciem.

2.7. Perspektywy rozwoju mechanicznego zwalczania chwastów

Analizy metod, wspomaganie mechanicznego odchwaszczania w oparciu o mechatroniczne systemy sterowania, pod względem metod i skuteczności podjęli się Zawada i in. [72]. Autorzy przeanalizowali systemy mechatroniczne wspomagające pielniki międzyrzędowe; systemy mechatroniczne wspomagające pielniki wewnątrzrzędowe; systemy hybrydowe łączące mechaniczne odchwaszczanie z innymi metodami, np. środkami chemicznymi. Na podstawie źródeł literaturowych wykazano, że możliwe jest zwiększenie prędkości pielenia co najmniej 1,6-krotnie poprzez zastosowanie systemu korekcji położenia narzędzia dla upraw rzędowych. W przypadku upraw wymagających pielenia oraz w odstępach między roślinami w rzędzie zastosowanie specjalistycznych maszyn do pielenia pozwala na zwiększenie efektywności odchwaszczania nawet 2,57-krotnie w porównaniu z pieleniem ręcznym. W artykule brak odniesienia wyników do konkretnych zabiegów odchwaszczania wybranych upraw i porównania ich z metodami konwencjonalnymi.

Mechaniczne zwalczanie chwastów w burakach cukrowych przeanalizowali Machleb i in. [19]. Konwencjonalny pielnik palcowy został zmodyfikowany i wyposażony w silnik elektryczny. Umożliwiło to ruch obrotowy chwastowników palcowych niezależnie od prędkości jazdy do przodu nośnika narzędzia. Konfiguracja mechanicznego pielnika do zwalczania chwastów opierała się na ramie pielącej o szerokości 3 m (Argus, K.U.L.T.) w połączeniu z systemem przesuwu bocznego Garford Robocrop (Garford Farm Machinery Ltd.). System pielenia miał dwie kamery. Nowe narzędzie zostało przetestowane w połączeniu z kamerą bi-spektralną w dwuletnim teście polowym. Kamera została wykorzystana do identyfikacji roślin uprawnych w obszarze międzyrzędzi. Druga z zainstalowanych na pielniku kamer służyła do ogólnego ustawiania pielnika w rzędzie. W miejscu uprawy buraka cukrowego prędkość obrotowa była równa prędkości jazdy ciągnika. Pomiędzy dwiema roślinami buraka cukrowego prędkość obrotowa była zwiększana o 40% lub zmniejszana o 40%. Skuteczność zwalczania chwastów wahała się od 87% do 91% w 2017 roku i od 91% do 94% w 2018 roku. Zabiegi mechaniczne nie miały negatywnego wpływu na plony buraków cukrowych w porównaniu z konwencjonalną aplikacją herbicydów.

Automatyczny system zwalczania chwastów w obrębie rzędów oparty na GPS został przeanalizowany przez Pérez-Ruiz i in. [43]. Globalny system pozycjonowania z korekcją w czasie rzeczywistym (RTK – Real-Time Kinematics) został wykorzystany do

automatycznego wykrywania geopozycji sadzenia roślin uprawnych i kontrolowania ścieżki pracy dwóch noży do usuwania chwastów poruszających się między roślinami uprawnymi wzdłuż linii środkowej rzędu. Próby polowe wykazały, że wewnątrzrzędowe noże do usuwania chwastów ominęły wszystkie 682 rośliny pomidora w próbach prowadzonych przy ciągłej prędkości jazdy do przodu wynoszącej 0,8 i 1,6 km/h. Wyniki prób polowych wykazały, że system sterowania oparty na GPS miał średni błąd 0,8 cm z odchyleniami standardowymi 1,75 i 3,28 cm podczas jazdy z prędkościami odpowiednio 0,8 i 1,6 km/h. Dzięki temu, że maszyna w trakcie pracy precyzyjnie zna położenie poszczególnych roślin na polu eliminuje to problem dużych chwastów, które przez klasyczne systemy wizyjne mogą być rozpoznane jako roślina uprawiana. Z drugiej strony, tworzenie map GPS podczas sadzenia nie uwzględnia ewentualnych przesunięć roślin podczas fazy wzrostu.

W ostatnich latach pojawiły się różne technologie precyzyjnego zwalczania chwastów, zarówno w kontekście badawczym, jak i komercyjnym, niemniej wszystkie dotychczas opisane metody wizyjne nie są w stanie skutecznie odróżnić rośliny od chwastu, dlatego znaczna liczba badań skupiła się na widzeniu maszynowym w celu rozpoznawania chwastów w różnych uprawach [73].

Identyfikacją chwastów w kukurydzy, słoneczniku i ziemniakach za pomocą konwolucyjnych sieci neuronowych w swojej pracy naukowej zajęli się Peteinatos i in. [74]. Na potrzeby badań wykonano obrazy kamerą RGB (RGB – Red Green Blue). Trzy różne sieci CNN (CNN – Convolutional Neural Networks), a mianowicie VGG16, ResNet-50 i Xception, zostały zaadaptowane i przeszkolone na puli 93000 obrazów. Obrazy treningowe składały się z obrazów roślin, przy czym na każdym obrazie znajdował się tylko jeden gatunek rośliny. Podczas testowania obrazów uzyskano dokładność wykrywania roślin i rozróżniania gatunków chwastów na poziomie od 77% do 98%.

W badaniu przeprowadzonym przez Chang i in. [75] opracowano inteligentny pielnik wyposażony w kamerę oraz modułowy mechanizm roboczy, sterowany na podstawie algorytmu głębokiego uczenia. Celem pracy było precyzyjne usuwanie chwastów w międzyrzędziach oraz w rzędach upraw przy minimalizacji uszkodzeń roślin uprawnych. Kluczowym elementem pielnika było zastosowanie systemu wizyjnego, który identyfikował i lokalizował chwasty w czasie rzeczywistym, umożliwiając aktywację mechanizmu usuwającego jedynie w miejscach faktycznego występowania chwastów. Wyniki badań wykazały, że opracowany system charakteryzował się wysoką

skutecznością wykrywania chwastów – w zależności od warunków oświetleniowych, precyzja detekcji wynosiła od 83% do 95%. Skuteczność usuwania chwastów za pomocą pielnika wynosiła od 84% do 92% przy prędkości 0,36-0,54 km/h. Przy prędkości 0,72 km/h efektywność spadała do około 64%, a jednocześnie wzrastał poziom uszkodzeń roślin uprawnych – z 5,5% przy 0,36 km/h do 44,4% przy 0,72 km/h.

Inteligentny, zrobotyzowany system pielienia w rzędzie łączący technologię głębokiego uczenia z ukierunkowanym trybem pielienia w swojej pracy naukowej przedstawili Quan L. i in. [76]. Zaproponowany system składał się z mobilnej platformy robota i dwóch sekcji pielących. Zaproponowano ukierunkowany wzorzec pielienia w oparciu o wyniki wykrywania głębokiego uczenia. Doświadczenia wykazały, że gdy zagęszczenie chwastów wynosiło 30–36 m⁻², wskaźnik wykrywalności roślin wynosił 98,5%, a wskaźnik wykrywania chwastów 90,9%. Wyniki wykazały wykonalność proponowanej metody zwalczania chwastów w strefie rzędów.

2.8. Podsumowanie

Perspektywy rozwoju mechanicznego zwalczania chwastów koncentrują się na dalszym zwiększaniu precyzji i autonomii pracy pielników, zwłaszcza w kontekście upraw prowadzonych w systemach ekologicznych i ograniczających stosowanie herbicydów. Współczesne pielniki coraz częściej są wyposażane w systemy wizyjne, które umożliwiają ich pracę nie tylko w międzyrzędziach, ale również w rzędzie roślin. Mimo tych postępów, nadal istotnym wyzwaniem pozostaje skuteczne rozróżnianie chwastów od roślin uprawnych, szczególnie we wczesnych fazach wzrostu, gdy ich morfologia jest do siebie bardzo zbliżona.

Dodatkową barierą jest ograniczona zdolność pielników do pracy w warunkach nieregularnych rzędów – obecne konstrukcje najlepiej sprawdzają się w prostych, równoległych rzędach. Tymczasem w praktyce rolniczej, zwłaszcza na mniejszych polach i w uprawach ekologicznych, często spotyka się rzędy krzywoliniowe lub nieregularne, w których precyzyjne prowadzenie pielnika i selektywne usuwanie chwastów wciąż pozostaje nierozwiązanym problemem. Rozwój technologii adaptacyjnych, umożliwiających elastyczne dostosowanie toru jazdy pielnika oraz jego narzędzi roboczych do zmiennego układu roślin, stanowi istotną lukę technologiczną i kierunek przyszłych badań.

3. Cel i zakres pracy

Stwierdzona luka w zakresie technologii zwalczania chwastów skłoniła autora do rozwiązania problemu ogólnego, jakim jest niechemiczne zwalczanie chwastów.

Problemem użytecznym jest efektywne zniszczenie chwastów pomiędzy roślinami, które znajdują się w krzywoliniowym rzędzie. Dla tak określonych problemów sformułowano odpowiadające im cele pracy.

Celem naukowym było wykazanie przydatności identyfikacji roślin za pomocą sieci neuronowych w mechanizmie do niszczenia chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin. Drugim celem naukowym było opracowanie nowej metody wyznaczania trajektorii ruchu noży pielących w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin, wynikającej z opisu matematycznego zależności geometrycznych i kinematycznych mechanizmu.

Celem użytecznym pracy było techniczne zaimplementowanie opracowanych rozwiązań i zbudowanie w pełni działającej sekcji roboczej pielniaka do usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin i potwierdzenie jej skuteczności.

Celami cząstkowymi pracy było:

1. Stworzenie autorskiej koncepcji mechanizmu do usuwania chwastów.
2. Opracowanie modelu matematycznego, zawierającego równania określające właściwości geometryczne wszystkich elementów mechanizmu oraz wykonanie na nim analiz geometrycznych i kinematycznych.
3. Opracowanie metody wyznaczania trajektorii ruchu noży pielących.
4. Budowa w pełni funkcjonalnego prototypu mechanizmu niszczącego chwasty.
5. Weryfikacja skuteczności działania prototypu w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.

Osiągnięcie powyższych celów wymagało wykonania szeregu prac. Budowa sekcji pielącej dzieliła się na części mechaniczną, programistyczną, elektroniczną, a także związaną z automatyką. W części mechanicznej dokonano analiz geometrycznych i kinematycznych mechanizmu sekcji wykorzystując opracowany model matematyczny. Model matematyczny pozwolił na dobór zakresów wartości parametrów geometrycznych i kinematycznych sekcji pielącej, które uwzględnione zostały w projektowaniu i budowie stanowiska badawczego. Model matematyczny

posłużył również do opracowania metody wyznaczania trajektorii ruchu noży pielących. Część programistyczna obejmuje opracowanie oprogramowania wyznaczającego modelowe trajektorie ruchu noży pielących dla zadanych parametrów geometrycznych, kinematycznych, opracowanie technologii do rozpoznawania roślin i opracowanie oprogramowania sterującego sekcją pielącą w czasie rzeczywistym, które wykorzystuje opracowaną metodę wyznaczania trajektorii ruchu noży pielących. Część elektroniczna obejmowała opracowanie połączeń komputera sterującego z elementami wykonawczymi sekcji pielącej oraz budowę systemu rejestracji sygnałów. Część związana z automatyką dotyczyła doboru elementów automatyki wywołujących ruch elementów roboczych oraz ich zasilania, zaś parametry elementów automatyki wynikały z zakresów wartości kinematycznych określonych w modelu matematycznym. Po zbudowaniu w pełni funkcjonalnej sekcji pielącej połączonej z systemem rejestracji sygnałów możliwe było przeprowadzenie badań w kanale glebowym.

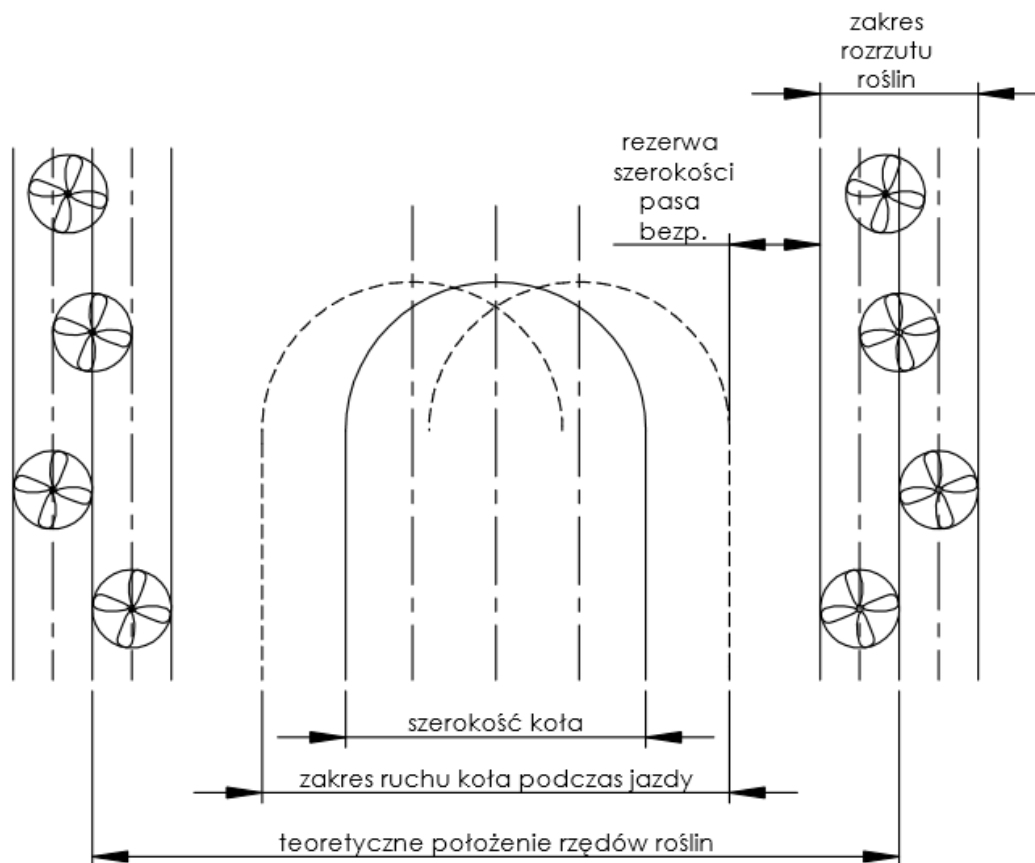
W związku z powyższym przyjęto następujący zakres prac:

1. Przegląd literatury w zakresie niechemicznych metod zwalczania chwastów i perspektyw rozwoju mechanicznego zwalczania chwastów.
2. Zdefiniowanie wymagań agrotechnicznych dla sekcji pielącej do usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.
3. Opracowanie koncepcji mechanizmu do usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.
4. Opracowanie modelu matematycznego w programie MathCad. Wyznaczenie równań właściwości geometrycznych poszczególnych punktów mechanizmu w zależności od zmienności parametrów takich jak: wysokości terenu oraz stopnie wysunięcia poszczególnych siłowników.
5. Dobór technologii wykrywania obiektów, opracowanie procesu tworzenia modeli sieci neuronowych do rozpoznawania roślin uprawianych na podstawie zbioru zdjęć oraz wybór platformy programistycznej i sprzętowej spełniającej wymagania wydajnościowe i ekonomiczne.
6. Dobór komponentów technicznych umożliwiających zbudowanie stanowiska badawczego.
7. Opracowanie modelu geometrycznego mechanizmu pielącego w programie SolidWorks, wykonanie dokumentacji technicznej niezbędnej do jej wykonania oraz

zbudowanie w pełni funkcjonalnego mechanizmu pielącego, zarówno od strony mechanicznej, elektronicznej, jak i elementów automatyki.

8. Opracowanie metody wyznaczania trajektorii ruchu noży pielących w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin wynikającej z opisu matematycznego.
9. Opracowanie autorskiego oprogramowania w technologii Microsoft .NET Core, w języku C#, wyznaczającego w sposób numeryczny trajektorię ruchu noży pielących dla zadanego toru roślin oraz zadanych parametrów geometrycznych i kinematycznych mechanizmu.
10. Implementacja oprogramowania sterującego sekcją pielącą. Trening modelu sieci neuronowej rozpoznającej rośliny kapusty i wykorzystanie go w oprogramowaniu sterującym.
11. Zbudowanie odseparowanego od mechanizmu pielącego układu rejestracji przemieszczeń wszystkich elementów prototypu oraz rejestracji sygnałów sterujących.
12. Przeprowadzenie badań w warunkach laboratoryjnych w kanale glebowym:
 - przeprowadzenie badań czasów reakcji poszczególnych elementów roboczych wykorzystując układ rejestracji przemieszczeń i sygnałów sterujących i wyprowadzenie wzorów matematycznych do wyznaczenia wartości opóźnień działania elementów roboczych odpowiadających za ruch poprzeczny oraz działanie noży dłutowych,
 - opracowanie metodyki ustawienia roślin kapusty, zróżnicowanych pod kątem złożoności oczekiwanego ruchu noży pielących oraz sposobu powtarzalnego rozłożenia ich na powierzchni gleby kanału glebowego, a także opracowanie odpowiednich wariantów jednakowego ustawienia roślin, lecz zakłóconych chwastami,
 - wykonanie pomiarów dla przyjętych wariantów ułożenia roślin kapusty, zakłóconych chwastami oraz niezakłóconych chwastami, dla prędkości 0,8 km/h, 1,0 km/h oraz 1,2 km/h.
13. Analiza danych z systemu pomiarowego:
 - przekształcenie pomiarów kątów obrotu z czujników na rzeczywiste położenia geometryczne noży pielących,

- wygenerowanie modelowych trajektorii ruchu noży pielących dla zadanego toru roślin oraz zadanych parametrów geometrycznych i kinematycznych mechanizmu pielącego dla każdego wariantu przejazdu,
- porównanie trajektorii rzeczywistych z trajektoriami modelowymi, wykorzystanie elementów statystycznych takich jak test korelacji Pearsona, średni błąd absolutny, średni błąd standardowy, a także wyznaczenie parametrów takich jak procent roślin zniszczonych i procent chwastów ominiętych dla danych kombinacji.

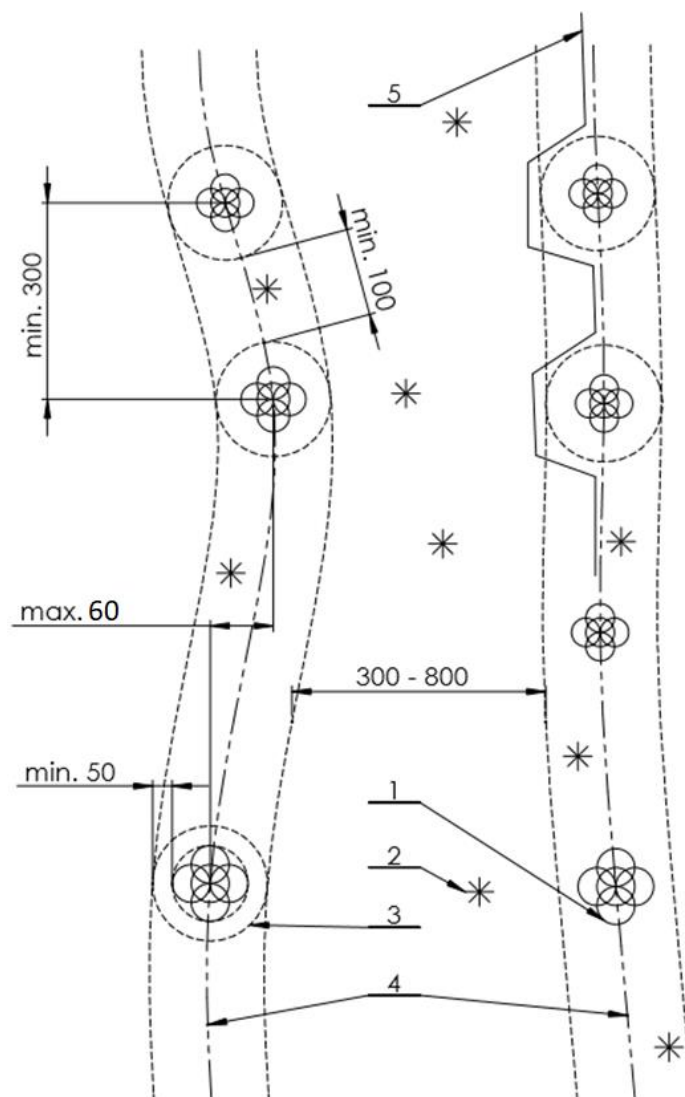


Rysunek 24. Odchylenia w położeniach roślin oraz wynikające ze sprężystości koła ciągnika.
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [72].

Według Gruchalskiego [79] pas ochronny roślin rzędu powinien wynosić 4-10 cm od osi rośliny. Waszkiewicz i Kuczewski [77] zalecają ustawienie pasa ochronnego na szerokość około 10 cm z każdej strony rośliny, nie definiuje natomiast odchylen od teoretycznego ułożenia roślin w rzędzie. Bernacki [12] zakłada, iż odległość od osi roślin powinna wynosić nie mniej niż 5 cm. Kozłowska i Dąbrowski [80] zakładają, iż noże powinny być oddalone od osi rośliny w zakresie od 5 do 12 cm, w zależności od wielkości roślin. Według Bernackiego, możliwa jest uprawa międzyrzędowa przeprowadzona dodatkowo pomiędzy roślinami w rzędzie wtedy, gdy ich wzajemne odległości przekraczają 30 cm [12]. Zabieg pielenia powinien być wykonywany płytko, głębokość robocza poniżej 5 cm [12,77].

W literaturze nie występują dokładne wartości dla odchyłek zakresu rozrzutu roślin przy siewie, natomiast ich występowanie zostało jedynie stwierdzone [77]. Literatura nie definiuje również dokładnych założeń, jakie powinno spełniać pielenie pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie. Na podstawie danych z literatury opracowano

założenia dla zespołu pielącego pracującego w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin. W założeniach zdefiniowanych na podstawie literatury zdefiniowano strefę bezpieczeństwa rośliny określaną promieniem wokół środka rośliny, wynoszącym minimum 100 mm. Szerokość rzędów roślin w których może pracować sekcja robocza w różnych uprawach założono od 300 mm do 800 mm. Maksymalny rozrzut położenia poprzecznego roślin w rzędzie zdefiniowano na poziomie 120 mm pomiędzy skrajnymi położeniami, a więc maksymalna odchyłka od teoretycznej osi rzędu wynosi 60 mm. Minimalna odległość pomiędzy roślinami, w której możliwe jest zastosowanie usuwania chwastów pomiędzy roślinami w rzędzie założona została na poziomie 300 mm (rys. 25).



Rysunek 25. Założenia stawiane przed sekcją roboczą pielnika do krzywoliniowych i nierównoległych rzędów roślin. 1 – roślina 2 – chwast 3 – strefa bezpieczeństwa rośliny, 4 – krzywoliniowa oś rzędu roślin, 5 – przewidywana trajektoria ruchu noża pielącego
Źródło: Opracowanie własne.

Ocena jakości pracy pielnika obejmuje kontrolę stanu i ewentualnych uszkodzeń roślin po wykonanym zabiegu oraz określenie stopnia zniszczenia chwastów w międzyrzędziach. Pielnik powinien zapewniać usunięcie nie mniej niż 95% chwastów rosnących w międzyrzędziach. Liczba wyciętych przy tym omyłkowo roślin uprawnych nie może być większa niż 1%, a liczba roślin uszkodzonych lub przysypanych – nie większa niż 2% [81].

5. Koncepcja mechanizmu sekcji pielącej

Tworząc koncepcję mechanizmu pielącego starano się zapewnić możliwość prowadzenia narzędzia wzdłuż krzywoliniowych, nierównoległych rzędów roślin oraz niszczenia chwastów pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie. Maszyna miała być montowana na ramę mocowaną do przedniego trójpunktowego układu zawieszenia ciągnika tak, by możliwe było widzenie maszynowe roślin przed sekcją. Dodatkowo kamera musi poruszać się wraz z ruchem poprzecznym narzędzia tak, by możliwe było ustalenie pozycji sekcji względem osi rośliny.

Mechanizm sekcji roboczej pielnika składa się z czworoboku przegubowego, który w tylnej części jest zamocowany do ramy maszyny i pracuje w płaszczyźnie poziomej. Do jego przedniego ramienia przymocowano pionowy segment, a do niego symetrycznie zamontowano dwa pionowe czworoboki przegubowe, które kopią teren po obu stronach rzędów roślin – osobno dla lewej i prawej strony.

Symetrycznie do tych pionowych czworoboków przegubowych zamocowano dwie belki narzędziowe. W tylnej części każdej belki znajduje się ząb roboczy przeznaczony do pracy w międzyrzędziu, natomiast w przedniej części umieszczono nóż dłutowy. Może on zmieniać swoje położenie katowe względem osi obrotu, która przebiega wzdłuż toru jazdy maszyny.

Podczas pracy sekcja robocza pielnika przemieszcza się wzdłuż osi rzędu roślin, który znajduje się między belkami narzędziowymi.

Na przekątnej poziomego czworoboku przegubowego zamocowany jest siłownik hydrauliczny. Jego położenie determinuje poprzeczne przesunięcie sekcji względem ramy maszyny, do której jest przymocowana. Jest to siłownik hydrauliczny, który umożliwia płynną zmianę położenia w pełnym zakresie wysuwu. Dzięki temu sekcja może dostosowywać się do krzywoliniowego przebiegu rzędu roślin, zapewniając jej utrzymanie w osi rzędu podczas pracy.

W rozwiązaniu występują również siłowniki pneumatyczne, które wyróżniają się krótkim czasem zmiany położenia. Są zamontowane symetrycznie przy nożach wahliwych w belkach narzędziowych – osobno dla lewej i prawej strony. Działają równolegle, co oznacza, że ich wysuw i wsuw następuje jednocześnie. Odpowiadają one za wychylenie noży dłutowych o ruchu wahadłowym, które mogą przyjmować dwie pozycje: zwartą oraz rozwartą.

W pozycji zwartej noże dłutowe ustawione są w osi rzędu, umożliwiając kultywację gleby pomiędzy roślinami. Natomiast pozycja rozwarta pozwala na omijanie poszczególnych roślin w rzędzie w przypadku ich wykrycia przez system sterowania. Zarówno siłownik hydrauliczny umieszczony na poziomym czworoboku przegubowym, jak i pneumatyczne siłowniki sterujące nożami dłutowymi, kontrolowane są przez system wizyjny. Kamera, zamontowana na wysięgniku w przedniej części sekcji, pozwala na precyzyjne sterowanie, a jej umiejscowienie na pionowym segmencie łączącym poziomy czworobok przegubowy z pionowymi czworobokami przegubowymi umożliwia utrzymanie sekcji na stałej wysokości.

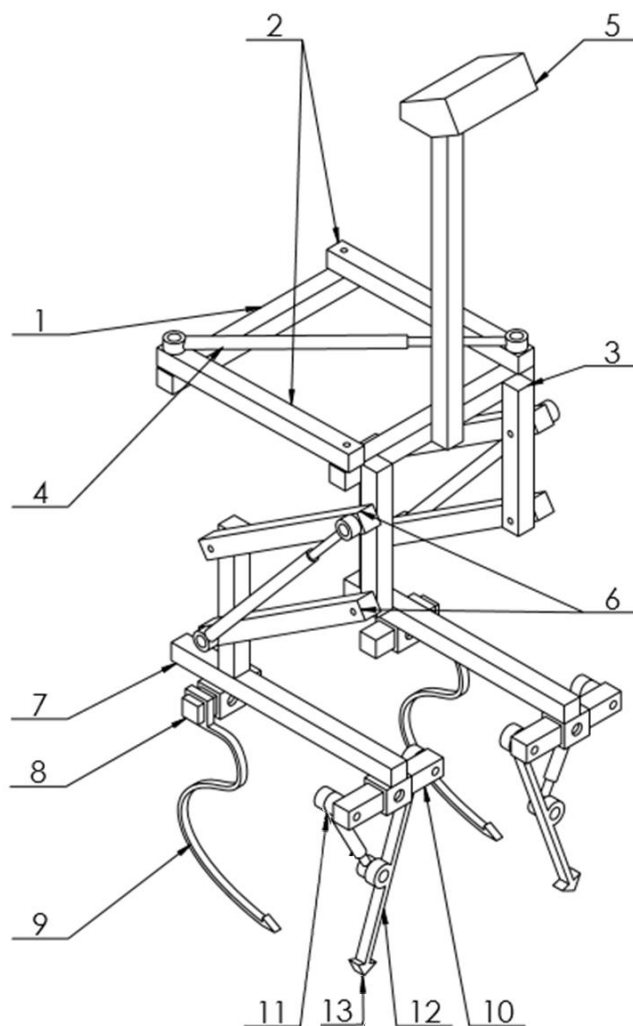
Rzędy roślin nigdy nie są idealnie równoległe. Powodują to zarówno niewielkie odchylenia powstałe w trakcie siewu lub sadzenia, jak i specyfika wzrostu roślin, które często rosną w kierunku odbiegającym od pionu. Dodatkowo, nierównoległość może wynikać z niemożności dokładnego odwzorowania poprzednich przejazdów przez operatora maszyny sadzącej. Z tego powodu, aby minimalizować straty wynikające z tych zaburzeń, konieczne jest stosowanie pielników o tej samej liczbie sekcji co maszyny siewne lub sadzące, mimo ich znacznie mniejszego zapotrzebowania na moc.

Dzięki swojej konstrukcji prezentowane rozwiązanie pozwala na pracę pielnikiem z inną liczbą sekcji niż w maszynie wykonującej siew lub sadzenie. Niezależna kompensacja krzywoliniowości rzędu umożliwia skuteczną pracę nawet w nierównoległych rzędach roślin. Ponadto, dzięki zastosowaniu noży dłutowych o ruchu wahadłowym i uniezależnieniu poszczególnych sekcji, pielnik efektywnie usuwa chwasty i pielęgnuje glebę pomiędzy roślinami w rzędzie.

Koncepcja jest chroniona patentem nr PL 242821 B1 [82], (załącznik 1) i została przedstawiona na rysunku 26.

Sekcja składa się z belki stałej 1, która jest przymocowana do ramy nośnej maszyny. Wraz z ramionami 2 i wspornikiem zawieszenia części roboczych 3 tworzy ona czworobok przegubowy pracujący w płaszczyźnie poziomej. Na jego przekątnej zamontowano siłownik hydrauliczny 4, odpowiadający za poprzeczne przesunięcie maszyny w lewo lub w prawo w zależności od zmiany jego wydłużenia. Na pionowym segmencie znajduje się wysięgnik z modułem 5, który steruje siłownikami na podstawie obrazu z kamery. Do tego segmentu 3 obrotowo przymocowano dwie jednostki pionowe – lewą i prawą – za pomocą belek 6, które łączą je z belką narzędziową 7. Takie rozwiązanie umożliwia swobodny przesuw pionowy dalszej części mechanizmu,

pozwalając na kopiowanie terenu bez zmiany kąta natarcia elementów roboczych względem gleby. W przedniej części belki narzędziowej 7 znajduje się poprzeczny element nastawny 10, do którego od wewnętrznej strony sekcji obrotowo przymocowano ramię wahacza 12 zakończone nożem dłutowym 13, a od zewnętrznej strony – siłownik pneumatyczny 11. Siłownik ten jest połączony obrotowo z ramieniem wahacza 12 zakończonego nożem dłutowym 13, tworząc mechanizm dźwigniowy. Wysuw siłownika 11 powoduje, że koniec noża dłutowego ustawia się w osi rzędu. W tylnej części belki narzędziowej 7 zamontowano drugi poprzeczny element nastawny 8, na którym umieszczono stały ząb sprężysty 9. Jego zadaniem jest niszczenie chwastów oraz spulchnianie gleby w międzyrzędziu.

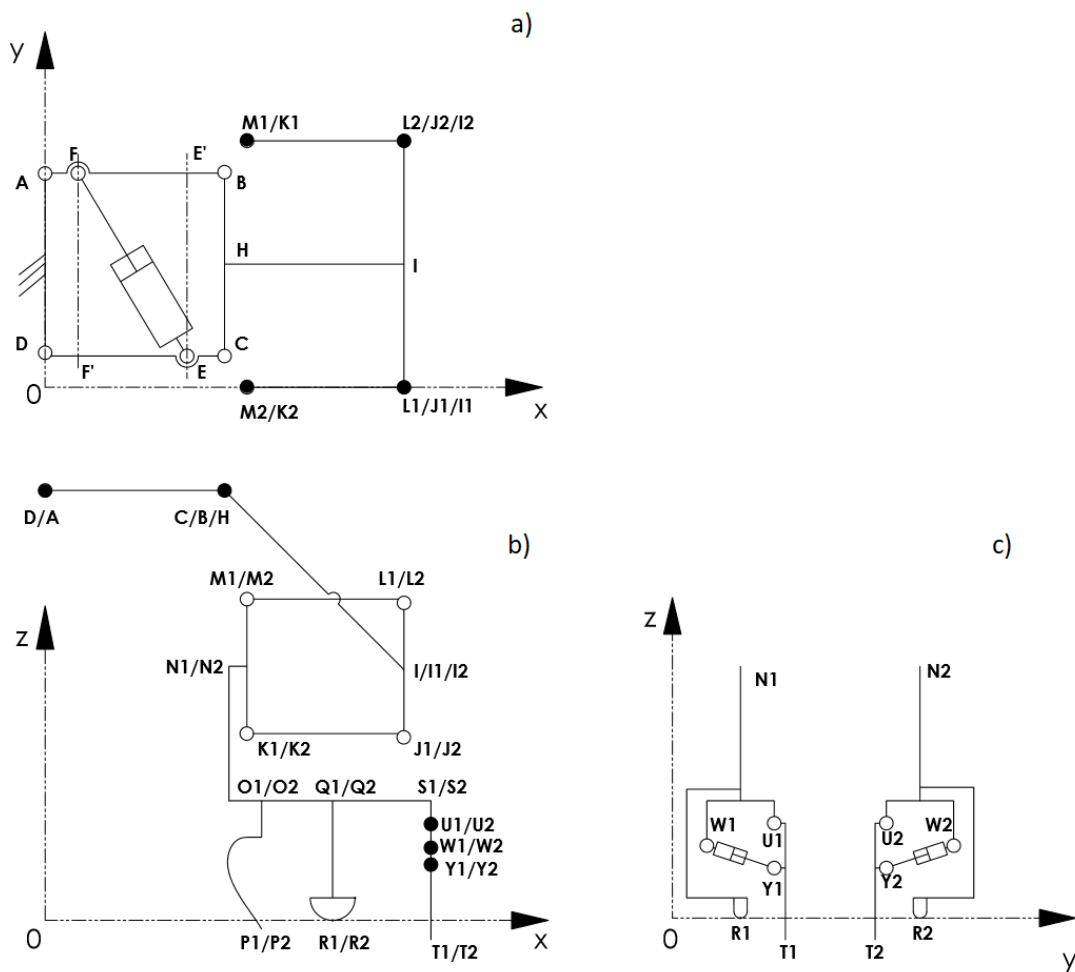


Rysunek 26. Autorska koncepcja mechanizmu sekcji roboczej. 1 – belka stała czworoboku poziomego, 2 – ramiona boczne czworoboku przegubowego, 3 – wspornik zawieszenia części roboczych, 4 – siłownik hydrauliczny, 5 – moduł sterujący z kamerą, 6 – belki wzdłużne segmentu pionowego, 7 – belka narzędziowa, 8 – element nastawny mocowania zęba sprężystego, 9 – ząb sprężysty, 10 – element nastawny mocowania zęba dłutowego, 11 – siłownik pneumatyczny, 12 – ramię wahacza, 13 – nóż dłutowy.

Źródło: Opracowanie własne.

6. Model matematyczny mechanizmu sekcji pielącej

W celu znalezienia parametrów geometrycznych i kinematycznych sekcji pielącej opracowano model matematyczny zawierający równania określające właściwości geometryczne wszystkich elementów mechanizmu pielącego. Wykonano na nim szereg analiz, w funkcji parametrów takich jak zmiana wysokości terenu, stopień wysunięcia siłowników pneumatycznych oraz stopień wysunięcia siłownika hydraulicznego. W tym celu opracowano schemat mechanizmu oraz nadano symbole poszczególnym jego elementom (rys. 27).



Rysunek 27. Schemat mechanizmu sekcji roboczej pielnika w 3 rzutach: a – rzut z góry, b – rzut z boku, c – rzut części narzędziowej z przodu. A, D – punkty mocowania czworoboku przegubowego do ramy; A, B, C, D – czworobok przegubowy przesuwu poprzecznego; F, E – punkty mocowania siłownika przesuwu poprzecznego; H, I, I₁, I₂ – wspornik zawieszenia części roboczych; M₁, M₂, L₁, J₁, K₁ oraz M₂, L₂, J₂, K₂ – czworoboki przegubowe pionowe roboczych; N₁, O₁, Q₁, S₁ oraz N₂, O₂, Q₂, S₂ – belki narzędziowe prawa i lewa; U₁, U₂ – mocowania ramienia wahacza prawego i lewego; T₁, T₂ – końce noży dłutowych; W₁, Y₁ oraz W₂, Y₂ – punkty mocowania siłowników pneumatycznych wywołujących ruch poprzeczny noży dłutowych.

Źródło: Opracowanie własne.

6.1. Opis matematyczny punktów charakterystycznych sekcji pielnika w przestrzeni 3D

Aby możliwe było parametryczne zdefiniowanie zależności geometrycznych i kinematycznych mechanizmu potrzebny jest szereg danych wejściowych, które muszą zostać zdefiniowane. W tym przypadku za dane wejściowe przedstawione w zestawie równań (1) przyjęto:

- współrzędne punktu początkowego D w osiach x, y i z, odpowiednio D_x, D_y, D_z ,
- długości bezwzględne odcinków $AB, AD, AF, HI, I_1I_2, J_1L_1, L_1M_1, N_1O_1, O_1Q_1, O_1P_1, O_1S_1, Q_1R_1, Y_1T_1$,
- rzutowanie długości odcinków S_1W_1 oraz S_1U_1 na osie x oraz z, odpowiednio S_1W_1x, S_1U_1x oraz S_1W_1z, S_1U_1z ,
- kąt pomiędzy odcinkiem HI , a osią x,
- wartość początkowa współczynnika a określającego zmianę długości siłownika hydraulicznego FE ,
- wartości początkowa współczynnika b określającego zmianę długości siłowników pneumatycznych W_1Y_1 oraz W_2Y_2 ,
- wartości początkowa współczynnika h określającego zmianę wysokości terenu wyrażoną w mm,
- prędkości liniowe siłowników FE , oraz W_1Y_1 i W_2Y_2 , odpowiednio v_a oraz v_b .

$$\begin{array}{lll}
 D_x = 0 & L_1M_1 = 400 & S_1U_1x = 100 \\
 D_y = 0 & N_1O_1 = 300 & S_1U_1z = 50 \\
 D_z = 700 & O_1Q_1 = 150 & \alpha_{HI} = \frac{\pi}{4} \\
 AB = 360 & O_1P_1 = 300 & a_0 = 1 \\
 AD = 300 & O_1S_1 = 300 & b_0 = 1 \\
 AF = 50 & Q_1R_1 = 250 & h_0 = 0 \text{ mm} \\
 HI = 300 & U_1Y_1 = 120 & v_a = 250 \text{ mm/s} \\
 I_1I_2 = 400 & Y_1T_1 = 100 & v_b = 500 \text{ mm/s} \\
 J_1L_1 = 160 & S_1W_1x = 100 & \\
 & S_1W_1z = 100 &
 \end{array}$$

(1)

Znając parametry wejściowe możliwe było zdefiniowanie podstawowych zależności geometrycznych pomiędzy współrzędnymi punktów oraz długościami odcinków, co opisują równania (2) – (28).

$$A_z = D_z \quad (2)$$

$$B_z = D_z \quad (3)$$

$$C_z = D_z \quad (4)$$

$$BC = AD \quad (5)$$

$$CD = AB \quad (6)$$

$$CE = AF \quad (7)$$

$$F'E = AB - AF - CE \quad (8)$$

$$FF' = AD \quad (9)$$

$$J_2L_2 = J_1L_1 \quad (10)$$

$$L_2M_2 = L_1M_1 \quad (11)$$

$$O_2P_2 = O_1P_1 \quad (12)$$

$$K_1M_1 = J_1L_1 \quad (13)$$

$$J_1K_1 = J_1M_1 \quad (14)$$

$$O_2Q_2 = O_1Q_1 \quad (15)$$

$$K_2M_2 = J_2L_2 \quad (16)$$

$$J_2K_2 = L_2M_2 \quad (17)$$

$$N_2O_2 = N_1O_1 \quad (18)$$

$$O_2S_2 = O_1S_1 \quad (19)$$

$$U_2Y_2 = U_1Y_1 \quad (20)$$

$$Y_2T_2 = Y_1T_1 \quad (21)$$

$$Q_2R_2 = Q_1R_1 \quad (22)$$

$$S_2U_2z = S_1U_1z \quad (23)$$

$$S_2W_2y = S_1W_1y \quad (24)$$

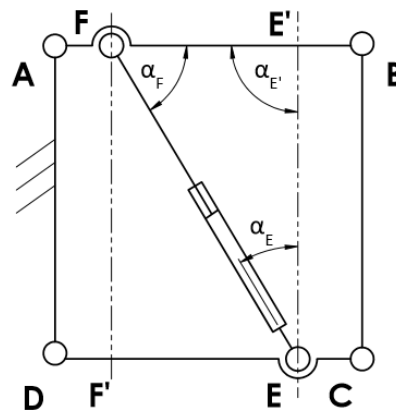
$$S_2W_2z = S_1W_1z \quad (25)$$

$$S_2U_2y = S_1U_1y \quad (26)$$

$$T_1U_1 = U_1Y_1 + Y_1T_1 \quad (27)$$

$$T_2U_2 = U_2Y_2 + Y_2T_2 \quad (28)$$

Po obliczeniu długości odcinka FE przy wartości początkowej parametru a_0 możliwe było wyprowadzenie wzorów na zmianę kątów trójkąta $EE'F$ (rys. 28) w zależności od zmiany parametru określającego zmianę długości odcinka FE .



Rysunek 28. Kąty w trójkącie $EE'F$.

Źródło: Opracowanie własne.

Wysunięcie siłownika FE obliczono z następujących wzorów:

$$FE_{a0} = \sqrt{(FF')^2 + (F'E)^2} \quad (29)$$

$$FE(a) = FE_{a0} * a \quad (30)$$

$$p_{\alpha}(a) = \frac{FF' + FE(a) + F'E}{2} \quad (31)$$

$$\alpha_E(a) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_{\alpha}(a) * (p_{\alpha}(a) - F'E) * (p_{\alpha}(a) - FE(a)) * (p_{\alpha}(a) - FF')}}{\frac{F'E + FE(a) + FF'}{p_{\alpha}(a) - FF'}}} \right) \quad (32)$$

$$\alpha_F(a) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_{\alpha}(a) * (p_{\alpha}(a) - F'E) * (p_{\alpha}(a) - FE(a)) * (p_{\alpha}(a) - FF')}}{\frac{F'E + FE(a) + FF'}{p_{\alpha}(a) - F'E}} \right) \quad (33)$$

$$\alpha_{F'}(a) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_{\alpha}(a) * (p_{\alpha}(a) - F'E) * (p_{\alpha}(a) - FE(a)) * (p_{\alpha}(a) - FF')}}{\frac{F'E + FE(a) + FF'}{p_{\alpha}(a) - FE(a)}} \right) \quad (34)$$

Rzutowanie ramion $F'E$ oraz CD na osie x i y obliczono następujących wzorów:

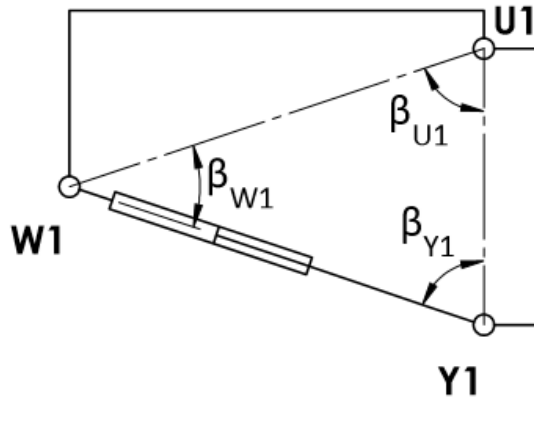
$$F'Ex(a) = F'E * \cos \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_E(a) + \alpha_F(a) \right) \right) \quad (35)$$

$$CDx(a) = CD * \cos \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_E(a) + \alpha_F(a) \right) \right) \quad (36)$$

$$F'Ey(a) = F'E * \sin \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_E(a) + \alpha_F(a) \right) \right) \quad (37)$$

$$CDy(a) = CD * \sin \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_E(a) + \alpha_F(a) \right) \right) \quad (38)$$

Analogicznie do równań (32) – (38) możliwe było wyprowadzenie wzorów na kąty w trójkącie $Y_1U_1W_1$ (rys. 29) oraz zmiany długości odcinka U_1Y_1 i U_1T_1 w osiach y oraz z w zależności od zmiany parametru b . W związku z symetrią trójkątów $Y_1U_1W_1$ oraz $Y_2U_2W_2$ analogicznie podejścia zastosowano kątów trójkąta $Y_2U_2W_2$ oraz odcinków U_2Y_2 i U_2T_2 w osiach y oraz z .



Rysunek 29. Kąty w trójkącie $Y_1U_1W_1$.
Źródło: Opracowanie własne.

Wysunięcie siłownika pneumatycznego W_1Y_1 obliczono z następujących wzorów:

$$W_1Y_1b_0 = \sqrt{(U_1Y_1 - (S1W1z - S1U1z))^2 + (S1W1y + S1U1y)^2} \quad (39)$$

$$W_1Y_1(b) = W_1Y_1b_0 * b \quad (40)$$

Kąty w trójkącie $Y_1U_1W_1$ obliczono z następujących wzorów:

$$p_\beta(b) = \frac{W_1U_1 + W_1Y_1(b) + U_1Y_1}{2} \quad (41)$$

$$\beta_{Y_1}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_1Y_1) * (p_\beta(b) - W_1Y_1(b)) * (p_\beta(b) - W_1U_1)}}{U_1Y_1 + W_1Y_1(b) + W_1U_1} \right) \quad (42)$$

$$\beta_{W_1}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_1Y_1) * (p_\beta(b) - W_1Y_1(b)) * (p_\beta(b) - W_1U_1)}}{U_1Y_1 + W_1Y_1(b) + W_1U_1} \right) \quad (43)$$

$$\beta_{U_1}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_1Y_1) * (p_\beta(b) - W_1Y_1(b)) * (p_\beta(b) - W_1U_1)}}{p_\beta(b) - W_1Y_1(b)} \right) \quad (44)$$

Rzutowanie odcinków U_1Y_1 oraz U_1T_1 na osie z oraz y obliczono z następujących wzorów:

$$U_1Y_1z(b) = U_1Y_1 * \cos \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \beta_{Y1}(b) + \beta_{W1}(b) - \operatorname{atan} \left(\frac{S_1W_1z - S_1U_1z}{S_1W_1y + S_1U_1y} \right) \right) \right) \quad (45)$$

$$U_1T_1z(b) = U_1Y_1z(b) * \frac{U_1Y_1 + Y_1T_1}{U_1Y_1} \quad (46)$$

$$U_1Y_1y(b) = U_1Y_1 * \sin \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \beta_{Y1}(b) + \beta_{W1}(b) - \operatorname{atan} \left(\frac{S_1W_1z - S_1U_1z}{S_1W_1y + S_1U_1y} \right) \right) \right) \quad (47)$$

$$U_1T_1y(b) = U_1Y_1y(b) * \frac{U_1Y_1 + Y_1T_1}{U_1Y_1} \quad (48)$$

Wysunięcie siłownika pneumatycznego W_2Y_2 obliczono z następujących wzorów:

$$W_2Y_2b_0 = \sqrt{(U_2Y_2 - (S_2W_2z - S_2U_2z))^2 + (S_2W_2y + S_2U_2y)^2} \quad (49)$$

$$W_2Y_2(b) = W_2Y_2b_0 * b \quad (50)$$

Kąty w trójkącie $Y_2U_2W_2$ obliczono z następujących wzorów:

$$p_\beta(b) = \frac{W_2U_2 + W_2Y_2(b) + U_2Y_2}{2} \quad (51)$$

$$\beta_{Y2}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_2Y_2) * (p_\beta(b) - W_2Y_2(b)) * (p_\beta(b) - W_2U_2)}}{U_2Y_2 + W_2Y_2(b) + W_2U_2} \right) \quad (52)$$

$$\beta_{W2}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_2Y_2) * (p_\beta(b) - W_2Y_2(b)) * (p_\beta(b) - W_2U_2)}}{U_2Y_2 + W_2Y_2(b) + W_2U_2} \right) \quad (53)$$

$$\beta_{U2}(b) = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{2 * \sqrt{p_\beta(b) * (p_\beta(b) - U_2Y_2) * (p_\beta(b) - W_2Y_2(b)) * (p_\beta(b) - W_2U_2)}}{p_\beta(b) - W_2Y_2(b)} \right) \quad (54)$$

Rzutowanie odcinków U_2Y_2 oraz U_2T_2 na osie z oraz y obliczono z następujących wzorów:

$$U_2Y_2z(b) = U_2Y_2 * \cos \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \beta_{Y2}(b) + \beta_{W2}(b) - \operatorname{atan} \left(\frac{S_2W_2z - S_2U_2z}{S_2W_2y + S_2U_2y} \right) \right) \right) \quad (55)$$

$$U_2T_2z(b) = U_2Y_2z(b) * \frac{U_2Y_2+Y_2T_2}{U_2Y_2} \quad (56)$$

$$U_2Y_2y(b) = U_2Y_2 * \sin \left(\pi - \left(\frac{\pi}{2} + \beta_{Y_2}(b) + \beta_{W_2}(b) - \text{atan} \left(\frac{S_2W_2z - S_2U_2z}{S_2W_2y + S_2U_2y} \right) \right) \right) \quad (57)$$

$$U_2T_2y(b) = U_2Y_2y(b) * \frac{U_2Y_2+Y_2T_2}{U_2Y_2} \quad (58)$$

Znając zależności z równań (1) – (58) możliwe było obliczenie położenia składowanych wszystkich punktów układu w osiach x, y oraz z. Równania (59) - (169) obliczają te składowe, dzięki czemu możliwe jest umieszczenie mechanizmu w przestrzeni 3D oraz dokonanie wizualizacji. Składowe punktów $A, B, C, D, E, E', F, F', H, I, J_1, K_1, L_1, M_1, N_1, O_1, P_1, Q_1, R_1, S_1, T_1, U_1, W_1, Y_1, J_2, K_2, L_2, M_2, O_2, P_2, Q_2, R_2, S_2, T_2, U_2, W_2, Y_2$ w osiach x, y oraz z obliczone zostały z następujących wzorów:

$$A_x = D_x \quad (59)$$

$$A_y = D_y + AD \quad (60)$$

$$B_x = CD_x(a) + A_y \quad (61)$$

$$B_y = CD_y(a) + A_y \quad (62)$$

$$C_x = CD_x(a) + D_x \quad (63)$$

$$C_y = CD_y(a) + D_y \quad (64)$$

$$E_x = C_x - (C_x - D_x) \left(\frac{CE}{CD} \right) \quad (65)$$

$$E_y = C_y - (C_y - D_y) \left(\frac{CE}{CD} \right) \quad (66)$$

$$E_z = A_z \quad (67)$$

$$F_x = A_x + (B_x - A_x) \left(\frac{AF}{AB} \right) \quad (68)$$

$$F_y = A_y + (B_y - A_y) \left(\frac{AF}{AB} \right) \quad (69)$$

$$F_z = A_z \quad (70)$$

$$H_x = B_x \quad (71)$$

$$H_y = \frac{B_y + C_y}{2} \quad (72)$$

$$H_z = B_z \quad (73)$$

$$I_x = H_x + HI * \sin(\alpha_{HI}) \quad (74)$$

$$I_y = H_y \quad (75)$$

$$I_1x = I_x \quad (76)$$

$$I_1y = I_y - \frac{I_1I_2}{2} \quad (77)$$

$$I_1z = I_z \quad (78)$$

$$I_2x = I_x \quad (79)$$

$$I_2y = I_y + \frac{I_1I_2}{2} \quad (80)$$

$$I_2z = I_z \quad (81)$$

$$J_1x = I_1x \quad (82)$$

$$J_1y = I_1y \quad (83)$$

$$J_1z = I_1z - \frac{J_1L_1}{2} \quad (84)$$

$$J_2x = I_2x \quad (85)$$

$$J_2y = I_2y \quad (86)$$

$$J_2z = I_2z - \frac{J_2L_2}{2} \quad (87)$$

$$K_1x(h) = I_1x - \sqrt{L_1M_1^2 - h^2} \quad (88)$$

$$K_1y = I_1y \quad (89)$$

$$K_1z = J_1z + h \quad (90)$$

$$K_2x(h) = I_2x - \sqrt{L_2M_2^2 - h^2} \quad (91)$$

$$K_2y = I_2y \quad (92)$$

$$K_2z(h) = J_2z + h \quad (93)$$

$$L_1x = I_1x \quad (94)$$

$$L_1y = I_1y \quad (95)$$

$$L_1z = I_1z + \frac{J_1L_1}{2} \quad (96)$$

$$L_2x = I_2x \quad (97)$$

$$L_2y = I_2y \quad (98)$$

$$L_2z = I_2z + \frac{J_1L_1}{2} \quad (99)$$

$$M_1x = K_1x \quad (100)$$

$$M_1y = L_1y \quad (101)$$

$$M_1z(h) = L_1z + h \quad (102)$$

$$M_2x = K_2x \quad (103)$$

$$M_2y = L_2y \quad (104)$$

$$M_2z(h) = L_2z + h \quad (105)$$

$$N_1x = M_1x \quad (106)$$

$$N_1y = M_1y \quad (107)$$

$$N_1z = M_1z - \frac{K_1M_1}{2} \quad (108)$$

$$N_2x = M_2x \quad (109)$$

$$N_2y = M_2y \quad (110)$$

$$N_2z = M_2z - \frac{K_2M_2}{2} \quad (111)$$

$$O_1x = N_1x \quad (112)$$

$$O_1y = N_1y \quad (113)$$

$$O_1z = N_1z - N_1O_1 \quad (114)$$

$$O_2x = N_2x \quad (115)$$

$$O_2y = N_2y \quad (116)$$

$$O_2z = N_2z - N_2O_2 \quad (117)$$

$$P_1x = O_1x \quad (118)$$

$$P_1y = O_1y \quad (119)$$

$$P_1z = O_1z - O_1P_1 \quad (120)$$

$$P_2x = O_2x \quad (121)$$

$$P_2y = O_2y \quad (122)$$

$$P_2z = O_2z - O_2P_2 \quad (123)$$

$$Q_1x = O_1x + O_1Q_1 \quad (124)$$

$$Q_1y = O_1y \quad (125)$$

$$Q_1z = O_1z \quad (126)$$

$$Q_2x = O_2x + O_2Q_2 \quad (127)$$

$$Q_2y = O_2y \quad (128)$$

$$Q_2z = O_2z \quad (129)$$

$$R_1x = Q_1x \quad (130)$$

$$R_1y = Q_1y \quad (131)$$

$$R_1z = Q_1z - Q_1R_1 \quad (132)$$

$$R_2x = Q_2x \quad (133)$$

$$R_2y = Q_2y \quad (134)$$

$$R_2z = Q_2z - Q_2R_2 \quad (135)$$

$$S_1x = O_1x + O_1S_1 \quad (136)$$

$$S_1y = O_1y \quad (137)$$

$$S_1z = O_1z \quad (138)$$

$$S_2x = O_2x + O_2S_2 \quad (139)$$

$$S_2y = O_2y \quad (140)$$

$$S_2z = O_2z \quad (141)$$

$$U_1x = S_1x \quad (142)$$

$$U_1y = S_1y + S_1U_1y \quad (143)$$

$$U_1z = S_1z + S_1U_1z \quad (144)$$

$$U_2x = S_2x \quad (145)$$

$$U_2y = S_2y - S_2U_2y \quad (146)$$

$$U_2z = S_2z - S_2U_2z \quad (147)$$

$$T_1x = U_1x \quad (148)$$

$$T_1y = U_1y + \frac{(Y_1T_1+U_1Y_1)*(Y_1y-U_1y)}{U_1Y_1} \quad (149)$$

$$T_1z = U_1z + \frac{(Y_1T_1+U_1Y_1)*(Y_1z-U_1z)}{U_1Y_1} \quad (150)$$

$$T_1x = U_1x \quad (151)$$

$$T_1y = U_1y + \frac{(Y_1T_1+U_1Y_1)*(Y_1y-U_1y)}{U_1Y_1} \quad (152)$$

$$T_1z = U_1z + \frac{(Y_1T_1+U_1Y_1)*(Y_1z-U_1z)}{U_1Y_1} \quad (153)$$

$$T_2x = U_2x \quad (154)$$

$$T_2y = U_2y + \frac{(Y_2T_2+U_2Y_2)*(Y_2y-U_2y)}{U_2Y_2} \quad (155)$$

$$T_2z = U_2z + \frac{(Y_2T_2+U_2Y_2)*(Y_2z-U_2z)}{U_2Y_2} \quad (156)$$

$$W_1x = S_1x \quad (157)$$

$$W_1y = S_1y - S_1W_1y \quad (158)$$

$$W_1z = S_1z - S_1W_1z \quad (159)$$

$$W_2x = S_2x \quad (160)$$

$$W_2y = S_2y + S_2W_2y \quad (161)$$

$$W_2z = S_2z - S_2W_2z \quad (162)$$

$$Y_1x = U_1x \quad (163)$$

$$Y_1y(b) = U_1y - U_1Y_1(b) \quad (164)$$

$$Y_1z(b) = U_1z - U_1Y_1z(b) \quad (165)$$

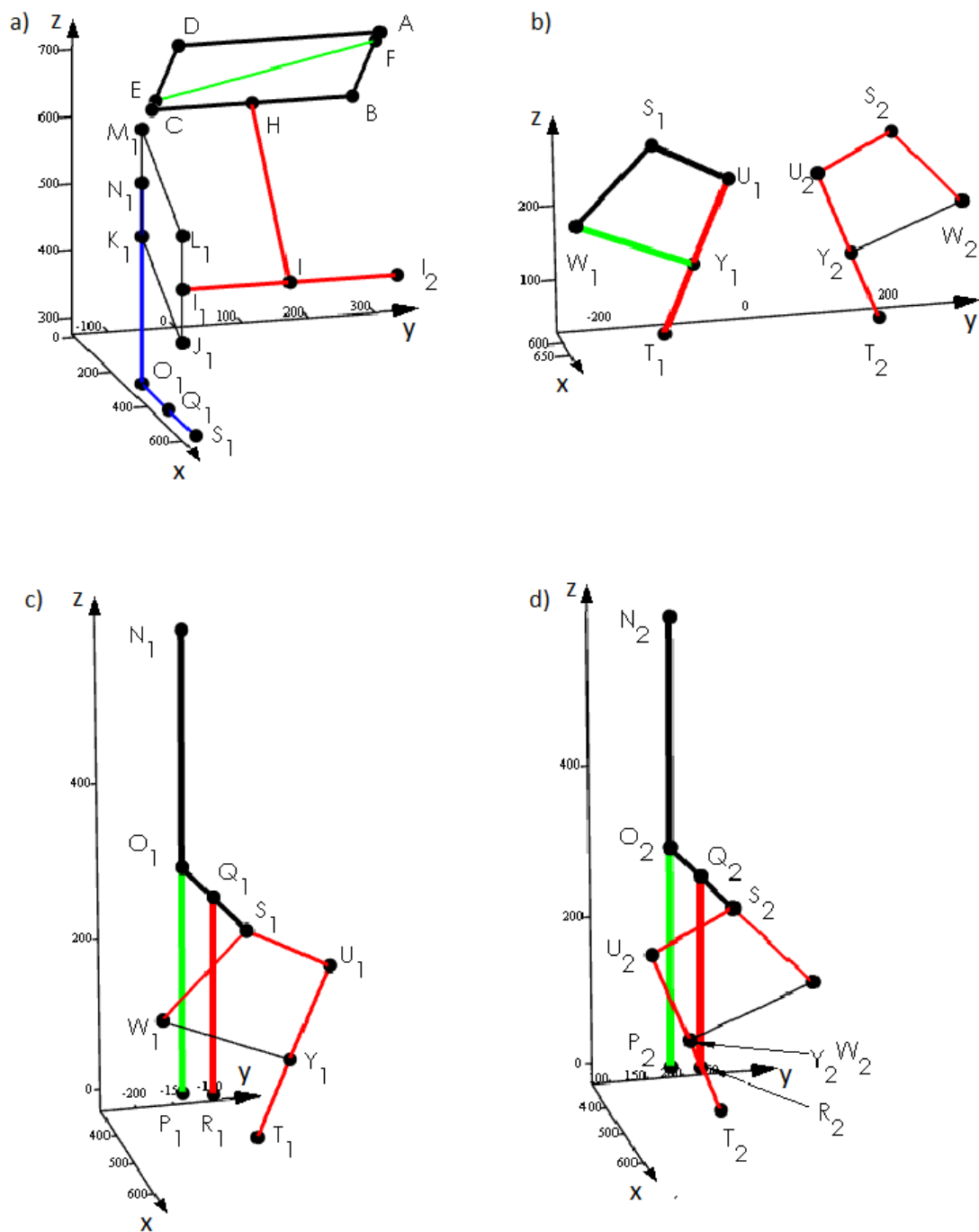
$$Y_2x = U_2x \quad (166)$$

$$Y_2y(b) = U_2y + U_2Y_2(b) \quad (167)$$

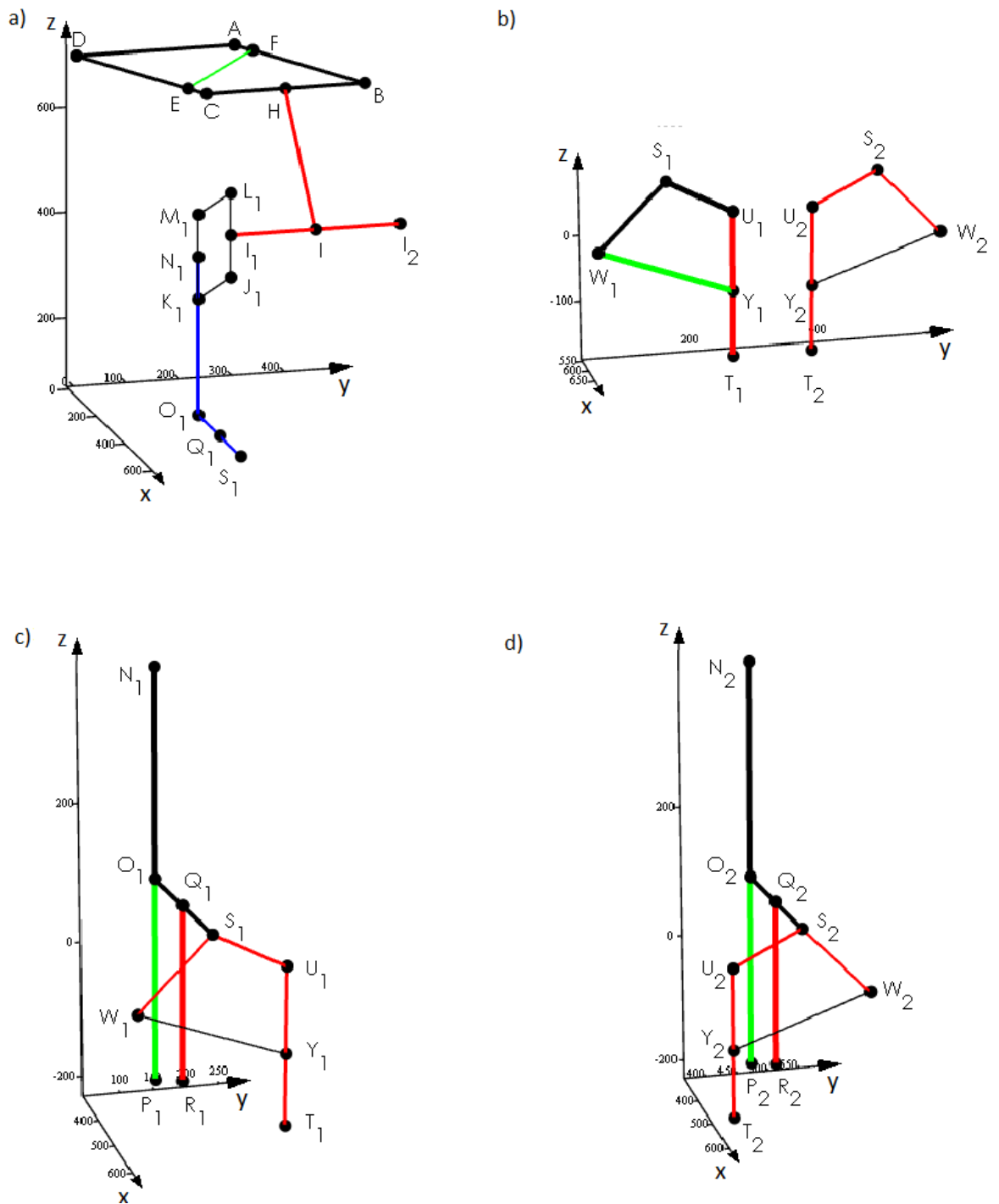
$$Y_2z(b) = U_1z - U_1Y_1z(b) \quad (168)$$

6.2. Wizualizacja obliczonych punktów mechanizmu piętowego w przestrzeni 3D

W celu walidacji przeprowadzonych obliczeń sporządzono listę macierzy punktów i wybrane elementy układu przedstawiono na wykresach za pomocą modułu PLOT w programie MathCad. Pozwoliło to odwzorować mechanizm w przestrzeni, a także jego reakcję na zmianę parametrów geometrycznych, a także parametrów ruchowych mechanizmu a, b oraz h . Wizualizacja mechanizmu dla parametrów $a = 0,8$; $b = 1,2$; $h = 100 \text{ mm}$ przedstawiono na rysunku 30, dla $a = 1,2$; $b = 1$; $h = -100 \text{ mm}$ na rysunku 31.



Rysunek 30. Wizualizacja wybranych elementów kinematycznych mechanizmu dla współczynników $a = 0,8$; $b = 1,2$; $h = 100 \text{ mm}$, a – wizualizacja mechanizmu przesuwu poprzecznego oraz kopiowania terenu ze strony lewej, b – wizualizacja położenia noży wahliwych, c – wizualizacja części roboczej lewej, d – wizualizacja części roboczej prawej.
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 31. Wizualizacja wybranych elementów kinematycznych mechanizmu dla współczynników $a = 1,2$; $b = 1$; $h = -100 \text{ mm}$, a – wizualizacja mechanizmu przesuwu poprzecznego oraz kopiowania terenu ze strony lewej, b – wizualizacja położenia noży wahlowych, c – wizualizacja części roboczej lewej, d – wizualizacja części roboczej prawej.
 Źródło: Opracowanie własne.

6.3. Wpływ wybranych parametrów roboczych na zachowanie mechanizmu pielącego

Ze względu na charakterystykę mechanizmu, współczynniki a , b i h nie wpływają na przesunięcia elementów roboczych w sposób liniowy. Nieliniowość wynika ze złożoności mechanizmu oraz oparcia go na połączeniach obrotowych. W celu zobrazowania przesunięć poszczególnych elementów roboczych w zależności od tych współczynników sporządzono wykresy z wykorzystaniem programu MathCad. Konieczne było również wykonanie dodatkowych obliczeń, dzięki którym możliwe było pokazanie poszczególnych zjawisk.

Δ_x oraz Δ_y są to przesunięcia części roboczej pielnika względem pozycji początkowej a_0 odpowiednio w osiach x oraz y , a Δh_x określa przesunięcie części roboczej w osi x przy zmianie wysokości terenu, czyli współczynnika h .

$$\Delta_x(a) = D_x - CD - CD_x(a) \quad (169)$$

$$\Delta_y(a) = CD_y(a) \quad (170)$$

$$\Delta h_x(h) = L1M1 - \sqrt{L1M1^2 - h^2} \quad (171)$$

Prędkość kątową punktu C będącego końcem ramienia wahliwego czworoboku przegubowego $ABCD$ w funkcji wartości współczynnika a określono symbolem ω_a , zaś ω_b to prędkość kątowna końców noży wahliwych T_1 oraz T_2 .

$$\omega_a(a) = \left(\frac{d}{da} (\alpha_1 F_p(a)) \right) \frac{a_{max} - a_{min}}{\frac{FE(a_{max}) - FE(a_{min})}{v_a}} \quad (172)$$

$$\omega_b(b) = \left(\frac{d}{db} (\alpha_1 U_1(b)) \right) \frac{b_{max} - b_{min}}{\frac{W_1 Y_1(b_{max}) - W_1 Y_1(b_{min})}{v_b}} \quad (173)$$

Prędkość liniową punktu C będącego końcem ramienia wahliwego czworoboku przegubowego $ABCD$ w funkcji wartości współczynnika a określono symbolem v_c , zaś rzutowanie tych prędkości na osie x oraz y określono symbolami v_{cx} oraz v_{cy} .

$$v_C(a) = \left(\frac{d}{da} (\alpha_1 F_p(a)) \right) \frac{a_{max} - a_{min}}{\frac{FE(a_{max}) - FE(a_{min})}{v_a}} * CD \quad (174)$$

$$v_C x(a) = \left(\frac{d}{da} (\alpha_1 F_p(a)) \right) \frac{a_{max} - a_{min}}{\frac{FE(a_{max}) - FE(a_{min})}{v_a}} * CD * \cos(\alpha_1 F_p(a)) \quad (175)$$

$$v_C y(a) = \left(\frac{d}{da} (\alpha_1 F_p(a)) \right) \frac{a_{max} - a_{min}}{\frac{FE(a_{max}) - FE(a_{min})}{v_a}} * CD * \sin(\alpha_1 F_p(a)) \quad (176)$$

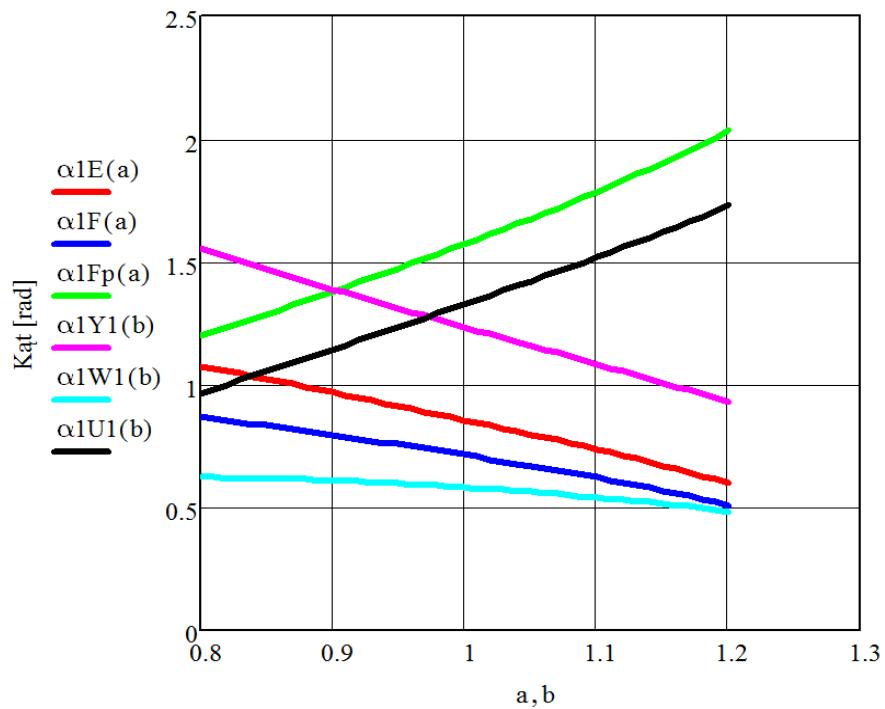
Prędkość liniową punktu T_1 będącego końcem ramienia wahliwego czworoboku przegubowego $ABCD$ w funkcji wartości współczynnika określono symbolem v_{T_1} , zaś rzutowanie tych prędkości na osie x oraz y określono symbolami v_{T_1x} oraz v_{T_1y} .

$$v_{T_1}(b) = \left(\frac{d}{db} (\alpha_1 U_1(b)) \right) \frac{b_{max} - b_{min}}{\frac{W_1 Y_1(b_{max}) - W_1 Y_1(b_{min})}{v_b}} * T_1 U_1 \quad (177)$$

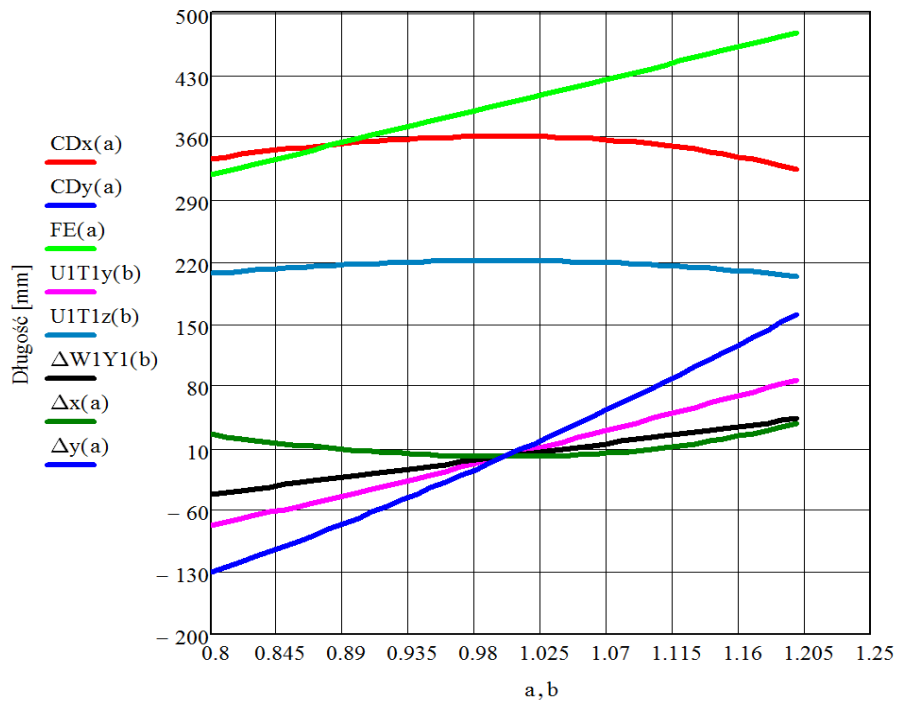
$$v_{T_1x}(b) = \left(\frac{d}{db} (\alpha_1 U_1(b)) \right) \frac{b_{max} - b_{min}}{\frac{W_1 Y_1(b_{max}) - W_1 Y_1(b_{min})}{v_b}} * \sin(\alpha_1 U_1(b)) \quad (178)$$

$$v_{T_1y}(b) = \left(\frac{d}{db} (\alpha_1 U_1(b)) \right) \frac{b_{max} - b_{min}}{\frac{W_1 Y_1(b_{max}) - W_1 Y_1(b_{min})}{v_b}} * \cos(\alpha_1 U_1(b)) \quad (179)$$

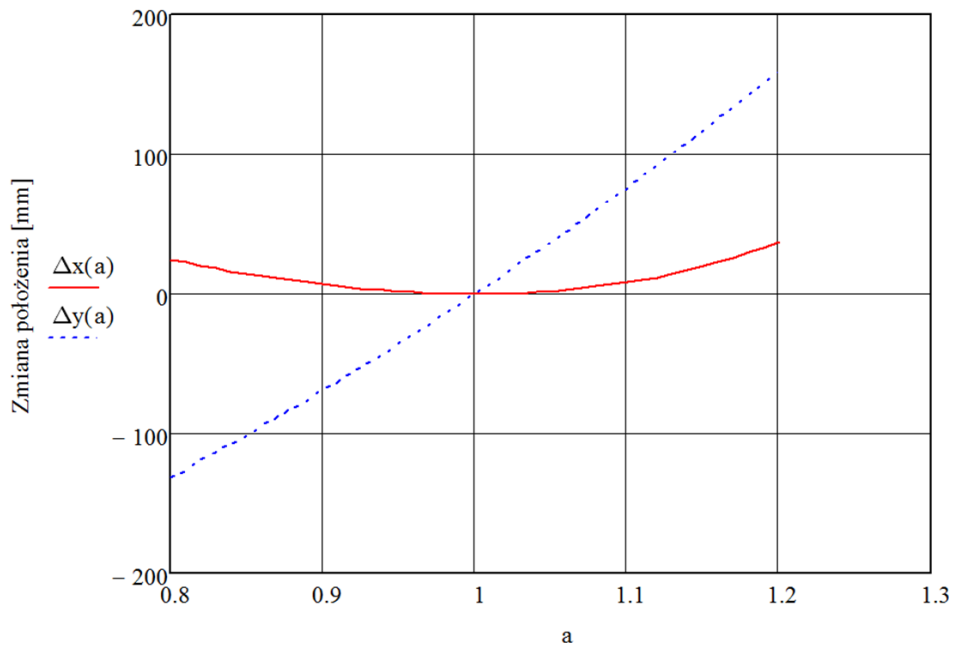
Zmiana wartości współczynników a oraz b powoduje zmiany kątów trójkątów $EE'F$ i Y_1W_1 w sposób nieliniowy, co zostało przedstawione na rysunku 32. Czworobok przegubowy $ABCD$ jest mechanizmem wahadłowym, więc zmiana współczynnika a powoduje przemieszczenie punktu C w osiach x i y . Mechanizm wywoływania ruchu noży dłutowych $Y_1U_1W_1$ jest ma również charakter wahadłowy, więc zmiana współczynnika b powoduje zmianę położenia końca noża dłutowego w osiach y oraz z , zaś zmiana współczynnika nierówności terenu h powoduje zmianę położenia noży w osiach z oraz x . Nieliniowość zmian położenia pod wpływem zmian współczynników a , b oraz h przedstawiono na rysunkach 32, 33, 34 i 35. Ponadto prędkości kątowe punktu C oraz T_1 również nie zmieniają się liniowo pod wpływem zmian współczynników a oraz b (rys. 36, 37). W wyniku tego również prędkości liniowe (rys. 38, 39) charakteryzują się pewną nieliniowością w stosunku do zmian współczynników a oraz b . W warunkach rzeczywistych takie zjawiska wpływać będą na trajektorię ruchu noży pielących i należy brać je pod uwagę przy projektowaniu systemu sterowania.



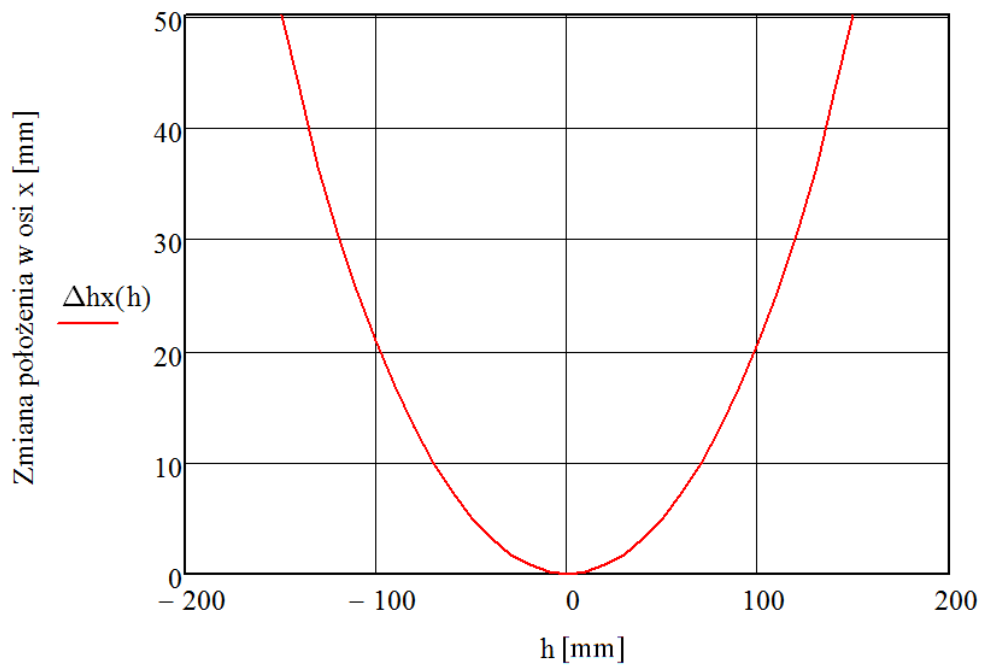
Rysunek 32. Zależność wartości poszczególnych kątów mechanizmu w zależności od wartości współczynników a i b .
Źródło: Opracowanie własne.



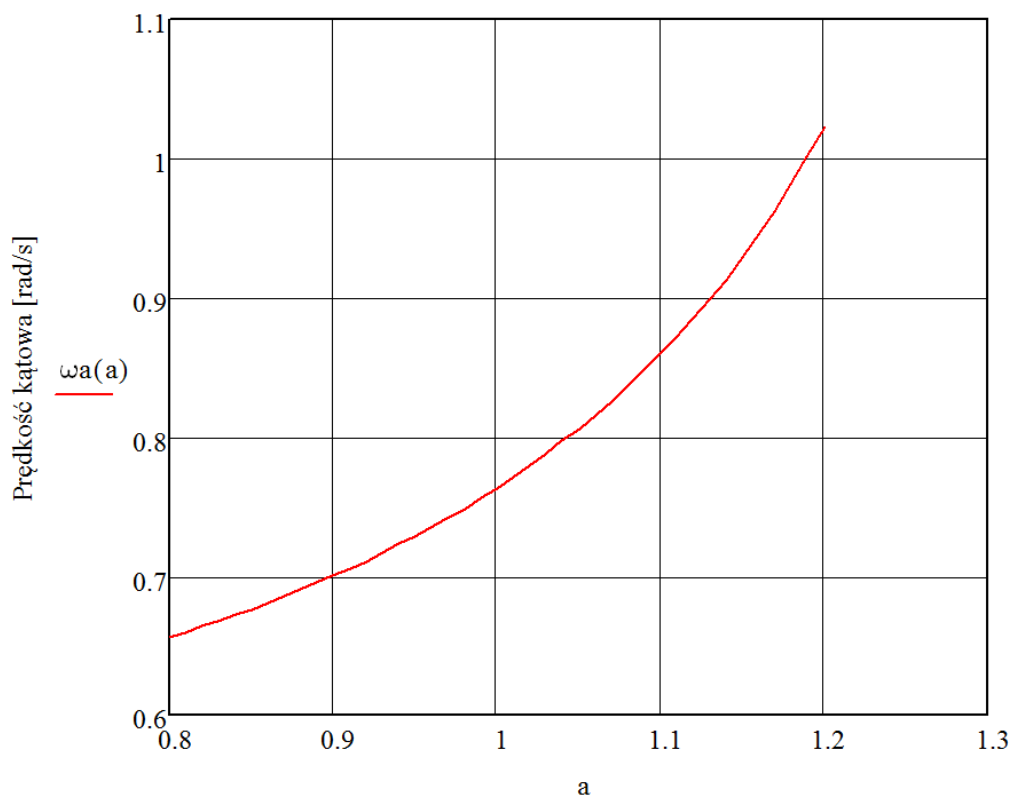
Rysunek 33. Zależność zmian długości boków czworoboków przegubowych $ABCD$ i oraz mechanizmu dźwigniowego $W_1U_1Y_1$ od współczynników a i b .
Źródło: Opracowanie własne.



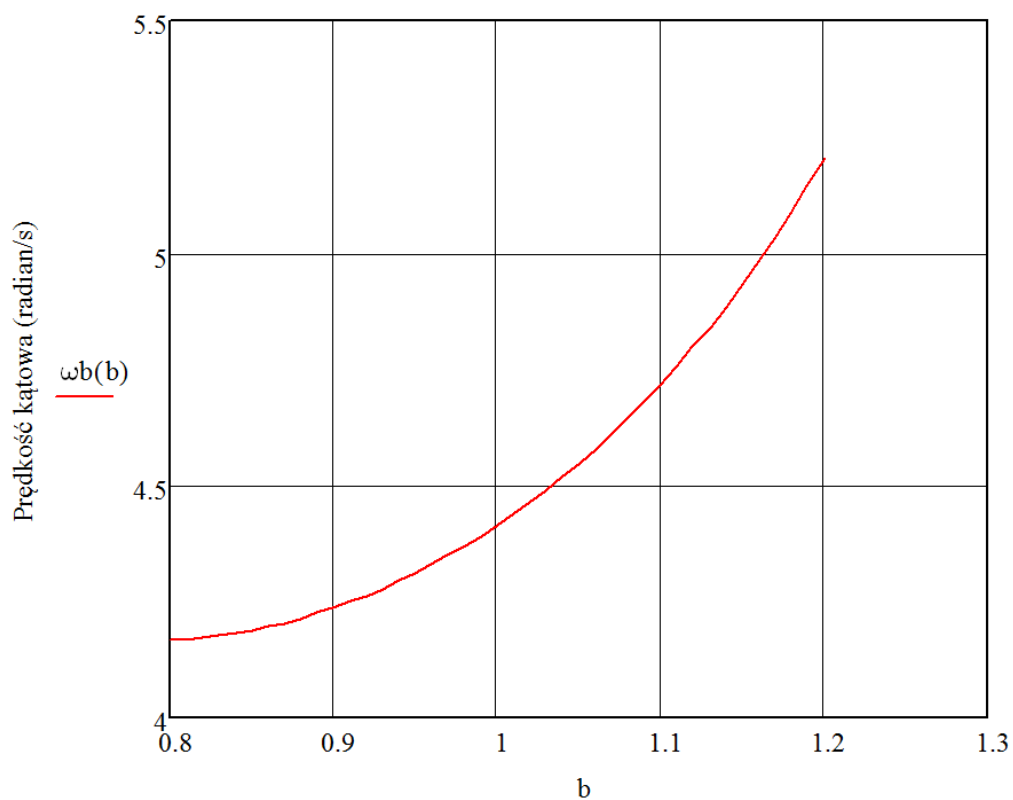
Rysunek 34. Przesunięcie części roboczej sekcji pielnika w kierunku wzdłużnym Δ_x oraz poprzecznym Δ_y w zależności od współczynnika wysunięcia tłoka a .
Źródło: Opracowanie własne.



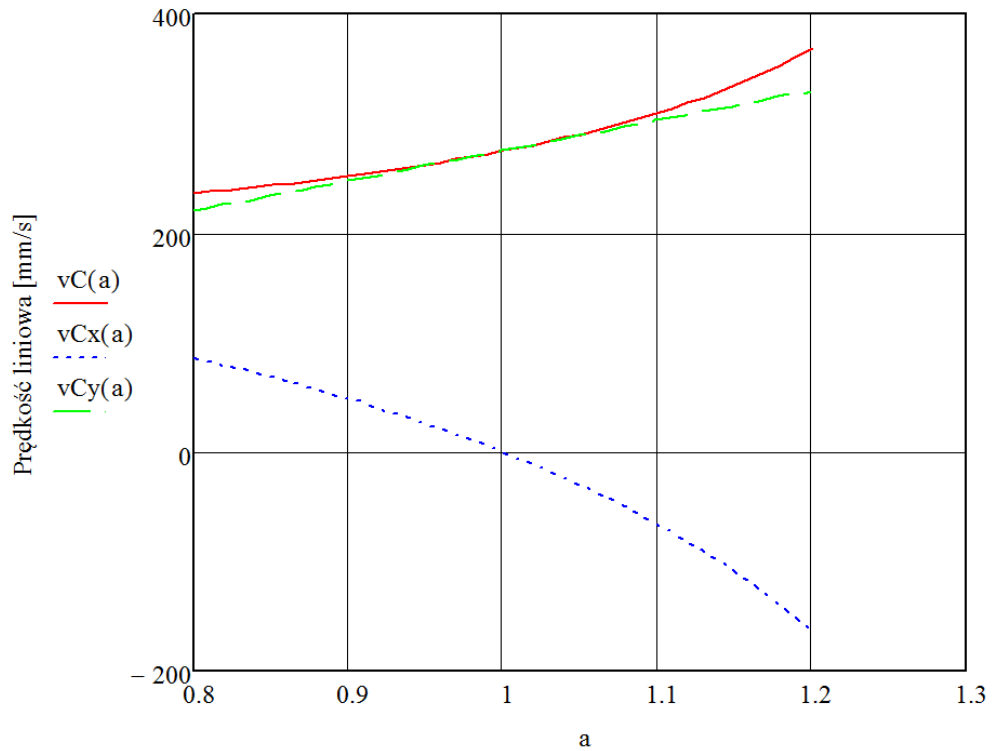
Rysunek 35. Przesunięcie wzdłużne części roboczej sekcji pielnika w zależności od zmiany wysokości terenu h .
Źródło: Opracowanie własne.



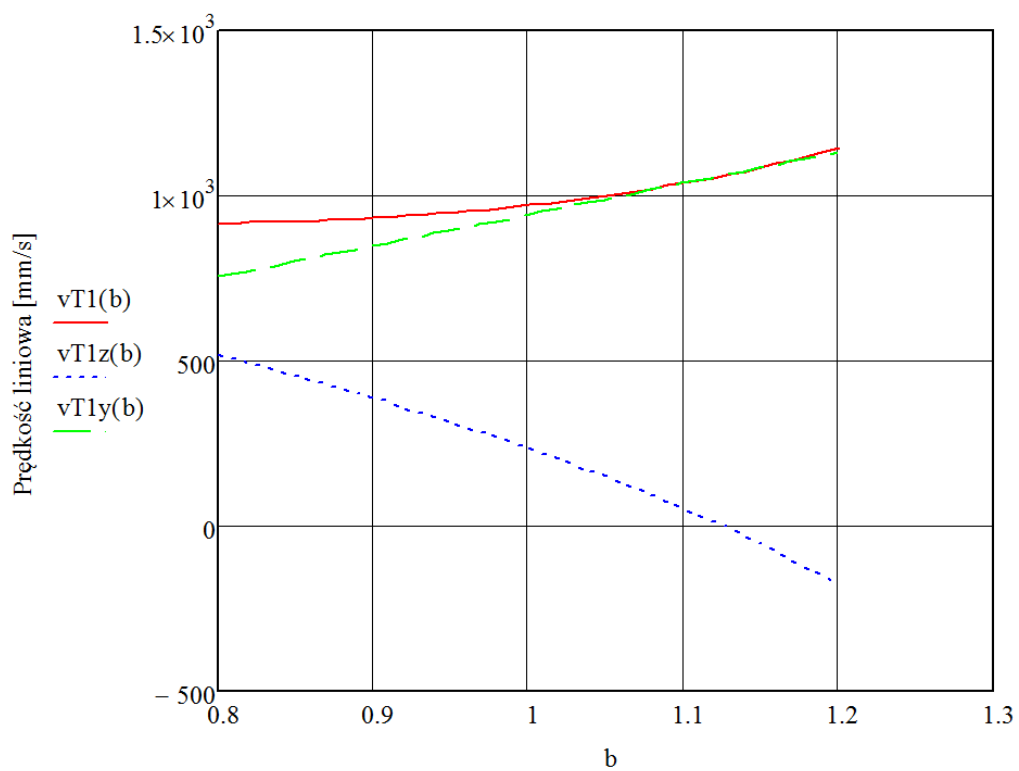
Rysunek 36. Prędkość kątowna punktu C będącego końcem ramienia wahliwego czworoboku przegubowego $ABCD$ w funkcji wartości współczynnika a .
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 37. Prędkość kątowna końców noży dłutowych T_1 oraz T_2 w funkcji wartości współczynnika b .
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 38. Prędkości liniowe punktu C w zależności od wartości współczynnika a .
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 39. Prędkości liniowe punktu końców noży dłutowych T_1 oraz T_2 w zależności od wartości współczynnika b .
Źródło: Opracowanie własne.

Ze względu na poziom złożoności mechanizmu sekcji pielącej istotnym parametrem jest promień wodzący mechanizmu przy różnych kombinacjach współczynników a , b oraz h . Długość promienia wodzącego wyznaczono od punktu mocowania sekcji pielącej D do punktu końca noża dłutowego T_1 . Rzutowanie promienia wodzącego na oś x , oznaczone symbolem $r_{T_1}x$ zależy od parametrów a oraz h , ponieważ ruch wahadłowy noży dłutowych nie wpływa na przesunięcie końca noża dłutowego T_1 w osi x . Rzutowanie promienia wodzącego na oś y , oznaczone symbolem $r_{T_1}y$ zależy od parametrów a oraz b , ponieważ zmiana wysokości terenu h nie wpływa na przesuw boczny końca noża dłutowego T_1 , a więc ruch w osi y . Rzutowanie promienia wodzącego na oś z , oznaczone symbolem $r_{T_1}z$ zależy od parametrów b oraz h . Zmiana długości siłownika hydraulicznego FE powoduje jedynie przesuw boczny i wzdłużny końca noża dłutowego T_1 , lecz nie wpływa na zmianę jego wysokości, czyli ruch w osi z . Na podstawie tak zdefiniowanych funkcji rzutów promieni wodzących na osie x , y oraz z możliwe jest wyznaczenie promienia obliczając pierwiastek kwadratów poszczególnych rzutów promieni wodzących na osie x , y i z , co tworzy równanie trzech zmiennych, czyli a , b oraz h . W celu przedstawienia wartości promieni wodzących na wykresach, zdecydowano się na potraktowanie h jako parametru stałego wyznaczono osobne równania wypadkowego promienia wodzącego dla wartości $h_{min} = -150$ mm, $h_0 = 0$ mm oraz $h_{max} = 150$ mm, który oznaczono odpowiednio $r_{T_1}h_{min}$, $r_{T_1}h_0$ i $r_{T_1}h_{max}$. Długości poszczególnych promieni wodzących obliczono na podstawie wzorów:

$$r_{T_1}x(a, h) = |CD_x(a) + HI * \cos(\alpha_{HI}) - LM_x(h) + O_1S_1| \quad (180)$$

$$r_{T_1}y(a, b) = \left| CD_y(a) + \frac{BC}{2} - \frac{l_1l_2}{2} + O_1S_1 + U_1Y_1(b) * \frac{U_1Y_1+Y_1T_1}{U_1Y_1} \right| \quad (181)$$

$$r_{T_1}z(b, h) = \left| HI * \sin(\alpha_{HI}) - \frac{J_1L_1}{2} - h - N_1O_1 - U_1Y_1z(b) * \frac{U_1Y_1+Y_1T_1}{U_1Y_1} \right| \quad (182)$$

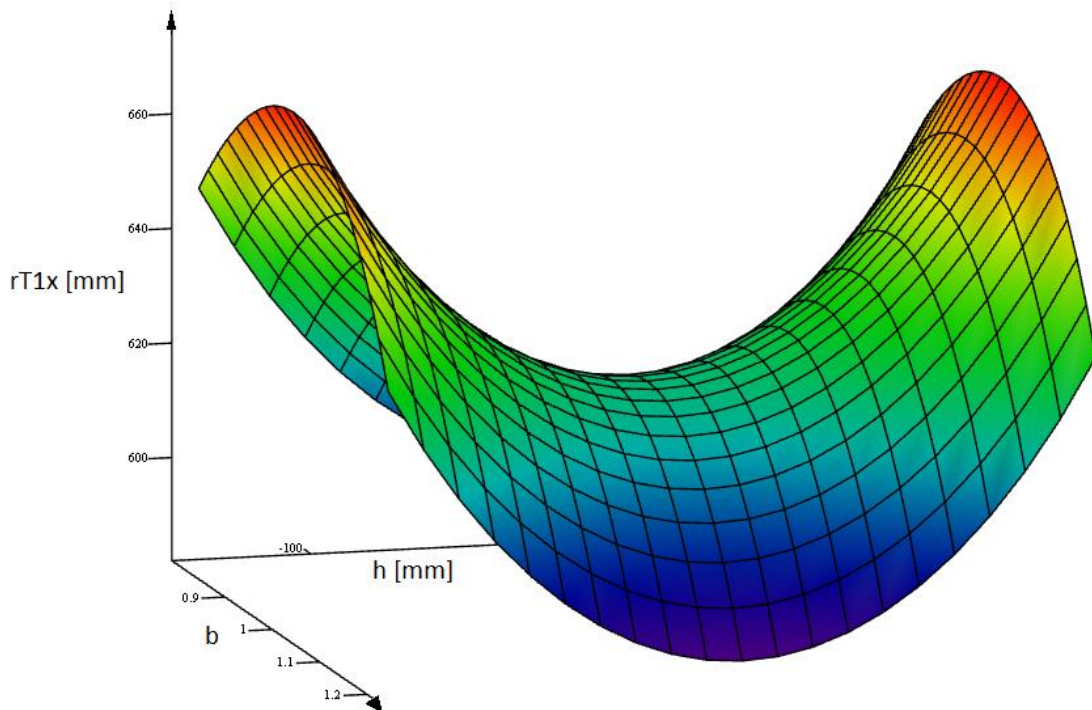
$$r_{T_1}h_{min}(a, b) = \sqrt{r_{T_1}x(a, h_{min})^2 + r_{T_1}y(a, b)^2 + r_{T_1}z(b, h_{min})^2} \quad (183)$$

$$r_{T_1}h_0(a, b) = \sqrt{r_{T_1}x(a, h_0)^2 + r_{T_1}y(a, b)^2 + r_{T_1}z(b, h_0)^2} \quad (184)$$

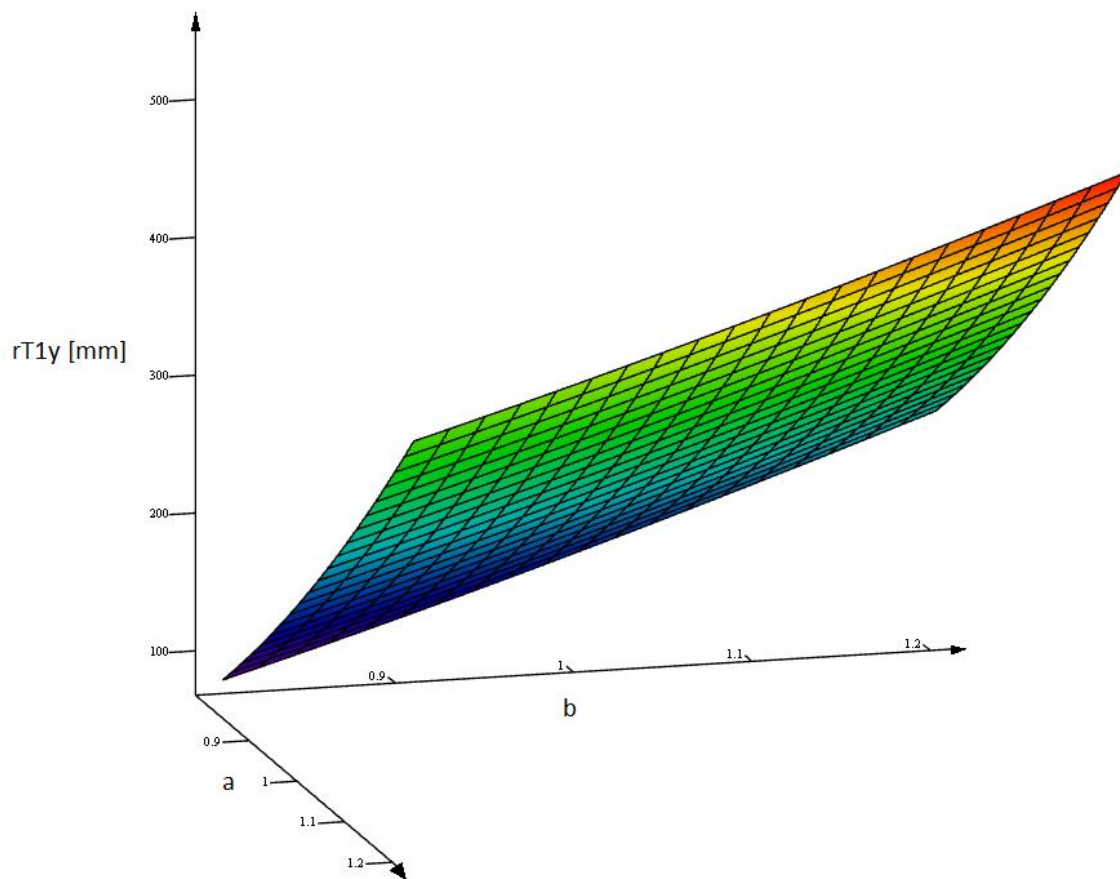
$$r_{T_1}h_{max}(a, b) = \sqrt{r_{T_1}x(a, h_{max})^2 + r_{T_1}y(a, b)^2 + r_{T_1}z(b, h_{max})^2} \quad (185)$$

Długość promienia wodzącego rzutowanego na os x (rys. 40) oznaczona symbolem $r_{T_1}x$, przedstawia zmianę długości w kierunku jazdy, której wahania wynoszą 70 mm. Maksymalna wartość występuje przy $a = 1$ oraz $h = 0$ mm, więc w ustawieniu centralnym czworoboku przegubowego poprzecznego $ABCD$ i przy braku odchyłki nierówności

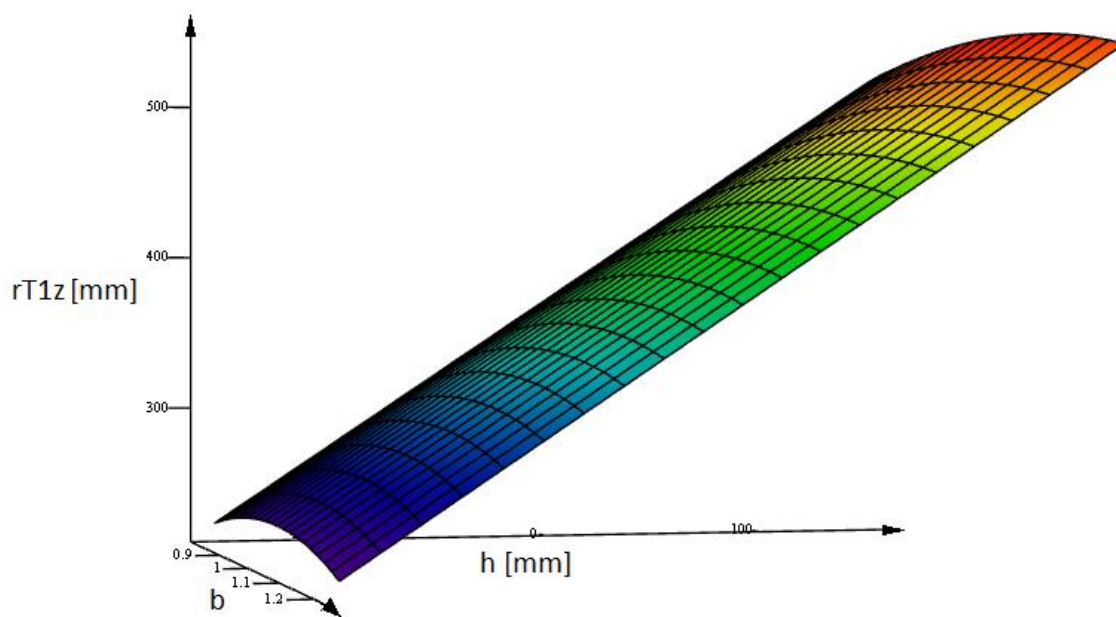
terenu. Zarówno przesuw poprzeczny, jak i zmiana wysokości zmniejsza wartość promienia wodzącego rzutowanego na oś x . Jest to bardzo istotna obserwacja, ponieważ w przypadku sterowania ruchem poprzecznym oraz przy zmianie nierówności terenu następuje również dodatkowa zmiana położenia noży pielących wzdłuż kierunku jazdy. Z punktu widzenia sterowania ruchem noży dłutowych T_1 i T_2 wprowadzać to może pewne zakłócenia związane z prawidłowym czasem wywołania wysuwu siłowników pneumatycznych W_1Y_1 oraz W_2Y_2 w celu ominięcia rośliny. Wartości r_{T_1y} (rys. 41) oraz r_{T_1z} (rys. 42), czyli składowe promienia wodzącego w osiach y oraz z pod wpływem zmian współczynników a , b oraz h zmieniają się w sposób zbliżony do liniowego.



Rysunek 40. Wartość składowej x promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego T_1 w zależności od współczynników b oraz h .
Źródło: Opracowanie własne.

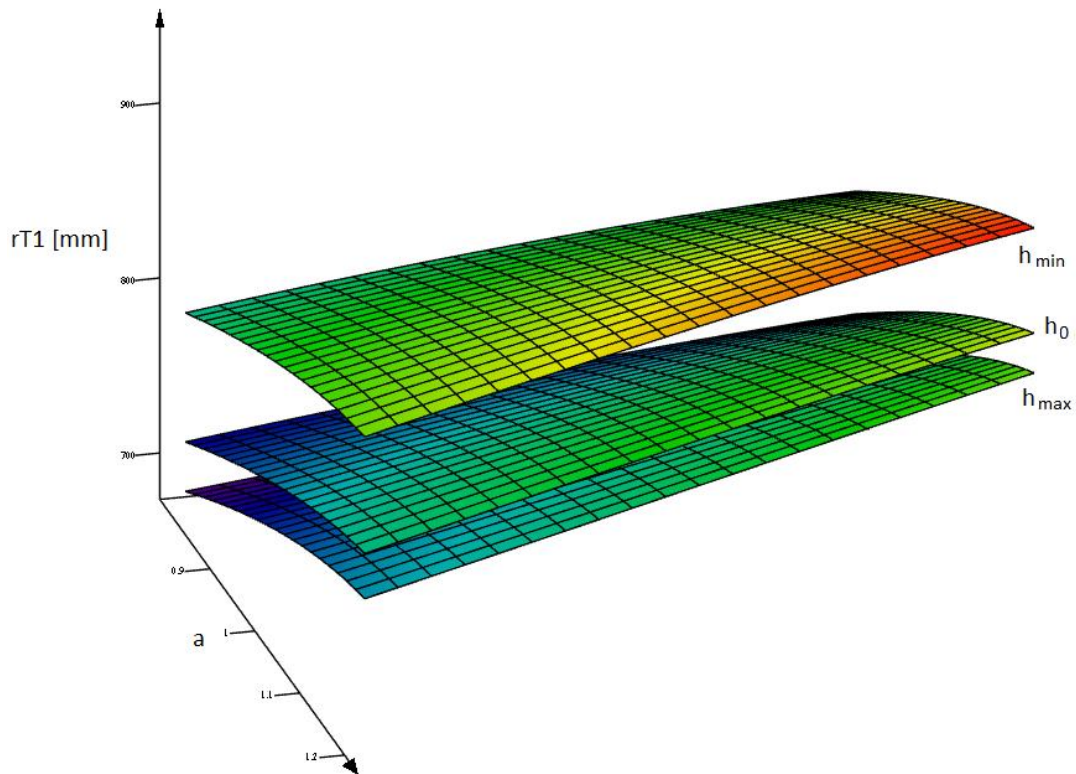


Rysunek 41. Wartość składowej y promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego T_1 w zależności od współczynników a i b .
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 42. Wartość składowej z promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego T_1 w zależności od współczynników b i h .
 Źródło: Opracowanie własne.

Wykres bezwzględnych wartości promienia wodzącego (rys. 43) opisany jest w funkcji parametrów a i b . Wykres zawiera rozkłady dla wartości h_{min} , h_0 i h_{max} . Zaobserwować można większą różnicę pomiędzy h_{min} i h_0 , niż między h_{max} i h_0 . Wynika to z faktu, iż przy podwyższaniu poziomu gleby, pomimo zmniejszania odległości noża T_1 w osi z , zwiększa się jego odległość w osi x (rys. 35). Z kolei obniżanie poziomu gleby zwiększa zarówno odległość w osi x jak i w osi z .

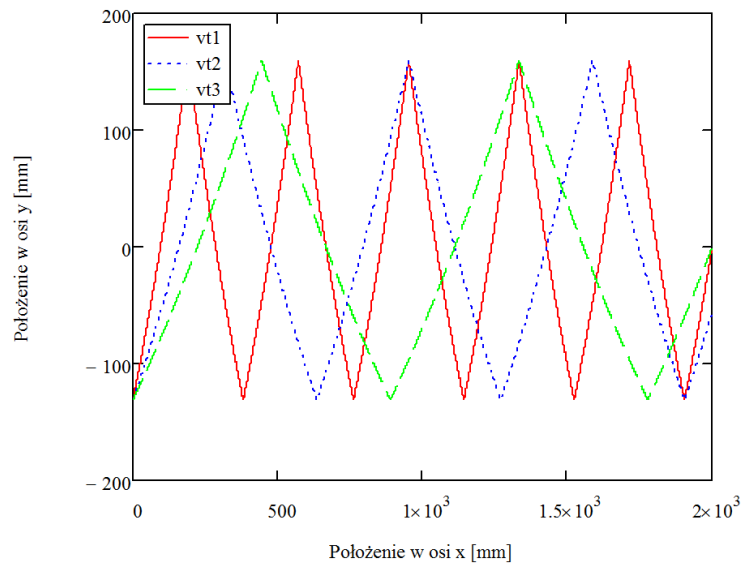


Rysunek 43. Wykresy bezwzględnych wartości długości promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego T_1 w zależności od parametrów a i b dla wartości h_{max} , h_0 i h_{min} .
Źródło: Opracowanie własne.

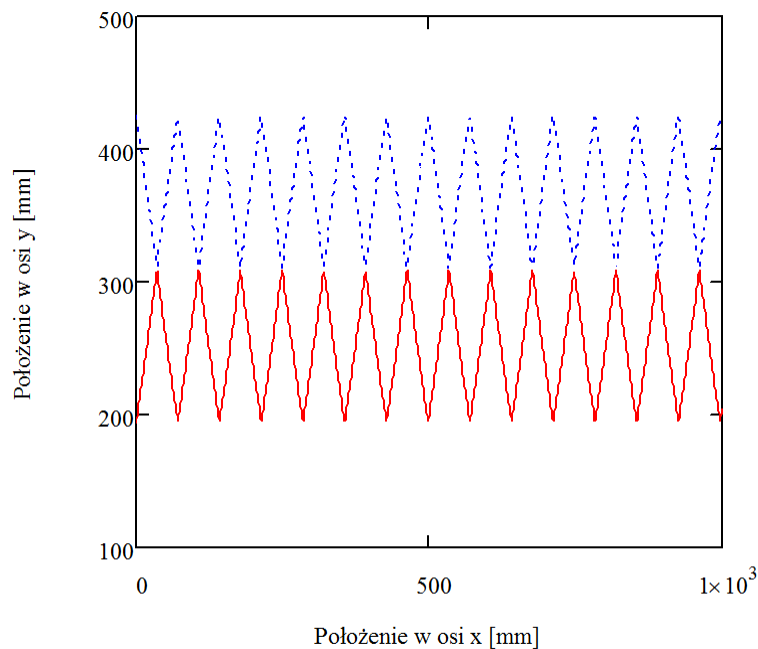
6.4. Symulacje trajektorii ruchu poszczególnych elementów sekcji pielącej

W celu weryfikacji możliwości spełnienia parametrów brzegowych związanych z odległościami roślin oraz prędkością jazdy sekcji pielącej przeprowadzono szereg symulacji ukazujących przypadki graniczne trajektorii ruchów dla zadanych prędkości jazdy wynoszących $v_{t1}=0,3$ m/s, $v_{t2}=0,5$ m/s, oraz $v_{t3}=0,7$ m/s. Symulacje torów jazdy przeprowadzono w programie MatchCad. Rysunek 44 przedstawia wykres trajektorii punktu C (rys. 27) podczas symulacji ciągłego zmieniania położenia poprzecznego w skrajne pozycje przy zadanych prędkościach jazdy. Rysunki nr 45, 46, 47 przedstawiają trajektorię ruchu końców noży dłutowych T_1 oraz T_2 (rys. 27) przy ciągłym ruchu

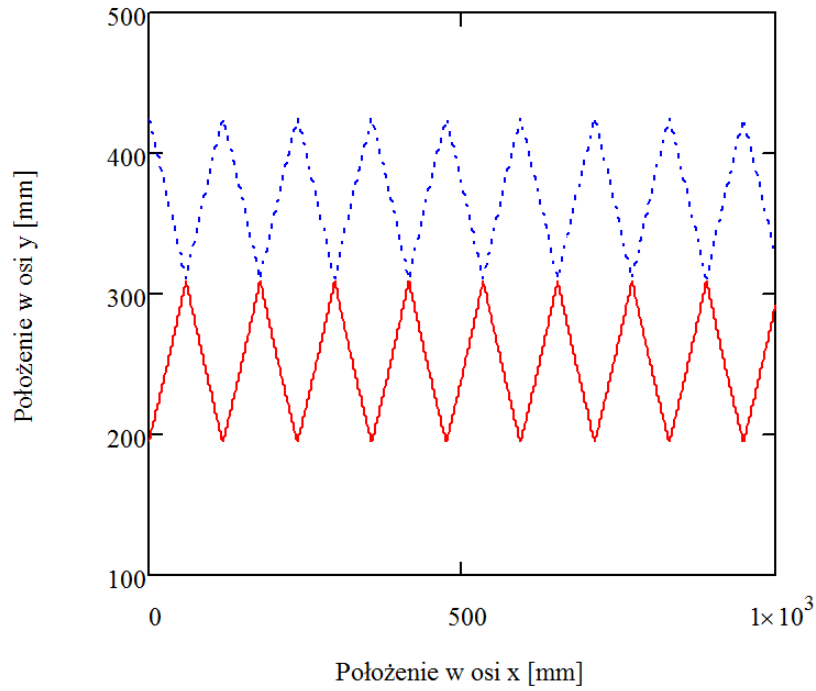
posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 i W_2Y_2 i stałym położeniu siłownika FE . Rysunki nr 48, 49, 50 przedstawiają trajektorie ruchu noży pielących przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 i W_2Y_2 połączonym z ciągłym ruchem posuwisto-zwrotnym siłowników FE przy zadanych prędkościach jazdy v_{t1} , v_{t2} , v_{t3} .



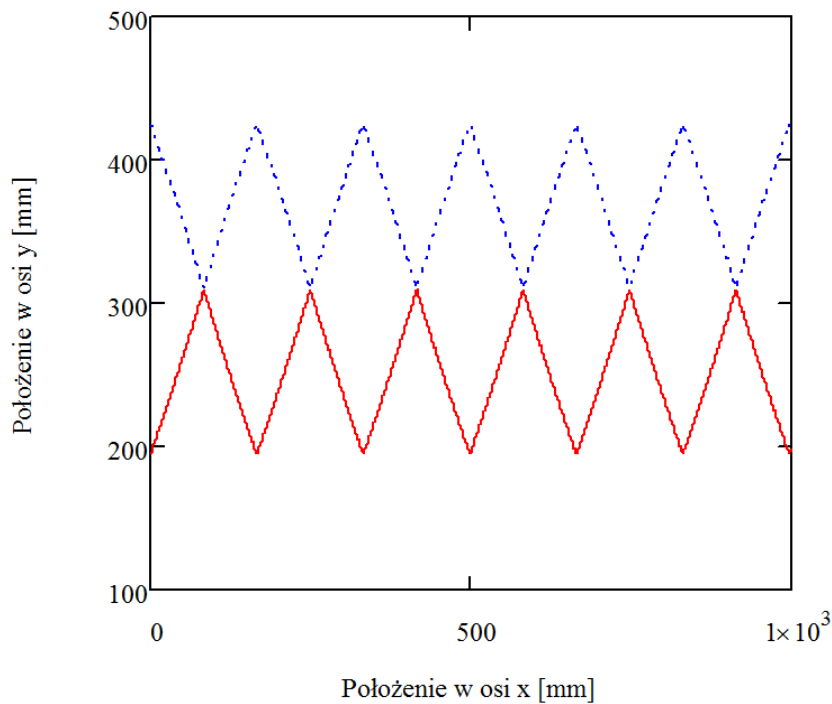
Rysunek 44. Wykres zmian położenia poprzecznych części roboczej sekcji pielącej przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 i W_2Y_2 i stałym położeniu siłownika FE .
Źródło: Opracowanie własne.



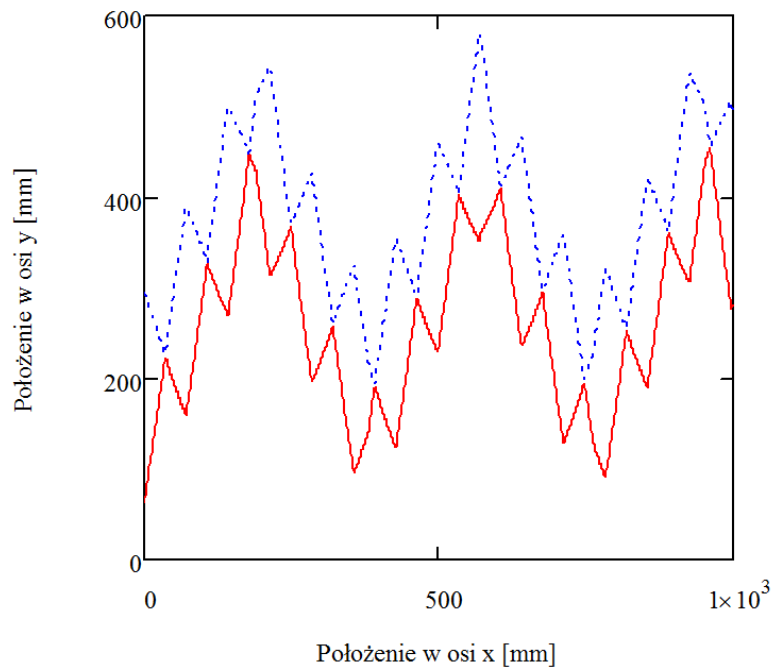
Rysunek 45. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t1} .
Źródło: Opracowanie własne.



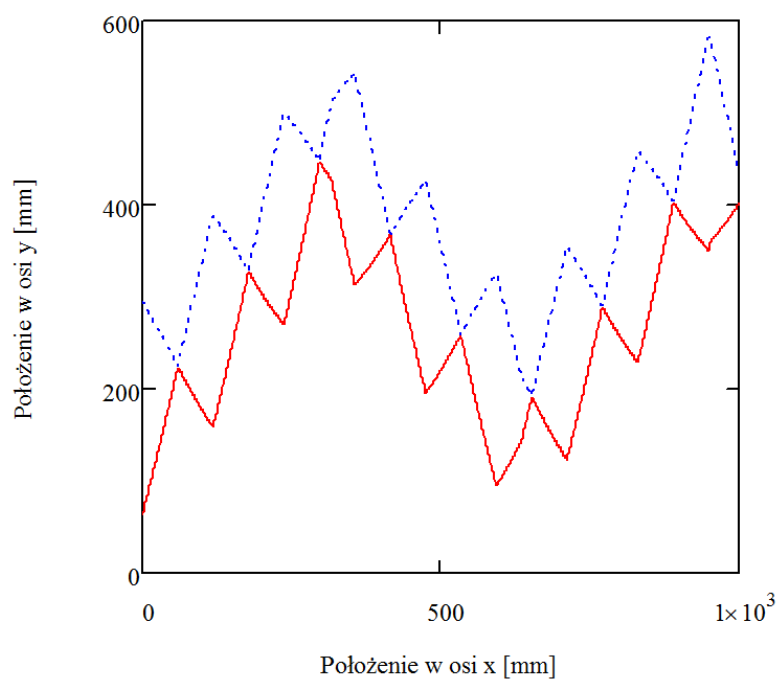
Rysunek 46. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t2} .
 Źródło: Opracowanie własne.



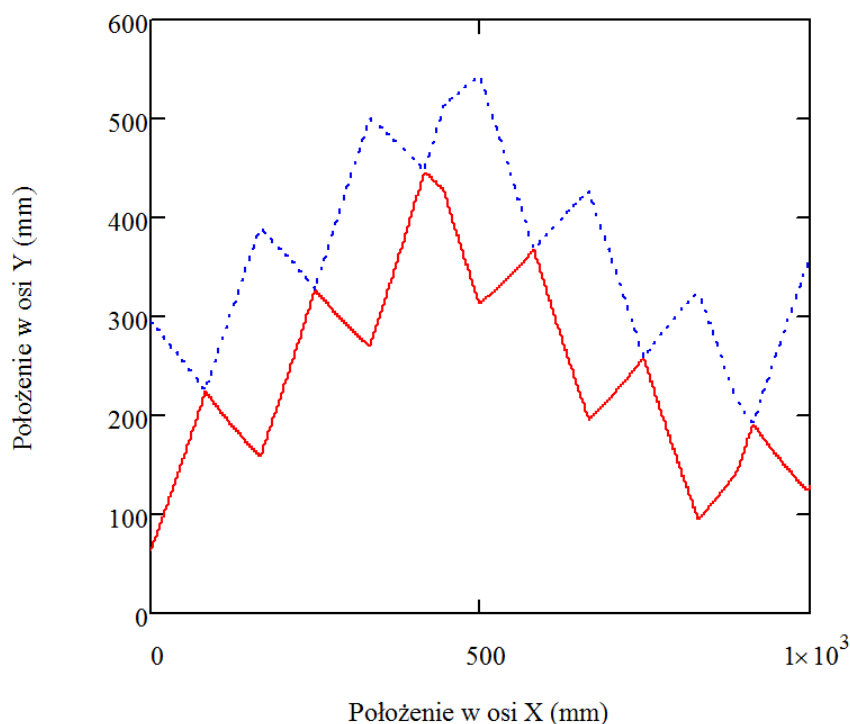
Rysunek 47. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t3} .
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 48. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t1} .
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 49. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t2} .
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 50. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych T_1 i T_2 przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników W_1Y_1 oraz W_2Y_2 i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v_{t3} .
Źródło: Opracowanie własne.

Wykres przedstawiony na rysunku 44 pokazuje, iż dla prędkości v_{t1} i v_{t2} teoretycznie możliwa jest praca w skrajnych warunkach, a więc przy przesunięciu poprzecznym kolejnych roślin w rzędzie o całkowity zakres ruchu poprzecznego wynoszący 0,3 m przy odległości pomiędzy roślinami wynoszącej 0,5 m. W przypadku prędkości v_{t3} podczas wykonania przemieszczenia pomiędzy skrajnymi pozycjami na osi y, sekcja pieląca przebyła w osi x dystans powyżej 0,4 m w osi y przekraczając zakładaną minimalną odległość pomiędzy roślinami w rzędzie wynoszącą 0,3 m.

Wykresy przedstawione na rysunkach 45, 46 i 47 pokazują, iż prędkość ruchu wahadłowego noży dłutowych umożliwia usuwanie chwastów pomiędzy roślinami w rzędzie dla wszystkich zadanych prędkości. Wykresy przedstawione na rysunkach 48, 49 i 50 pokazują złożenie symulacji ruchu poprzecznego (rys. 44) oraz symulacji z rysunków 45, 46 oraz 47 i potwierdzają obserwację, że prędkość ruchu wahadłowego noży dłutowych pozwala na pracę ze wszystkimi zadanymi prędkościami, lecz przy skrajnych warunkach ustawienia poprzecznego efektywna praca z prędkością 0,7 m/s jest niemożliwa, nawet przy odległościach roślin w rzędzie wynoszących 0,4m.

6.5. Podsumowanie

Analizy modelu matematycznego oraz symulacje przeprowadzone w środowisku MathCad w potwierdzają możliwości zakresu ruchu mechanizmu do realizacji zmian położeń noży pielących dla przyjętych wcześniej założeń obejmujących zmienność liniowości rzędu roślin.

Dodatkowo przeprowadzono analizy kinematyczne uwzględniające prędkość liniową ciągnika prędkości wynoszącą 0,3, 0,5 oraz 0,7 m/s.

Analizy pokazały, iż w przypadku prędkości 0,7 m/s przy wcześniej postawionych prędkościach liniowych siłowników przy uproszczeniu ich ruchu do jednostajnego docelowa trajektoria ruchu noży będzie niewystarczająca do spełnienia skrajnego poziomu zmienności rzędów wynikającego z wartości granicznych położeń poprzecznych części roboczej sekcji pielnika. Nawet przy pominięciu opóźnień związanych z prędkością działania komputera sterującego. Założenia budowanego prototypu sekcji pielącej nie obejmują prędkości wyższych, niż 0,5 m/s oraz maksymalne odchyłki położenia roślin względem osi rzędu wynoszą ± 60 mm, lecz symulacje miały na celu sprawdzenie możliwości i granicznych wartości dla opracowanego mechanizmu.

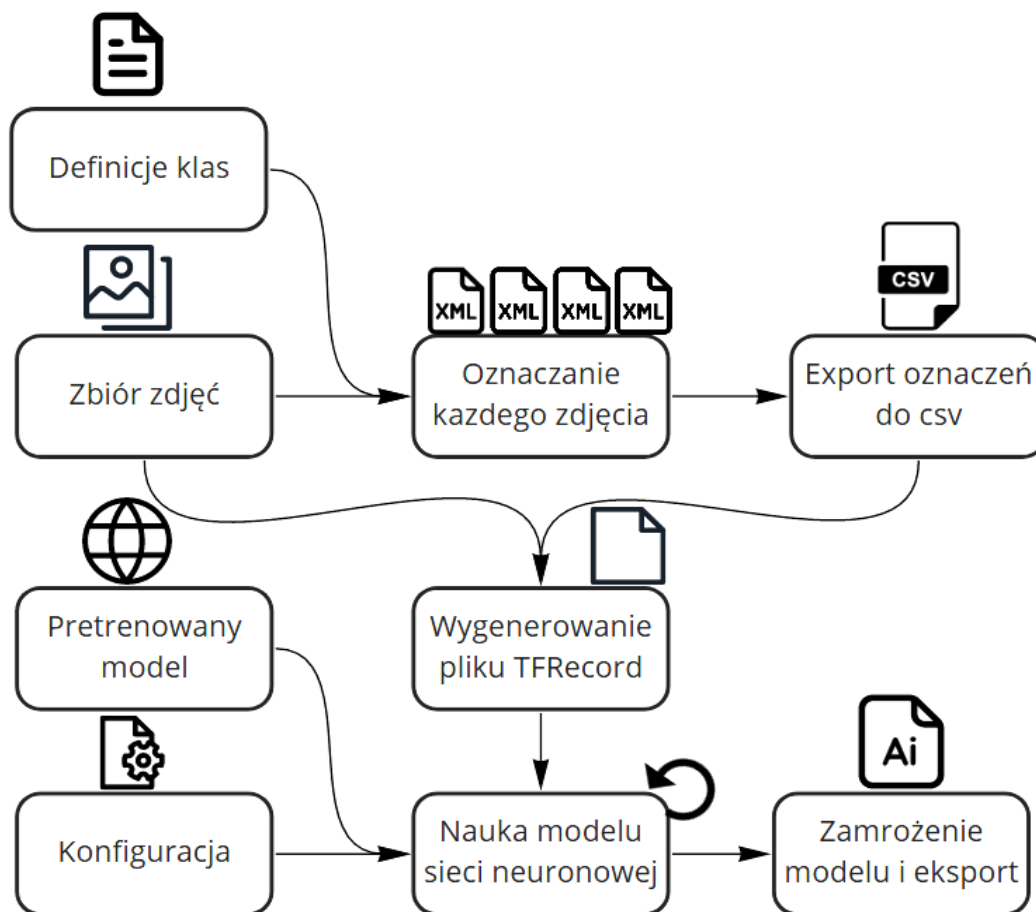
7. Wybór technologii rozpoznawania roślin

W ostatnich latach nastąpił przełomowy rozwój zarówno technologii do wykrywania obiektów opartych o algorytmy sztucznej inteligencji (AI – Artificial Intelligence) w szczególności o konwolucyjne sieci neuronowe (CNN – Convolutional neural networks) [83], jak i rozwój wydajności komputerów, również mikrokomputerów przystosowanych do sterowania urządzeniami w koncepcji Internetu Rzeczy (IoT – Internet of Things) [84]. W celu stworzenia systemu sterującego sekcją pielącą dokonano przeglądu dostępnych, otwartoźródłowych rozwiązań do identyfikacji obiektów w czasie rzeczywistym uwzględniając możliwość implementacji na mikrokomputerach.

7.1. Proces tworzenia modeli sieci neuronowych do rozpoznawania roślin w danej uprawie

Tensorflow jest zestawem otwartoźródłowych bibliotek oprogramowania umożliwiającym tworzenie i trening modeli uczenia maszynowego oraz głębokiego uczenia (ang. Deep Learning, DL) [85]. Jest to jedno z najpopularniejszych narzędzi wykorzystywanych w dziedzinie sztucznej inteligencji. Ich pierwszą wersję wydano 9 listopada 2015 roku, a publicznie udostępniono je 11 lutego 2017 roku.

Wykorzystując możliwości oprogramowania Tensorflow dotyczące detekcji obiektów opracowano kompleksowy proces tworzenia i treningu modelu sieci neuronowej, na której oparto algorytm sterujący (rys. 51).



Rysunek 51. Proces opracowania gotowego modelu sieci neuronowej do rozpoznawania roślin.
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji technicznej TensorFlow [85].

Do nauki modelu sieci neuronowej skorzystano z repozytorium zdjęć roślin rzepy w serwisie GitHub [86]. Zbiór ten zawierał 200 zdjęć roślin wśród chwastów w różnych pozycjach. W procesie tworzenia sieci neuronowej wykorzystano następujące kroki:

1. Definicje klas – utworzenie pliku tekstowego z klasami obiektów, w omawianym przypadku klasy to WEED (chwast) i CROP (roślina uprawiana).
2. Zbiór zdjęć – przygotowanie zbioru zdjęć (rys. 52). W omawianym przypadku do uzyskania efektywnych rezultatów potrzebne jest 100-200 zdjęć. Mechanizmy treningu Tensorflow umożliwiają dynamiczne rozszerzanie zbioru treningowego poprzez przekształcanie istniejących zdjęć [85].



Rysunek 52. Przykłady zdjęć rzepy pozyskanych z repozytorium GitHub.

Źródło: [86].

3. Pretrenowany model – wybór i pobranie pliku wstępnie wytrenowanego modelu do wykrywania obiektów.
4. Konfiguracja – zdefiniowanie parametrów konfiguracyjnych do nauki, obejmują m.in. liczbę epok, iteracji oraz ilość równoległych wątków nauki [85].
5. Oznaczenie zdjęć (ang. labelling) – w tym celu wykorzystano darmowe oprogramowanie specjalistyczne LabelIMG generujące pliki XML na podstawie zdjęć oznaczonych przez użytkownika w formacie Pascal VOC (Visual Object Classes) [87]. Oznaczanie zdjęć przedstawiono na rysunku 53, a przykładowa struktura pliku wyjściowego XML przedstawiona została na rysunku nr 54.



Rysunek 53. Oznaczanie zdjęć w oprogramowaniu LabelMG.
Źródło: Opracowanie własne.

```

<?xml version="1.0"?>
- <annotation>
  <folder>data xml</folder>
  <filename>40.jpg</filename>
  <path>/home/olle/data xml/40.jpg</path>
  - <source>
    <database>Unknown</database>
  </source>
  - <size>
    <width>858</width>
    <height>644</height>
    <depth>3</depth>
  </size>
  <segmented>0</segmented>
  - <object>
    <name>crop</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>1</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    - <bndbox>
      <xmin>1</xmin>
      <ymin>1</ymin>
      <xmax>274</xmax>
      <ymax>557</ymax>
    </bndbox>
  </object>
  - <object>
    <name>crop</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>1</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    - <bndbox>
      <xmin>1</xmin>
      <ymin>452</ymin>
      <xmax>212</xmax>
      <ymax>644</ymax>
    </bndbox>
  </object>
  - <object>
    <name>weed</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>1</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    - <bndbox>
      <xmin>273</xmin>
      <ymin>1</ymin>
      <xmax>858</xmax>
      <ymax>413</ymax>
    </bndbox>
  </object>
</annotation>

```

Rysunek 54. Przykładowa zawartość pliku XML zawierająca definicje obiektów na zdjęciu w formacie Pascal VOC.
Źródło: Opracowanie własne.

6. Eksport oznaczeń do pliku CSV – pliki XML wykonane dla wszystkich zdjęć należy przetransformować do jednego, zbiorczego pliku CSV (rys. 55) zawierającego definicje obiektów na zdjęciach w formacie akceptowalnym przez Tensorflow. W tym celu opracowano skrypt w języku Python wykonujący tę operację.

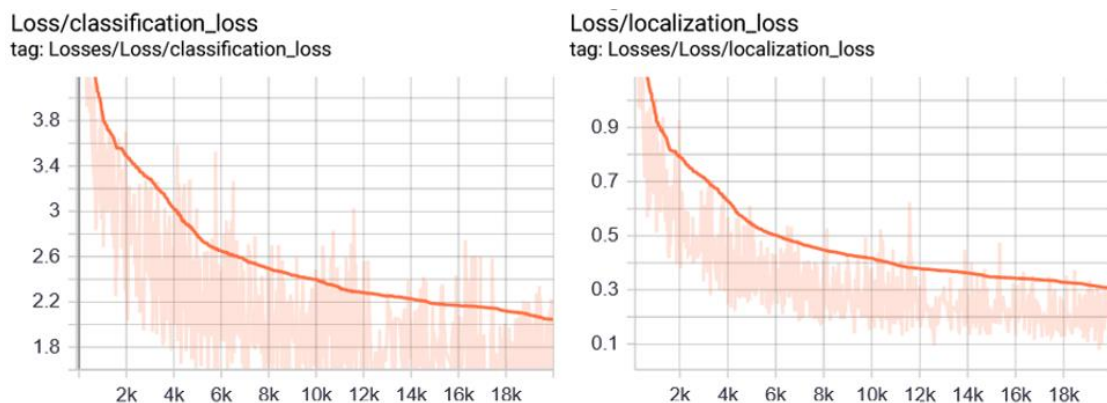
```

filename,width,height,class,xmin,ymin,xmax,ymax
0.jpg,858,644,weed,112,302,175,400
0.jpg,858,644,weed,265,57,608,212
0.jpg,858,644,weed,444,1,634,165
0.jpg,858,644,weed,1,1,107,404
0.jpg,858,644,weed,35,1,170,117
0.jpg,858,644,weed,314,140,578,370
0.jpg,858,644,weed,245,537,414,642
0.jpg,858,644,crop,2,401,240,642
0.jpg,858,644,crop,669,175,815,443
0.jpg,858,644,crop,542,349,814,635
0.jpg,858,644,crop,125,434,365,533
0.jpg,858,644,crop,185,138,325,352
0.jpg,858,644,crop,211,1,358,48
0.jpg,858,644,crop,757,1,858,176
1.jpg,858,644,crop,659,24,858,412
1.jpg,858,644,crop,1,2,115,190
1.jpg,858,644,weed,555,1,610,50
1.jpg,858,644,weed,180,559,220,615

```

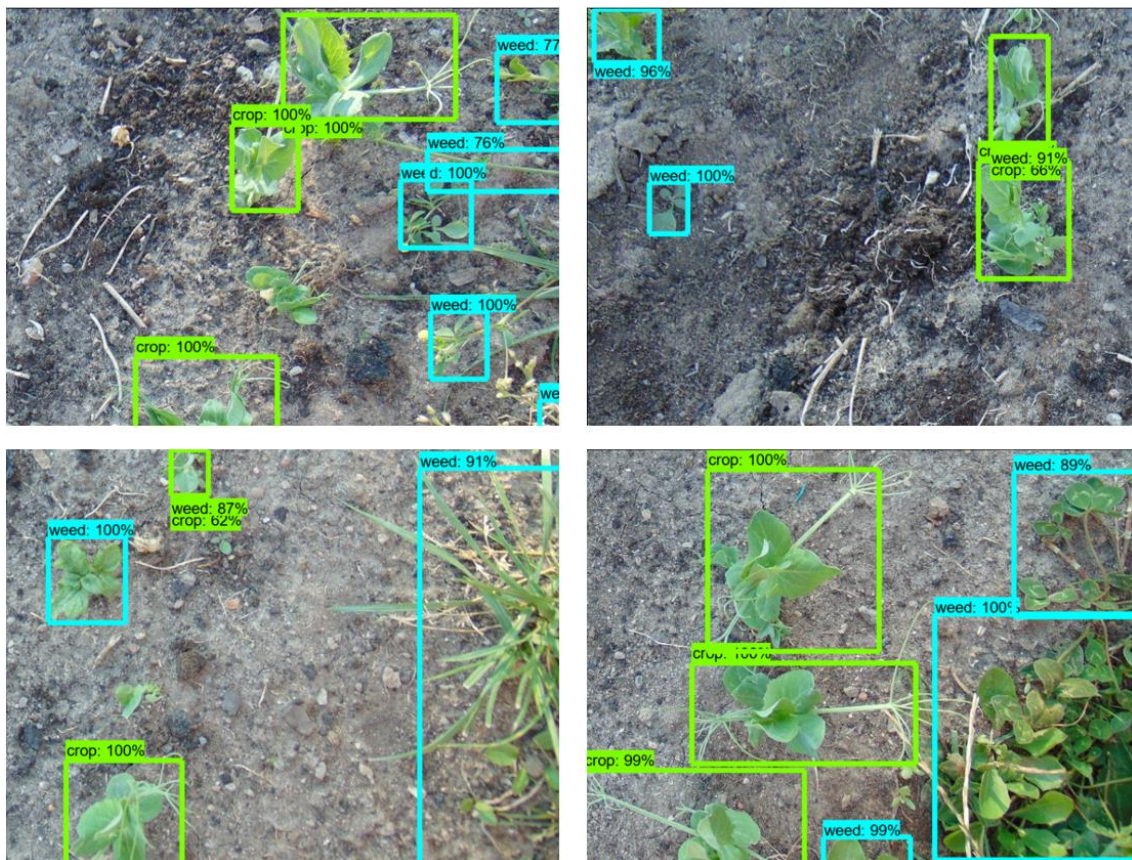
Rysunek 55. Przykładowa zawartość zbiorczego pliku CSV z definicjami obiektów. Źródło: Opracowanie własne.

7. Wygenerowanie pliku TFRecord – uruchomienie skryptu dostarczonego przez Tensorflow, który przyjmując zbiór zdjęć i plik zbiorczy CSV generuje plik TFRecord.
8. Nauka modelu sieci neuronowej – uruchomienie skryptu dostarczonego przez Tensorflow, który przyjmując plik TFRecord, pretrenowany model oraz konfigurację wykonuje iteracyjny trening sieci neuronowej. Moduł TensorBoard umożliwia podgląd nauki w czasie rzeczywistym oraz generuje wykresy poszczególnych metryk opisujących dokładność modelu, takich jak błąd klasyfikacji obiektów czy błąd dopasowania ramek wykrytego obiektu. Na rysunku 56 przedstawiono przebieg nauki modelu SSD (Single-Shot Detector).



Rysunek 56. Podgląd treningu modelu SSD Mobilenet v2 na zbiorze zdjęć rzepy. Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [85].

9. Zamrożenie modelu i eksport. Po wyeksportowaniu nauczonego modelu do odpowiedniego formatu przystosowanego do detekcji możliwe jest napisanie skryptu do wykrywania obiektów i zweryfikowanie działania modelu. Na rysunku nr 53 przedstawiono zdjęcia, na których wykonano detekcję obiektów, a następnie wynik detekcji obiektów nałożono na zdjęcia w postaci prostokątów. Zielone prostokąty są to rośliny uprawiane, a więc obiekty klasy *CROP*, zaś jasnoniebieskie prostokąty obejmują obiekty klasy *WEED*, czyli chwasty. Obok typu obiektu widnieje pewność, z jaką model sieci neuronowej określił klasę obiektu.



Rysunek 57. Wyniki detekcji obiektów na zbiorze testowym po wykonaniu 20000 kroków treningu modelu SSD.

Źródło: Opracowanie własne.

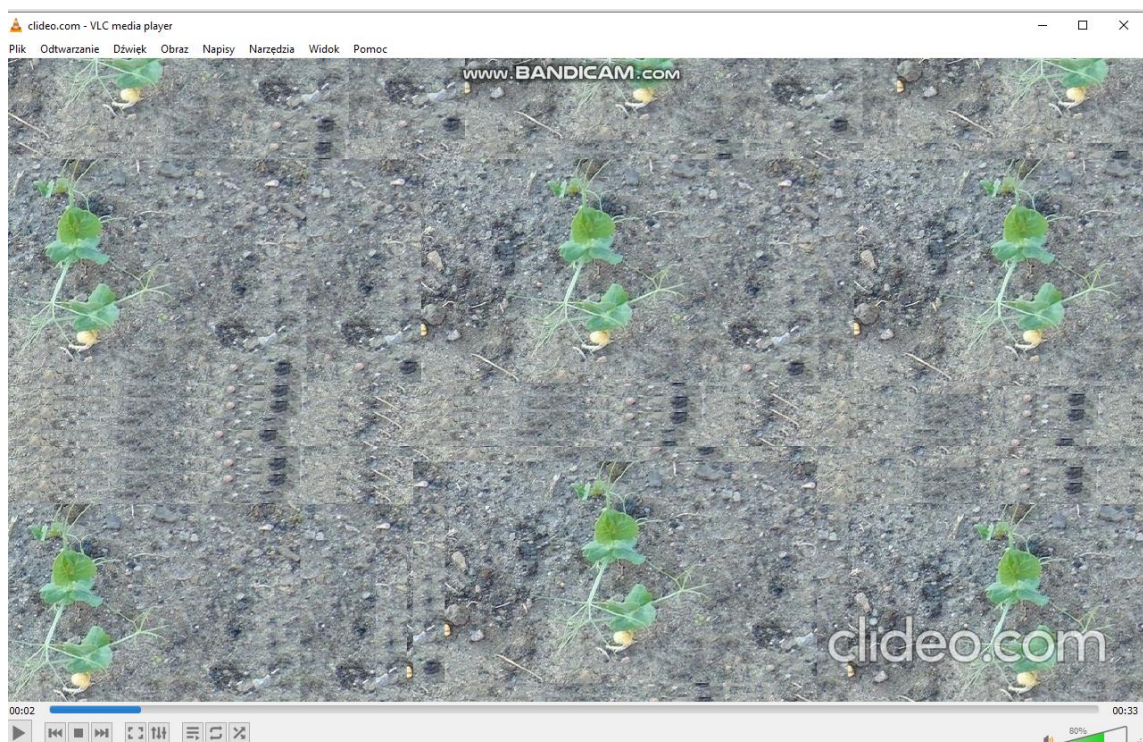
7.2. Wybór jednostki sterującej

Przy wyborze jednostki sterującej kluczowym parametrem jest prędkość detekcji obiektów. Przy prędkości 0,4 m/s pielnik pokonuje 400 mm w ciągu sekundy. Założono więc, że minimalną prędkością detekcji obiektów powinno być 40 klatek na sekundę, co daje detekcję obiektów co 10 mm, zaś w finalnym oprogramowaniu prędkość pojedynczej

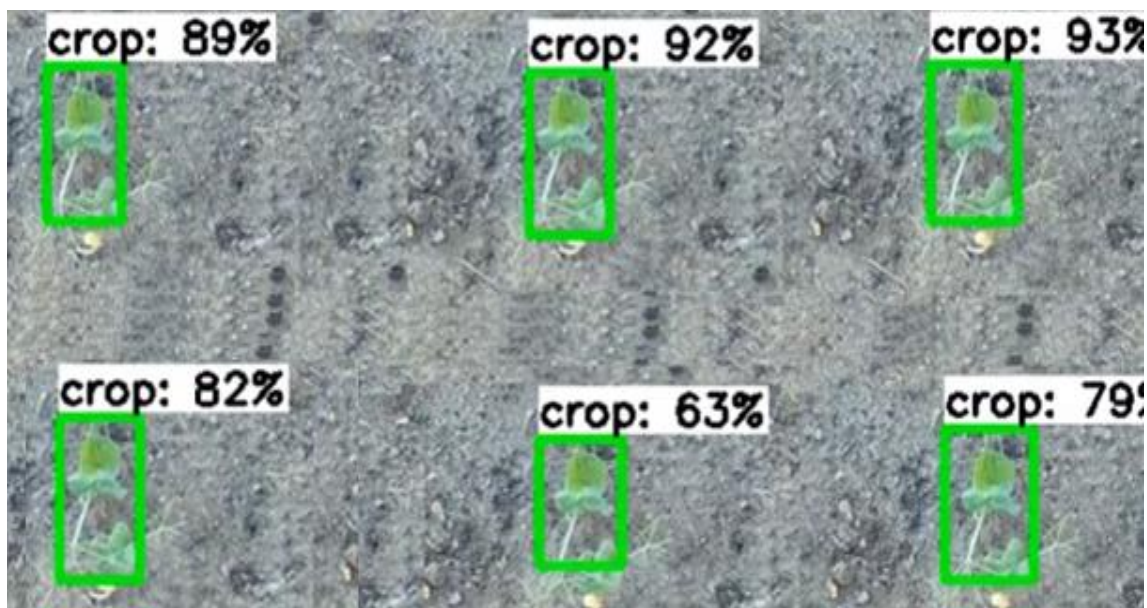
pętli sterowania powinna być wyższa niż 20 klatek na sekundę, co daje wykonywanie detekcji co 20 mm.

Do testów wydajnościowych, na podstawie zdjęć z repozytorium GitHub [86] przygotowano film video symulujący widok z kamery podczas poruszania się wzdłuż rzędu roślin (rys. 58) oraz skrypt do detekcji obiektów i rysowania obszarów z wykrytymi obiektami na klatkach (rys. 59). Skrypt do detekcji obiektów pobierał kolejne klatki filmu, dokonywał detekcji obiektów oraz mierzył liczbę klatek na sekundę.

Początkowo zakładano, że system sterowania będzie oparty na platformie Raspberry Pi 4B, znanej z niskiego zużycia energii, wszechstronności oraz niskiej ceny. W ramach prac przygotowawczych przeprowadzono testy wydajnościowe (benchmark) detekcji obiektów przy użyciu technologii TensorFlow Lite (TF-Lite, wersja zapewniająca wyższą wydajność). Testy te wykazały, że przy użyciu Raspberry Pi 4B osiągnęto średnio 8 klatek na sekundę (FPS – Frames Per Second). Przy założonej prędkości roboczej maszyny wynoszącej około 1,5 km/h taka wydajność była niewystarczająca do precyzyjnego sterowania sekcją roboczą pielnika.



Rysunek 58. Przykładowa klatka filmu video używanego do testów wydajnościowych.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 59. Detekcja obiektów przeprowadzana podczas testów wydajnościowych.
Źródło: Opracowanie własne.

Wobec powyższego podjęto decyzję o zmianie platformy obliczeniowej na dużo bardziej wydajną. Rozważano zastosowanie platform NVIDIA Jetson Nano oraz Jetson Xavier NX, będących dedykowanymi rozwiązaniami dla aplikacji wykorzystujących sztuczną inteligencję. Porównanie platform obliczeniowych Jetson Nano i Jetson Xavier NX przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wydajności Jetson Nano oraz Jetson Xavier NX.

Parametr	Platforma obliczeniowa	
	Jetson Nano	Jetson Xavier NX
Procesor (CPU)	4-rdzeniowy ARM Cortex-A57	6-rdzeniowy ARM Cortex-A78
Procesor graficzny (GPU)	128-rdzeniowy NVIDIA Maxwell	384-rdzeniowy NVIDIA Volta z Tensor Cores
Pamięć RAM	4 GB LPDDR4	8 GB LPDDR4x
Moc obliczeniowa (AI)	0.5 TFLOPS	21 TFLOPS
Zużycie energii	5-10 W	10-15 W
Obsługa TensorRT	Tak	Tak

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [88].

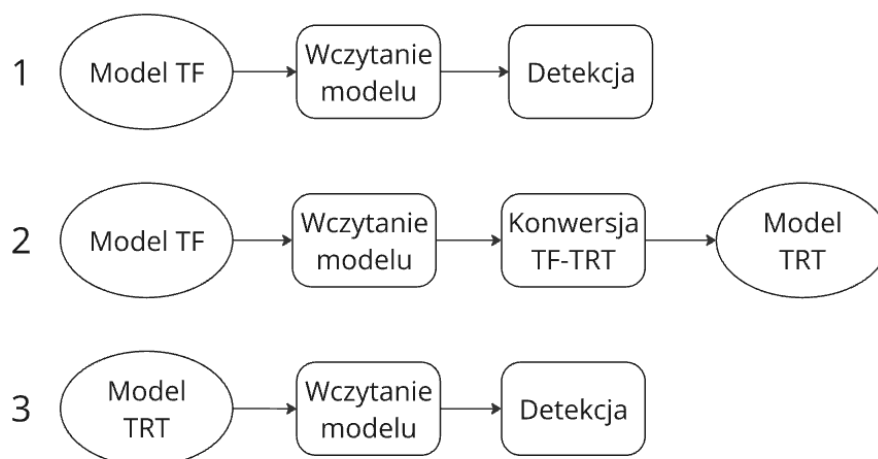
Analizując dane techniczne platform obliczeniowych można zauważyć, że Jetson Xavier NX znacznie przewyższa Jetson Nano pod względem mocy obliczeniowej, co czyni go bardziej odpowiednim wyborem dla aplikacji wymagających szybkiej analizy obrazu w czasie rzeczywistym (tab. 1). Wyższe zużycie energii oraz koszt są

kompensowane przez znacznie większą wydajność. Dodatkowo procesory NVIDIA posiadają dedykowaną obsługę technologii TensorRT, znacznie zwiększającą wydajność detekcji obiektów

7.3. Optymalizacja modelu TensorFlow do technologii TensorRT

Po wyborze platformy Jetson Xavier NX przystąpiono do optymalizacji procesu detekcji obiektów. Kluczowym krokiem było zastosowanie formatu ONNX (Open Neural Network Exchange) oraz technologii TensorRT, dostępnej na platformach NVIDIA [89]. Proces ten obejmował następujące etapy (rys. 60):

1. Konwersja modelu: Wytrenowany model TensorFlow został wyeksportowany do formatu ONNX, co umożliwiło jego kompatybilność z TensorRT.
2. Optymalizacja: TensorRT przeprowadził optymalizację modelu, redukując jego rozmiar i dostosowując obliczenia do możliwości procesora graficznego w jednostce Jetson Xavier NX. Proces ten obejmował m.in. uproszczenie warstw sieci i zastosowanie kwantyzacji do formatu FP16 [89].
3. Testy wydajnościowe: Po optymalizacji system osiągnął wydajność powyżej 120 FPS w pętli detekcji obiektów, co jest wartością wystarczającą do pracy przy założonej prędkości roboczej maszyny oraz daje duże pole to rozwijania funkcjonalności kosztem obniżenia liczby iteracji na sekundę. Wyniki testów wydajnościowych po optymalizacji TensorRT przedstawiono w tabeli 2.



Rysunek 60. Optymalizacja modelu Tensorflow do modelu TensorRT wspieranego przez platformę NVIDIA. 1 – Detekcja obiektów z wykorzystaniem TensorFlow, 2 – Konwersja modelu z technologii Tensorflow do technologii TensorRT, 3 – Detekcja obiektów z wykorzystaniem modelu w technologii TensorRT.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [89].

Tabela 2. Porównanie wydajności w detekcji obiektów w wybranych rozwiązaniach po przeprowadzeniu autorskiego benchmarku.

Technologia detekcji obiektów	Platforma obliczeniowa		
	Jetson Xavier NX	Raspberry Pi 4B	Laptop, i7-10710u GTX-1650
Tensorflow	8 FPS	3 FPS	9 FPS
TensorFlow LITE	-	8 FPS	16 FPS
TensorRT	122 FPS	-	-

Źródło: Opracowanie własne.

7.4. Podsumowanie

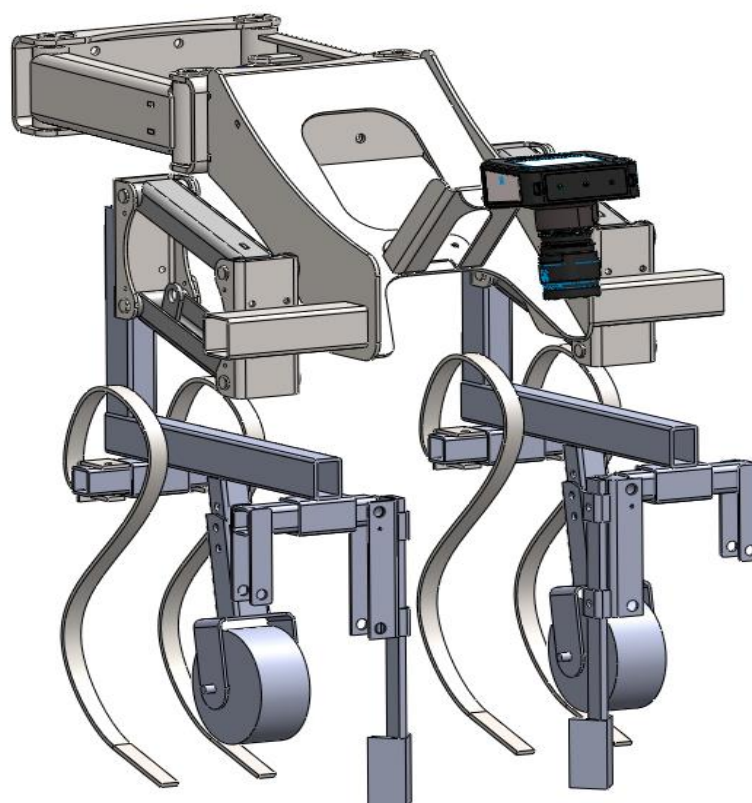
Wdrożenie systemu sterowania sekcją roboczą pielnika rzędowego z wykorzystaniem sieci neuronowych wymagało precyzyjnego doboru platformy obliczeniowej oraz optymalizacji algorytmów. Początkowe założenia opierające się na Raspberry Pi 4B okazały się niewystarczające, co doprowadziło do wyboru platformy NVIDIA Jetson Xavier NX. Zastosowanie formatu ONNX oraz technologii TensorRT pozwoliło na znaczne zwiększenie wydajności detekcji obiektów, umożliwiając efektywną pracę pielnika w czasie rzeczywistym.

8. Budowa stanowiska badawczego

Koncepcja mechanizmu sekcji pielnika do niszczenia chwastów w uprawach o krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin została zweryfikowana przez model matematyczny. Dało to podstawę do dalszych prac nad modelem rzeczywistym w stali.

8.1. Model geometryczny 3D

Trójwymiarowy model sekcji pielnika do niszczenia chwastów w uprawach o krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin został wykonany w programie SolidWorks. Jest to oprogramowanie umożliwiające przestrzenne projektowanie części i zespołów maszyn 3D oraz tworzenia dokumentacji 2D. Program posiada wiele możliwości ułatwiających projektowanie, takich jak analiza kolizji podzespołów, analizy kinematyczne czy analizy wytrzymałościowe metodą elementów skończonych [90]. Projektując sekcję roboczą pielnika według autorskiej koncepcji starano się utrzymać jak największą zwartość konstrukcji, by ograniczyć wpływ obciążeń gnących i skrętnych podczas kopiowania krzywoliniowości rzędów (rys. 61).



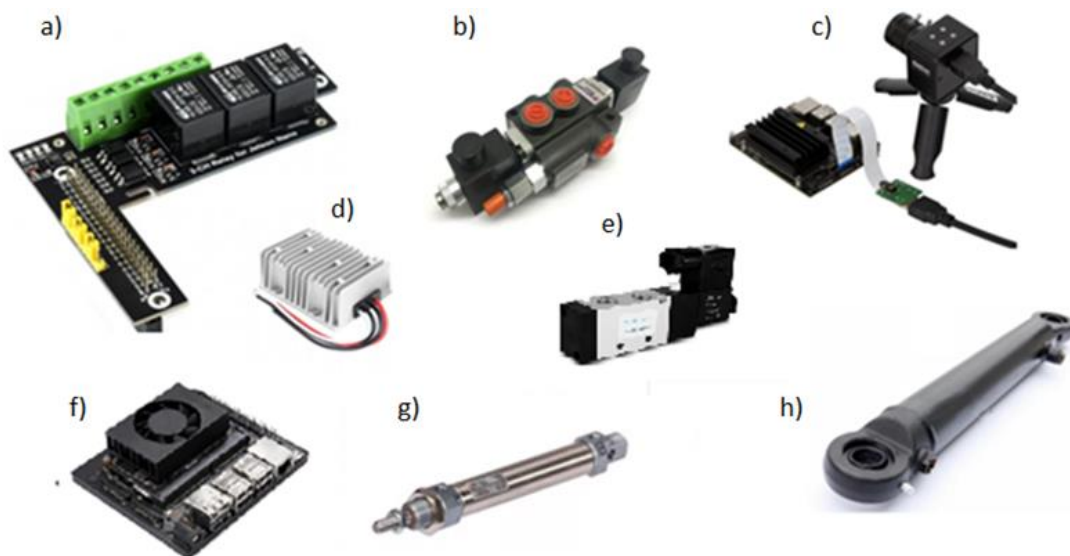
Rysunek 61. Model geometryczny sekcji roboczej pielnika.
Źródło: Opracowanie własne.

W konstrukcji sekcji dążono do zapewnienia wszystkich niezbędnych regulacji w celu umożliwienia pełnego odwzorowania modelu matematycznego. Model w stali posiada dokładnie takie same właściwości kinematyczne i geometryczne, jak model matematyczny wynikający z koncepcji rozwiązania. Płynnej regulacji podlegają następujące elementy:

- położenie poprzeczne całej sekcji roboczej na ramie maszyny,
- położenie poprzeczne lewego i prawego segmentu roboczego,
- wysokość mocowania lewego i prawego segmentu roboczego na tylnych elementach pionowych czworoboków przegubowych,
- wysokość koła kopiującego,
- położenie poprzeczne zestawów zębów dłutowych,
- położenie bezwzględne kamery, regulowane poprzecznie oraz możliwość dowolnego ustawienia kąta obiektywu.

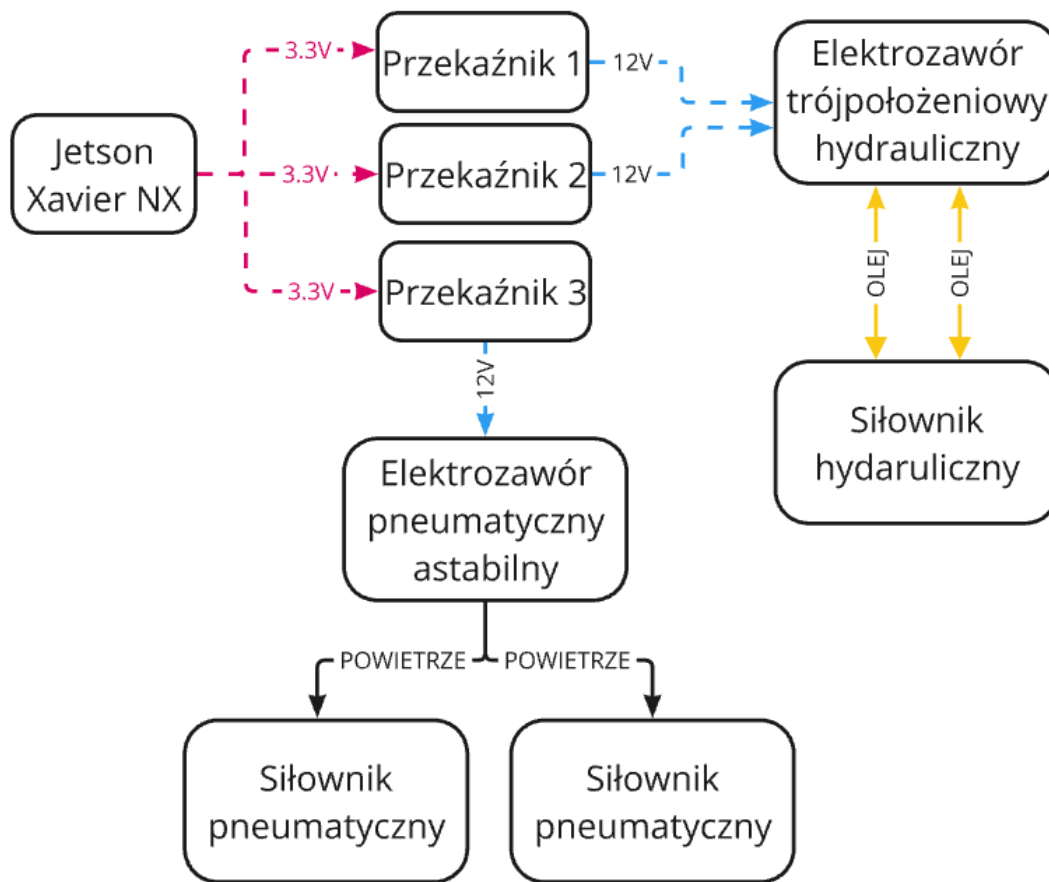
8.2. Koncepcja automatyki i sterowania sekcją pielącą

Projekt automatyki i sterowania wykonano zgodnie z założeniami postawionymi przed modelem matematycznym. Do zasilania automatyki, zarówno w zakresie prądu, jaki i mediów odpowiedzialnych za ruch elementów roboczych założono wykorzystanie zasobów dostępnym w ciągniku rolniczym, a więc powietrze z układu pneumatycznego ciągnika, olej hydrauliczny z instalacji hydraulicznej ciągnika oraz zasilanie 12V z instalacji elektrycznej ciągnika. Z elementów dostępnych na rynku dobrano elementy automatyki spełniające wymagania postawione w modelu matematycznym (rys. 62).



Rysunek 62. Dobór elementów automatyki: a – moduł przekaźników 3-CH Relay for Jetson Nano, b – rozdzielacz hydrauliczny jednosekcyjny, trójpołożeniowy, c – zestaw z kamerą IMX477 ArduCam B0250, d – przetwornica napięcia 12V do 19V 95W, e – elektrozawór pneumatyczny 4V210-E 5/2 G1/4", f – NVIDIA Jetson Xavier NX Development Kit, g – siłownik pneumatyczny dwustronnego działania ISO 6432, h – siłownik hydrauliczny dwustronnego działania 40/22/100.
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [91-93].

Na rysunku 63 przedstawiono schemat ideowy układu sterowania odpowiadającego za ruchy robocze sekcji pielącej. Sekcja ma przyłącza hydrauliczne oraz pneumatyczne. Za ruch siłowników pneumatycznych i hydraulicznego odpowiadają elektrozawory: hydrauliczny dwudrożny, czyli umożliwiający 3 stany – wysuw, wsuw i zawór zamknięty dla braku sygnałów sterujących oraz elektrozawór pneumatyczny dwustanowy – w przypadku podania sygnału siłowniki pneumatyczne w położeniu wsuniętym (noże dłutowe rozwarte), dla braku sygnału siłowniki wysunięte, zaś noże dłutowe zwarte. Napięcie na elektrozawory dostarczane jest przez odpowiednie optoizolowane przekaźniki, które podłączone są do wyjść cyfrowych jednostki sterującej. Moduł z całością elektroniki jest zasilany prądem z instalacji ciągnika charakteryzującej się napięciem 10-15V oraz nagłymi zmianami napięcia, mogącymi powodować zakłócenia w działaniu elektroniki.



Rysunek 63. Schemat ideowy układu sterowania.
Źródło: Opracowanie własne.

8.3. Budowa sekcji pielącej

Na podstawie zaprojektowanego modelu geometrycznego 3D przygotowano dokumentację techniczną i wykonano elementy składowe w stali, które można było połączyć w podzespoły, a później w zespoły tworzące prototyp. Prace przeprowadzono według następującego harmonogramu:

- etap 1 – wykonanie części odpowiedzialnej za ruch poprzeczny oraz trójpunktowego układu zawieszenia,
- etap 2 – wykonanie całkowite części mechanicznej oraz instalacji hydraulicznej,
- etap 3 – montaż instalacji pneumatycznej, elektrycznej, sterowania oraz automatyki, konfiguracja i uruchomienie. Prace etapu 3 zostały przedstawione na rysunku 64.



Rysunek 64. Prace przy etapie 3 budowy sekcji roboczej. 1 – szafa sterownicza, 2 – zbiornik powietrza instalacji pneumatycznej, 3 – elektrozawór hydrauliczny, 4 – kamera, 5 – elektrozawór pneumatyczny.

Źródło: Opracowanie własne.

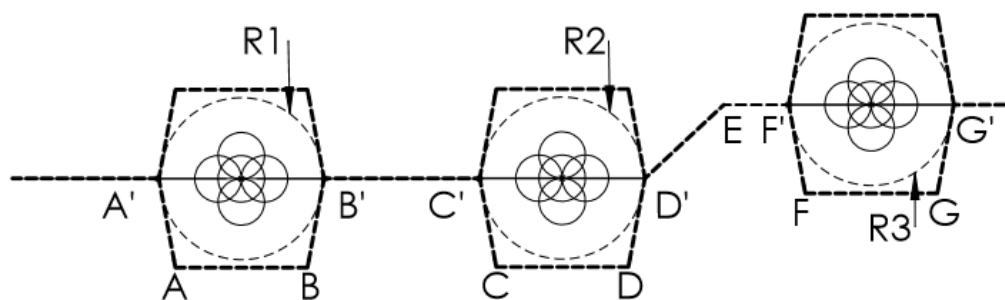
9. Wyznaczanie trajektorii ruchu noży dłutowych

W wyniku analiz przebiegów trajektorii ruchu noży opracowano założenia, które powinna spełniać trajektoria ruchu noży dłutowych. Założenia uszeregowano od najistotniejszego do najmniej istotnego:

1. Brak możliwości wejścia w strefę bezpieczeństwa rośliny, niezależnie od kombinacji ruchu posuwistego maszyny, noży dłutowych oraz ruchu poprzecznego sekcji pielącej.
2. Odporność na potencjalną nieliniowość działania siłownika hydraulicznego oraz siłowników pneumatycznych.
3. Możliwie największa ilość powierzchni uprawionej pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie.
4. Możliwie wczesne ustawienie się sekcji w osi zbliżającej się rośliny – maksymalizacja czasu na przesterowanie położenia poprzecznego – uniwersalne założenie niezależne od prędkości roboczej maszyny.

9.1. Koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin”

Opracowana koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin” do wyznaczania trajektorii ruchu noży dłutowych polega na maksymalizacji obszaru roboczego, w którym noże pracują pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie



Rysunek 65. Koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin”. A', C', F' – początek otwierania noży; A, C, F – początek ruchu noży dłutowych w kierunku od osi roślin; B, D, F – początek ruchu noży dłutowych w kierunku do osi roślin; B', D', F' – koniec zamykania noży; E – koniec przesuwu poprzecznego R1, R2, R3 – strefa bezpieczeństwa roślin.
Źródło: Opracowanie własne.

Ruch poprzeczny sekcji pielącej w takim rozwiązaniu polega na centralnym ustawieniu osi sekcji roboczej względem osi najbliższej rośliny. W czasie, gdy noże dłutowe są na szerokości strefy bezpieczeństwa rośliny nie powinien być wykonywany

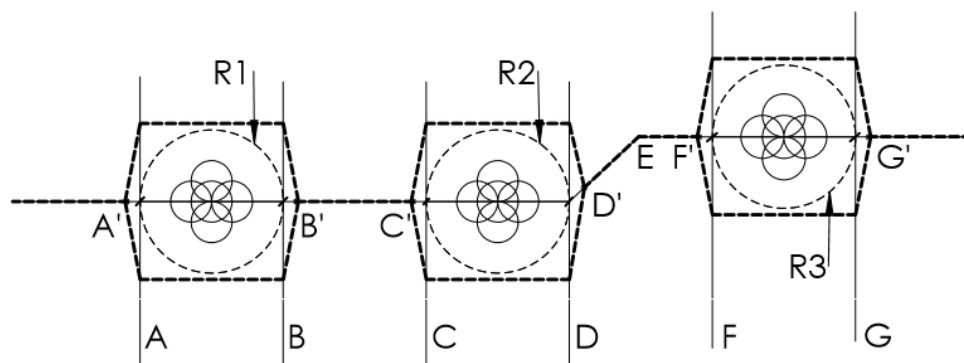
ruch poprzeczny. Na szerokości końca strefy bezpieczeństwa R (punkty B',D',G' na rysunku 65) rośliny następuje wywołanie ruchu poprzecznego mającego na celu ustawienie centralne względem rośliny kolejnej, tak jak pokazuje to krzywa D'EF'.

W koncepcji „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin” ruch noża dłutowego w połączeniu z ruchem wzdłużnym ciągnika utworzyć ma linię styczną do strefy bezpieczeństwa rośliny R. Dla przykładu, rozpatrując pierwszą roślinę na rysunku 65, uwzględniając prędkość roboczą ciągnika oraz czas potrzebny na umieszczenie noży dłutowych w pozycji rozwartej należy wyznaczyć taki punkt rozpoczęcia wywoływania ruchu noży A', w którym linia A'A będzie styczna do okręgu strefy bezpieczeństwa R1. W analogiczny sposób należy wyznaczyć punkt rozpoczęcia ruchu noży dłutowych w kierunku osi roślin B, w którym utworzona linia BB' stanie również będzie styczna do strefy bezpieczeństwa R1.

Taki układ powoduje maksymalizację uprawionej powierzchni gleby pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie, lecz jest trudny do osiągnięcia w warunkach rzeczywistych, ponieważ istnieje duże ryzyko naruszenia granicy strefy bezpieczeństwa R w przypadku braku idealnej powtarzalności ruchu elementów roboczych, a także błędów ustawienia osiowego sekcji względem najbliższej rośliny.

9.2. Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”

Opracowana koncepcja 2, nazwana koncepcją „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” została przedstawiona na rysunku 66. Koncepcja zakłada większe odległości noży od strefy bezpieczeństwa redukując ryzyko naruszenia strefy bezpieczeństwa rośliny.



Rysunek 66. Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”. A', C', F' – początek otwierania noży; A, C, F – koniec otwierania noży; B, D, F- początek ruchu noży dłutowych w kierunku od osi roślin; B', D', F'- początek ruchu noży dłutowych w kierunku do osi roślin; E- koniec przesuwu poprzecznego R1, R2, R3 – strefy bezpieczeństwa roślin.

Źródło: Opracowanie własne.

Ruch poprzeczny sekcji w takim rozwiązaniu polega na centralnym ustawieniu osi sekcji roboczej względem osi najbliższej rośliny, podobnie jak w koncepcji 1.

W czasie, gdy noże dłutowe są na szerokości strefy bezpieczeństwa nie powinien być wykonywany ruch poprzeczny. W momencie opuszczenia strefy bezpieczeństwa R (punkty B,D,G na rysunku 66) rośliny następuje wywołanie ruchu poprzecznego mającego na celu ustawienie centralne względem rośliny kolejnej, tak, jak pokazuje to krzywa DD'EF'.

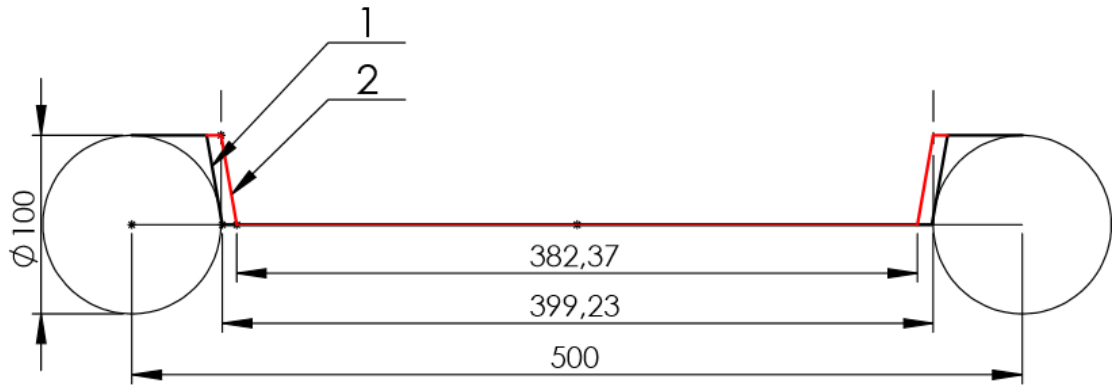
W koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”, w zakresie zmiany pozycji noży dłutowych zastosowano podejście mające na celu eliminację ryzyka naruszenia strefy bezpieczeństwa rośliny R. Rozpatrując pierwszą roślinę na rysunku 66, należy wyznaczyć taki punkt rozpoczęcia ruchu noży dłutowych A', by po umieszczeniu noży rozwartej, prosta łącząca końcówki noży pielących była styczna do strefy bezpieczeństwa R1, a więc noże dłutowe na szerokości strefy bezpieczeństwa R1 powinny być w pozycji rozwartej. Analogiczna sytuacja występuje na szerokości końca strefy bezpieczeństwa R1. W punkcie B, określającym początek ruchu noży pielących w kierunku osi roślin, połączenie końcówek noży pielących znów utworzyłoby styczną do okręgu określającego granicę strefy bezpieczeństwa R1, a więc rozpoczęcie ruchu umieszczającego noże w pozycję zwartą nastąpiłoby na szerokości końca strefy bezpieczeństwa R1.

Układ taki powoduje, że podczas przemieszczania się sekcji przez całą długość strefy bezpieczeństwa R noże pielące pozostają w stanie rozwartym, a wymuszenie ruchu zarówno poprzecznego, jak i ruchu wahadłowego noży dłutowych odbywa się poza tym obszarem. Eliminuje to całkowicie ryzyko przekroczenia strefy bezpieczeństwa przez noże dłutowe podczas zmiany położenia poprzecznego sekcji roboczej i równoczesnego wywołaniu ruchu noży dłutowych w przypadku nieosiowego ustawienia sekcji względem rośliny. Dodatkowo koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” znacząco upraszcza wyznaczanie wyprzedzenia ruchu noży pielących w przypadku zmiany parametrów roboczych, takich jak prędkość robocza maszyny, prędkość linowa siłowników wywołujących ruch poprzeczny oraz eliminuje problem nieliniowości charakterystyki elementów roboczych.

9.3. Porównanie i wybór koncepcji

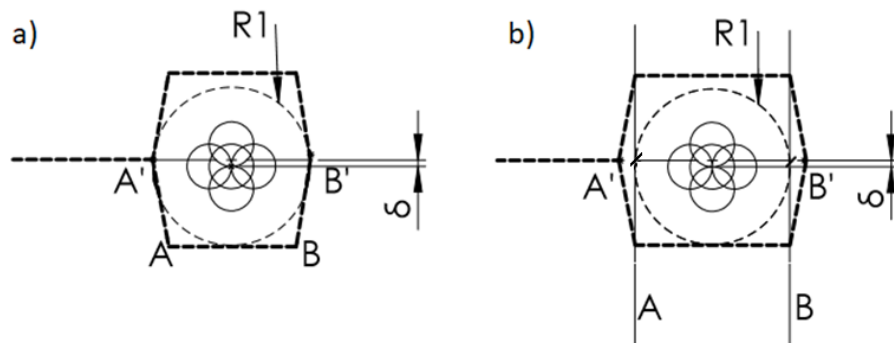
Koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin” maksymalizuje czas pozostawienia noży dłutowych w pozycji złożonej, przy założeniu prędkości siłowników

pneumatycznych na poziomie 500 mm/s, prędkości liniowej ciągnika na poziomie 0,5 m/s, strefy bezpieczeństwa rośliny 100 mm i odległości roślin 500 mm, długość drogi w pełnym złożeniu noży pielących wzrasta o 4,1 %, co przedstawiono na rysunku 67.



Rysunek 67. Porównanie drogi złożonych noży w koncepcjach przy prędkości roboczej 0,5 m/s, 1 – koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin”, 2 – koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”.
Źródło: Opracowanie własne.

Z drugiej strony koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin” wymaga idealnej trajektorii ruchu osi noży pielących, zaś każdy błąd osiowości powoduje naruszenie strefy bezpieczeństwa. Na rysunku 68 porównano koncepcje przy wystąpieniu błędu osiowości.



Rysunek 68. Trajektoria ruchu przy błędzie ustawienia osiowego δ : a – Koncepcja „Stycznych do strefy bezpieczeństwa roślin”, b – Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”.
Źródło: Opracowanie własne.

Podczas wystąpienia każdego błędu ustawienia osiowego δ , strefy bezpieczeństwa rośliny zostaje naruszona podczas ruchu poprzecznego noży dłutowych. Z drugiej strony koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” eliminuje to ryzyko w pełni, lecz

wiąże się to z mniejszym obszarem roboczym pomiędzy roślinami w rzędzie, z którego zostały wycięte chwasty. Koncepcja 2 dodatkowo również eliminuje ryzyko nieliniowości działania siłowników pneumatycznych, a więc zmiany ich prędkości podczas cyklu roboczego. Do wyznaczenia punktów charakterystycznych, potrzebny jest całkowity czas zmiany położenia siłowników pneumatycznych i niezależnie, czy ich charakterystyka jest liniowa czy nie, strefa bezpieczeństwa rośliny nie zostanie naruszona.

W cel wyboru wariantu koncepcji posłużono się metodą ważenia kryteriów koncepcji [94]. Określono kryteria (tab. 3) i przypisano im wagi stosując bezpośrednie porównanie danych kryteriów pod kątem istotności (tab. 4). Koncepcję 1 oznaczono jako W1, Koncepcję 2 oznaczono jako W2. Korzystając z wag kryteriów dokonano zestawienia wariantów pod kątem spełniania danego kryterium w lepszym stopniu. W przypadku spełniania kryterium w stopniu równym, oba warianty otrzymały po połowie wartości wagi kryterium (tab. 5).

Tabela 3. Kryteria oceny koncepcji.

Kryterium	Nazwa
K1	Ryzyko teoretycznego wejścia w strefę bezpieczeństwa rośliny
K2	Wrażliwość na błędy ustawienia osiowego
K3	Wrażliwość na nieliniowość siłowników hydraulicznych
K4	Wrażliwość na nieliniowość siłowników pneumatycznych
K5	Objęta powierzchnia pomiędzy roślinami w rzędzie

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 4. Ocena koncepcji trajektorii ruchu noży dłutowych.

Kryterium	Kryterium					Punkty	Waga
	K1	K2	K3	K4	K5		
K1	x	1	1	1	1	4	0,4
K2	0	x	1	1	1	3	0,3
K3	0	0	x	0	0	0	0
K4	0	0	1	x	0	1	0,1
K5	0	0	1	1	x	2	0,2
Suma						10	1

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 5. Porównanie wariantów koncepcji pod kątem spełniania kryteriów.

Wariant koncepcji	Kryterium					Suma
	K1	K2	K3	K4	K5	
W1	0,2	0	0	0	0,2	0,4
W2	0,2	0,3	0	0,1	0	0,6
Suma						1

Źródło: Opracowanie własne

Sumując wagi kryteriów koncepcja 2 okazała się koncepcją lepszą, ponieważ eliminuje ryzyko uszkodzenia strefy bezpieczeństwa rośliny przez błędy ustawienia osiowego oraz nieliniowość siłowników.

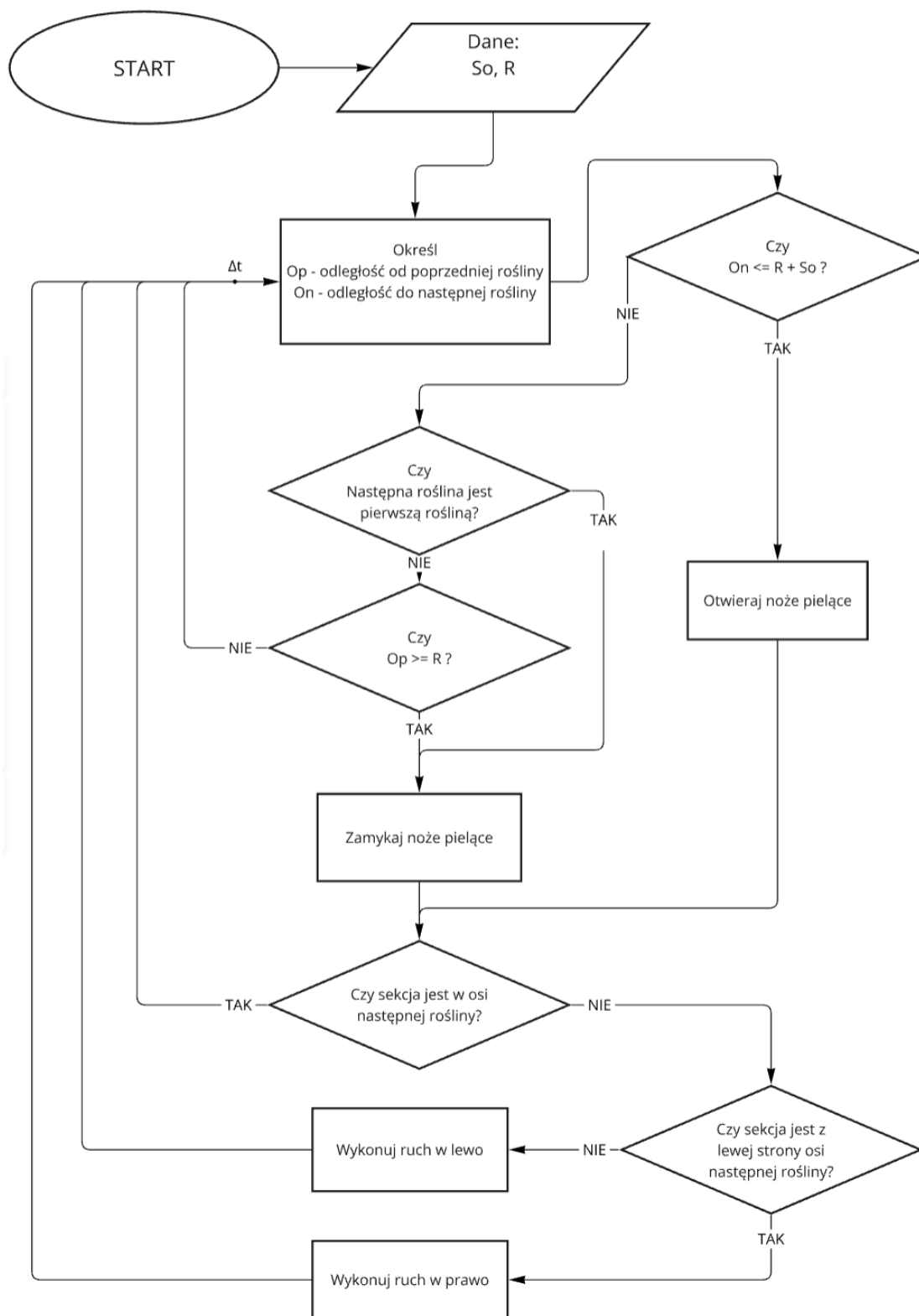
9.4. Opracowanie metody wyznaczania ścieżki noży zgodnej z koncepcją „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”

Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” została wybrana jako modelowa trajektoria ruchu noży dłutowych, dla której został zaprojektowany układ sterujący sekcji pielącej pracującej w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.

Na podstawie wprowadzonej prędkości roboczej oraz znając średnią prędkość liniową siłowników pneumatycznych W_1Y_1 oraz W_2Y_2 wyprowadzono wzór określający wartość wyprzedzenia ruchu s_0 (186). Wzór ten określa odległość wyprzedzenia, z jakim należy rozpocząć ruch noży pielących na zewnątrz rzędu roślin. Jest on iloczynem prędkości roboczej oraz czasu potrzebnego na zmianę pozycji siłownika pneumatycznego.

$$s_0 = v_t * \frac{W_1Y_1(b_{max}) - W_1Y_1(b_{min})}{v_b} \quad (186)$$

Opracowano również szczegółowy schemat blokowy (rys. 69) określający w sposób iteracyjny tworzenie ścieżki w koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”.



Rysunek 69. Schemat blokowy wyznaczania trajektorii ruchu noży sekcji pielącej w koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”.
Źródło: Opracowanie własne.

9.5. Program do wyznaczania trajektorii ruchu noży zgodnej z koncepcją „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”

Do wyznaczania trajektorii ruchu w koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” napisano program w języku C#, wykorzystując framework WinForms, w środowisku programistycznym Visual Studio 2022 [95].

Program przedstawia symulację trajektorii ruchu elementów roboczych pielnika podczas ruchu wzdłuż rzędu roślin dla zadanych przez użytkownika parametrów mechanizmu,adanego położenia startowego sekcji pielącej oraz adanego rozkładu roślin.

Napisany program przeprowadza symulację ruchu z określonymi parametrami i zapisuje wyniki trajektorii ruchu w formie listy punktów umożliwiających odtworzenie trajektorii ruchu noży.

Parametry początkowe wprowadzane przed użytkownika:

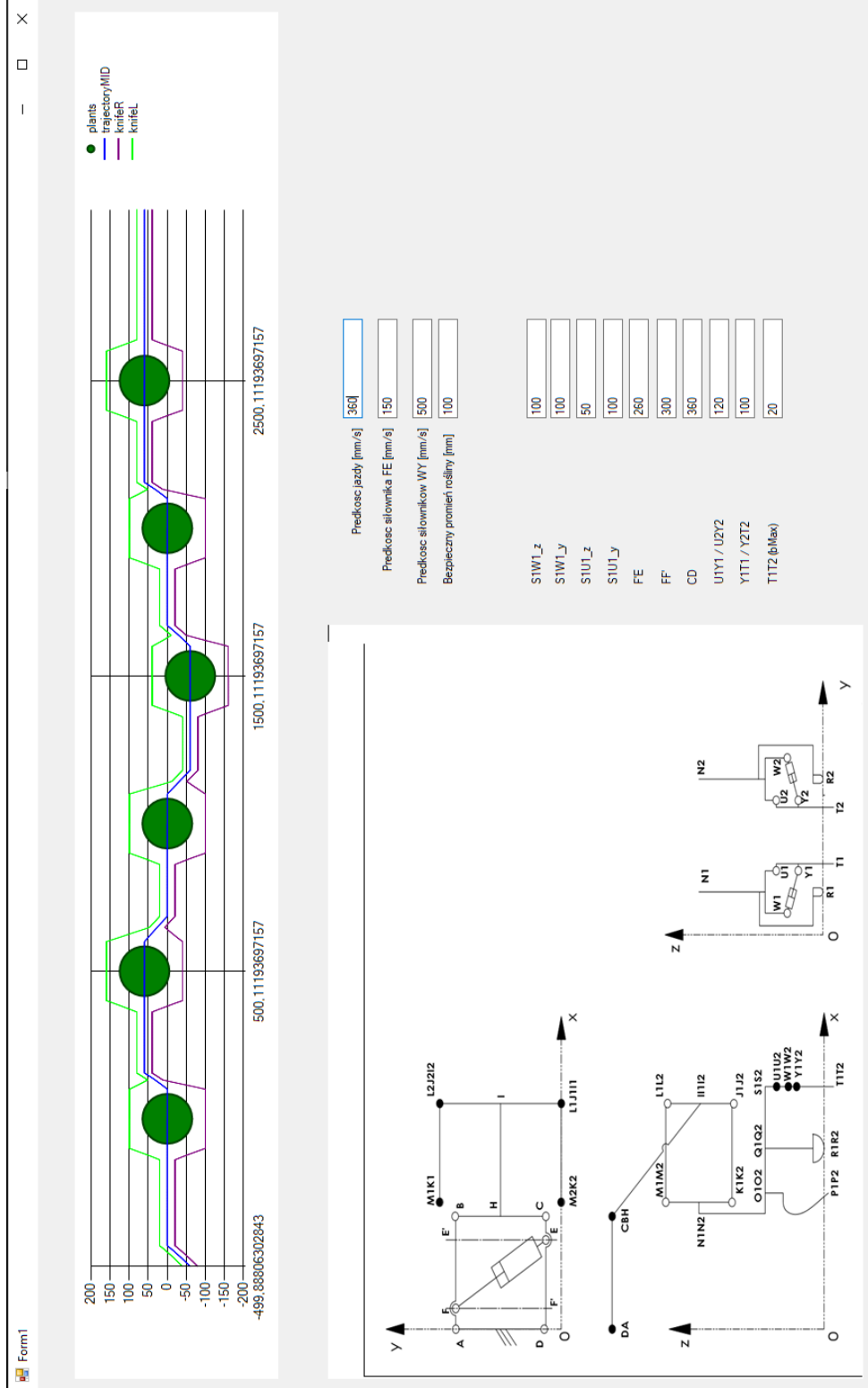
- prędkość liniowa, z jaką poruszała się będzie sekcja pieląca,
- prędkości siłowników pneumatycznych i hydraulicznego,
- promień bezpieczny rośliny,
- właściwości geometryczne – długości poszczególnych odcinków mechanizmu, zgodnie z modelem matematycznym,
- lista punktów (X, Y) reprezentujących pozycje roślin, zapisana w programie.

Symulacja jest przeprowadzana iteracyjnie. Wykorzystując model matematyczny w każdej iteracji program oblicza punkty charakterystyczne. Dla każdej jednostki czasu wykonywane są następujące operacje:

- znalezienie najbliższej rośliny przed i za bieżącą pozycją elementu,
- określenie stanu ruchu poziomego w lewo, w prawo lub bez zmiany,
- określenie stanu ruchu noży dłutowych,
- aktualizacja pozycji mechanizmu,

Program wykonuje obliczenia punktów dla symulacji z rozdzielczością 1 ms, przez cały czas trwania symulacji i zapisuje trajektorię elementów roboczych (rys. 70). Dane trajektorii są zapisane do wykresów, aby przedstawić:

- pozycje roślin,
- trajektorię środka mechanizmu, czyli środka odcinka łączącego punkty końcowe noży dłutowych,
- trajektorie ruchu noży dłutowych.



Rysunek 70. Program obliczający trajektorię noży sekcji pielącej dla zadanych parametrów mechanizmu, zadanego położenia startowego sekcji pielącej oraz zadanego rozkładu roślin.
 Źródło: Opracowanie własne.

10. Oprogramowanie sterujące sekcją pielącą

Program sterujący sekcją pielącą do usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin wymagał implementacji następujących funkcjonalności podstawowych:

- przetwarzanie strumienia wideo z kamery w czasie rzeczywistym,
- wykrywanie obiektów, wykorzystując wcześniej przygotowany model sieci neuronowej,
- śledzenie obiektów, a więc identyfikowanie obiektów i przyporządkowywanie zmian ich pozycji w kolejnych klatkach,
- ekstrapolacja położenia obiektów niewykrytych w przypadku niewykrycia ich w pojedynczej klatce,
- sterowanie przekaźnikami do siłowników pneumatycznych oraz hydraulicznego,
- wykonywanie komend ruchu zewnętrznego i wewnętrznego noży dłutowych oraz przesuwu poprzecznego sekcji, w oparciu o założone przesunięcia czasowe,
- mechanizm logowania danych diagnostycznych programu takich jak wykryte obiekty lub wykonywane komendy.

10.1. Algorytm oprogramowania sterującego sekcją pielącą

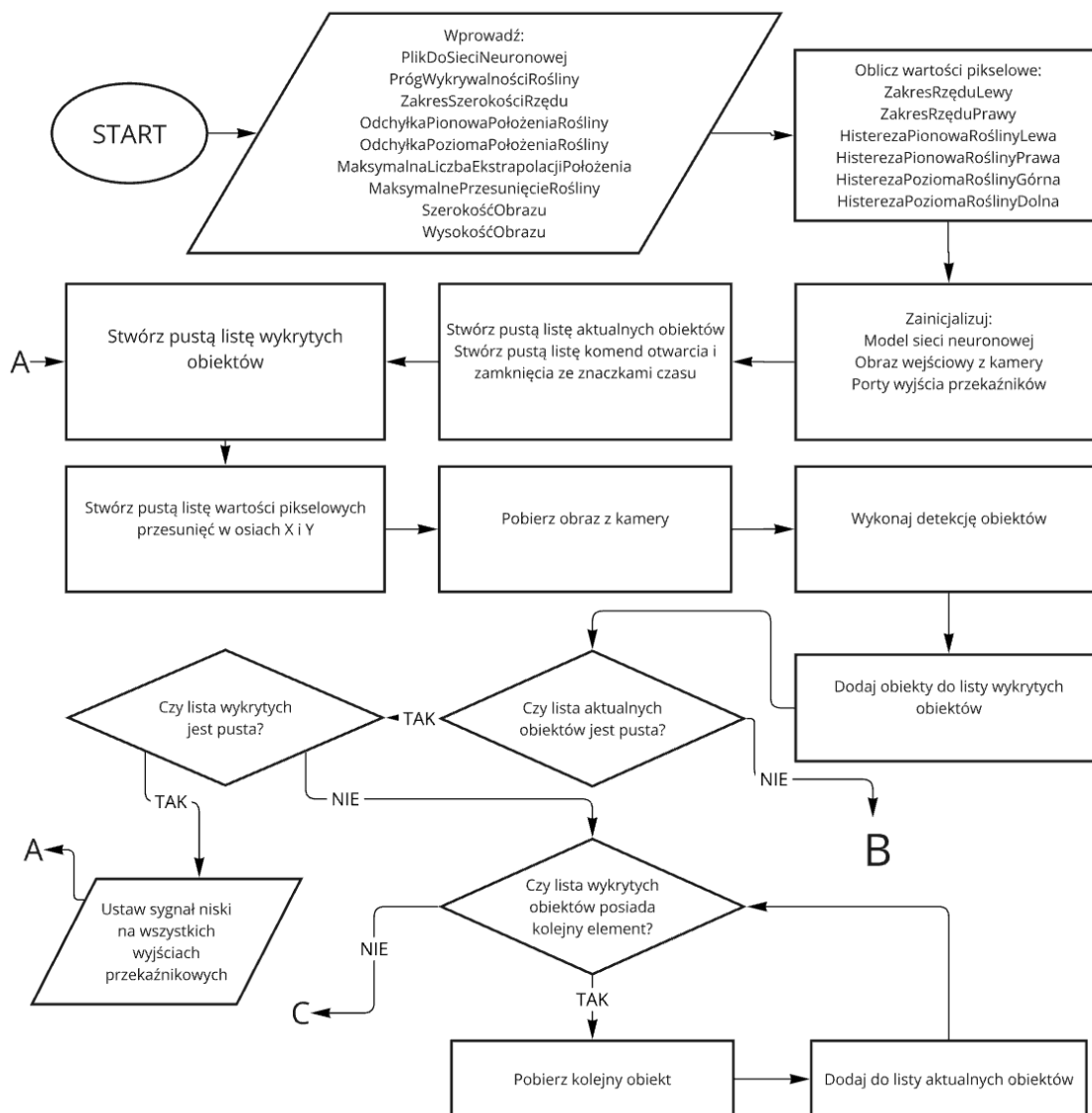
Schemat blokowy opisuje podstawowe funkcjonalności programu sterującego w zakresie sterowania sekcją pielącą (rys. 71, 72, 73). Funkcje konfiguracji w czasie rzeczywistym, jak i kolekcjonowanie danych diagnostycznych zostały pominięte, gdyż nie wpływają na samą istotę sterowania sekcją roboczą.

Blok A, pokazany na rysunku 71 zawiera jednorazową inicjalizację wszystkich istotnych parametrów początkowych oraz przeprowadzanie detekcji obiektów na każdej klatce obrazu.

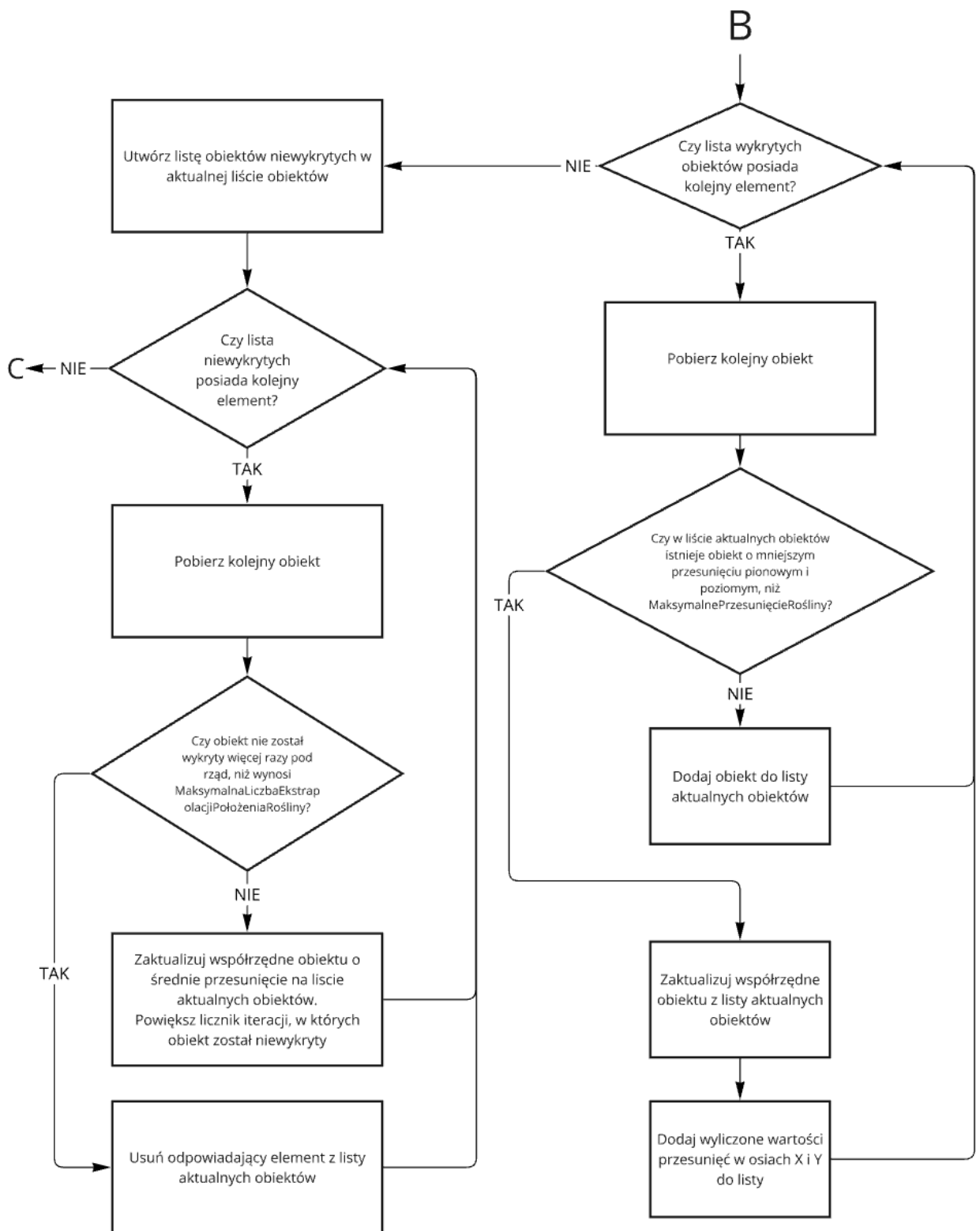
Blok B, pokazany na rysunku 72, zawiera logikę która łączy obiekty wykryte w poprzednich klatkach z obiektami w aktualnej klatce, tworząc mechanizm śledzenia obiektów. Ponadto, znając średnie przesunięcia śledzonych obiektów, w przypadku niewykrycia konkretnego obiektu w mechanizmie śledzenia ekstrapoluje jego pozycję tak, by zdarzenia niewykrycia konkretnych obiektów w pojedynczych klatkach nie wpływały negatywnie na sterowanie sekcją.

Blok C, pokazany na rysunku 73, zawiera operacje sterowania przesuwem poprzecznym na uprzednio przygotowanej liście aktualnych obiektów w bloku B.

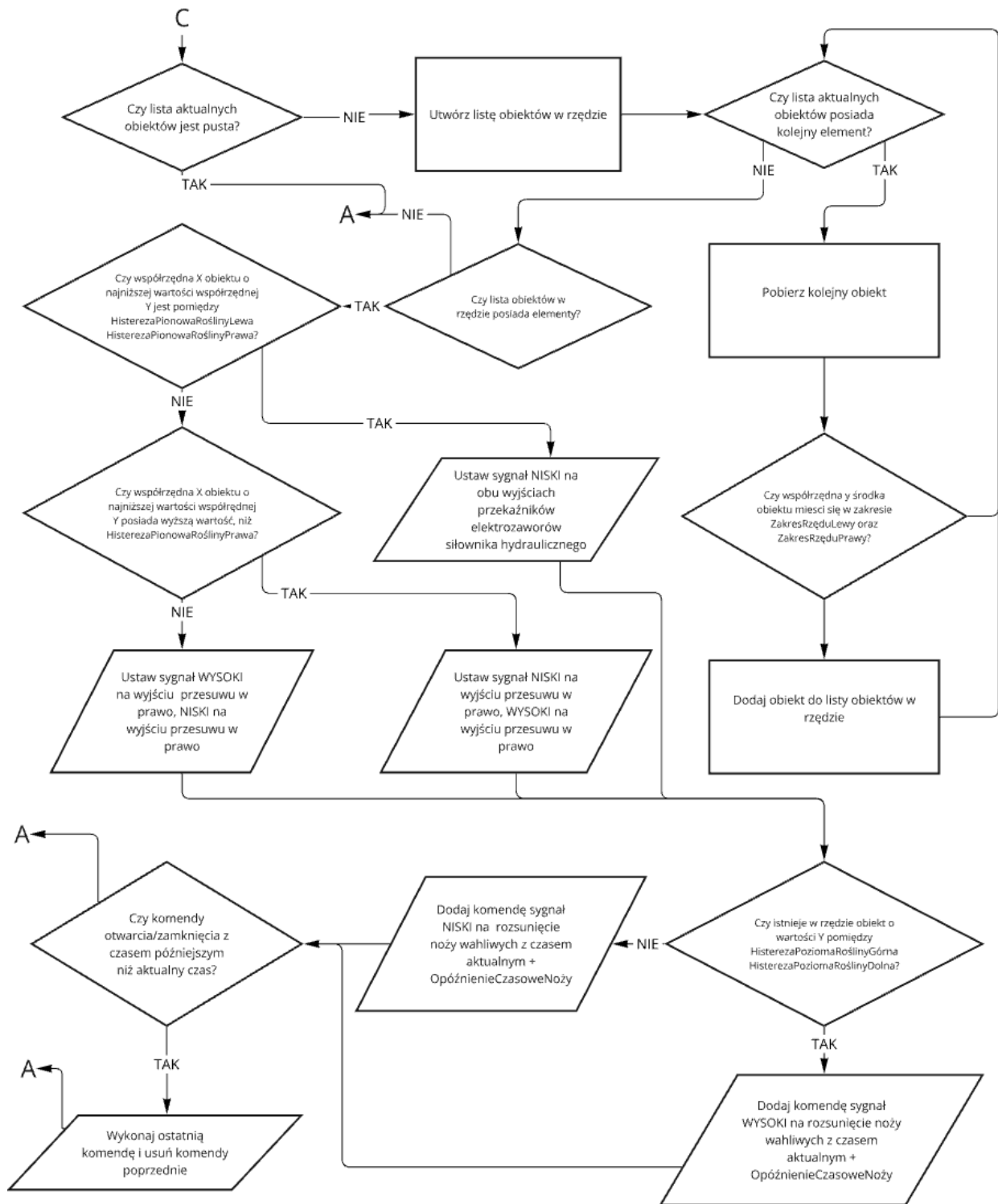
Obiekty z listy aktualnej obiektów zawężane są do obiektów potencjalnie znajdujących się w rzędzie roślin. Następnie ustalane jest położenie sekcji pielącej względem osi najbliższej rośliny i korekcja poprzeczna sekcji pielącej tak, by znajdowała się w pozycji centralnej do rośliny. Równocześnie, sprawdzane jest wzdłużne położenie rośliny. Jeżeli roślina znajdzie się w określonym obszarze, następuje wysłanie komendy rozsunięcia noży dłutowych, a gdy roślina opuści ten obszar, wysyłana jest komenda zsunięcia się noży dłutowych.



Rysunek 71. Część I schematu blokowego algorytmu sterowania.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 72. Część II schematu blokowego algorytmu sterowania.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 73. Część III schematu blokowego algorytmu sterowania.

Źródło: Opracowanie własne.

Na rysunku 74 przedstawiono podgląd widoku z kamery programu sterującego oraz zaznaczone charakterystyczne elementy umożliwiające sterowanie zarówno ruchem poprzecznym, jak i ruchem noży dławowych.

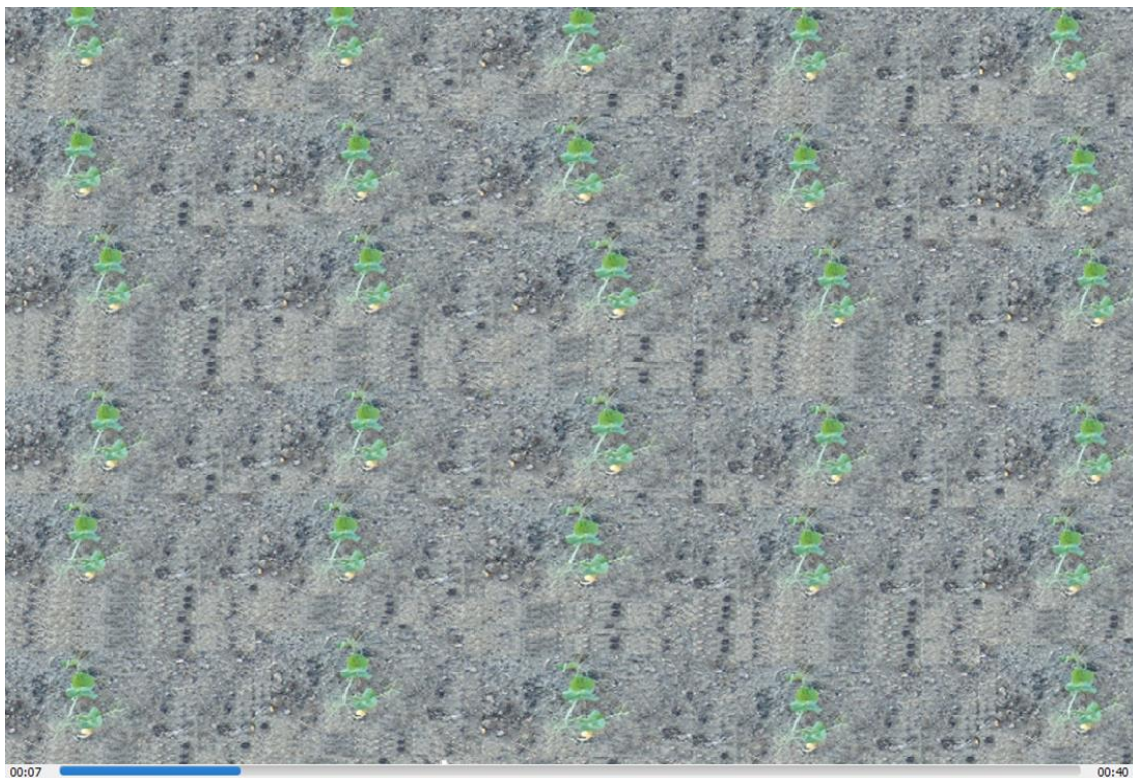


Rysunek 74. Widok z perspektywy kamery programu sterującego. 1 – linie zakresu sterowania poprzecznego, 2– linie histerezy ustawienia centralnego roślin, 3 – linie bramki wywoływania ruchu noży dłutowych, 4 – dane informacyjne, 5 – roślina z unikalnym identyfikatorem. Źródło: Opracowanie własne.

Linie zakresu sterowania poprzecznego (1 na rysunku 74) służą do odseparowania zakresu właściwego dla uprawianego rzędu. Tylko rośliny pomiędzy nimi uważane są za rośliny należące do uprawianego rzędu. Linie histerezy 2 ustawienia centralnego roślin to zakres poprzeczny, w którym określone jest centralne położenie sekcji względem rośliny 5. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie ruchów poprzecznych pielnika przez niewielkie odchylenia lokalizacji detekcji roślin i ograniczenie zjawiska przesterowania przy niewielkich wahaniach położenia poprzecznego roślin. Linie bramki wywoływania ruchu noży dłutowych, oznaczone numerem 3 służą do dodawania komend ruchu noży dłutowych. Po przejściu przez linię poziomą górną następuje dodanie komendy rozsunięcia noży dłutowych. Po przejściu przez linię poziomą dolną, następuje dodanie komendy zsunięcia noży dłutowych. Komendy, wypisane w obszarze oznaczonym numerem 4, wykonywane są po czasie opóźnienia, wynikającym z kombinacji prędkości liniowej, opóźnień elementów sterujących i wykonawczych oraz perspektywy widoku kamery, która rejestruje obraz przed nożami dłutowymi. Dodatkowo, sterowanie ustawieniem poprzecznym, w celu centralnego ustawienia się do kolejnej rośliny wykonywane jest dopiero po wykonaniu komendy ruchu wewnętrznego noży dłutowych po minięciu poprzedniej rośliny, której już nie ma na widoku z kamery.

10.2. Weryfikacja działania programu sterującego

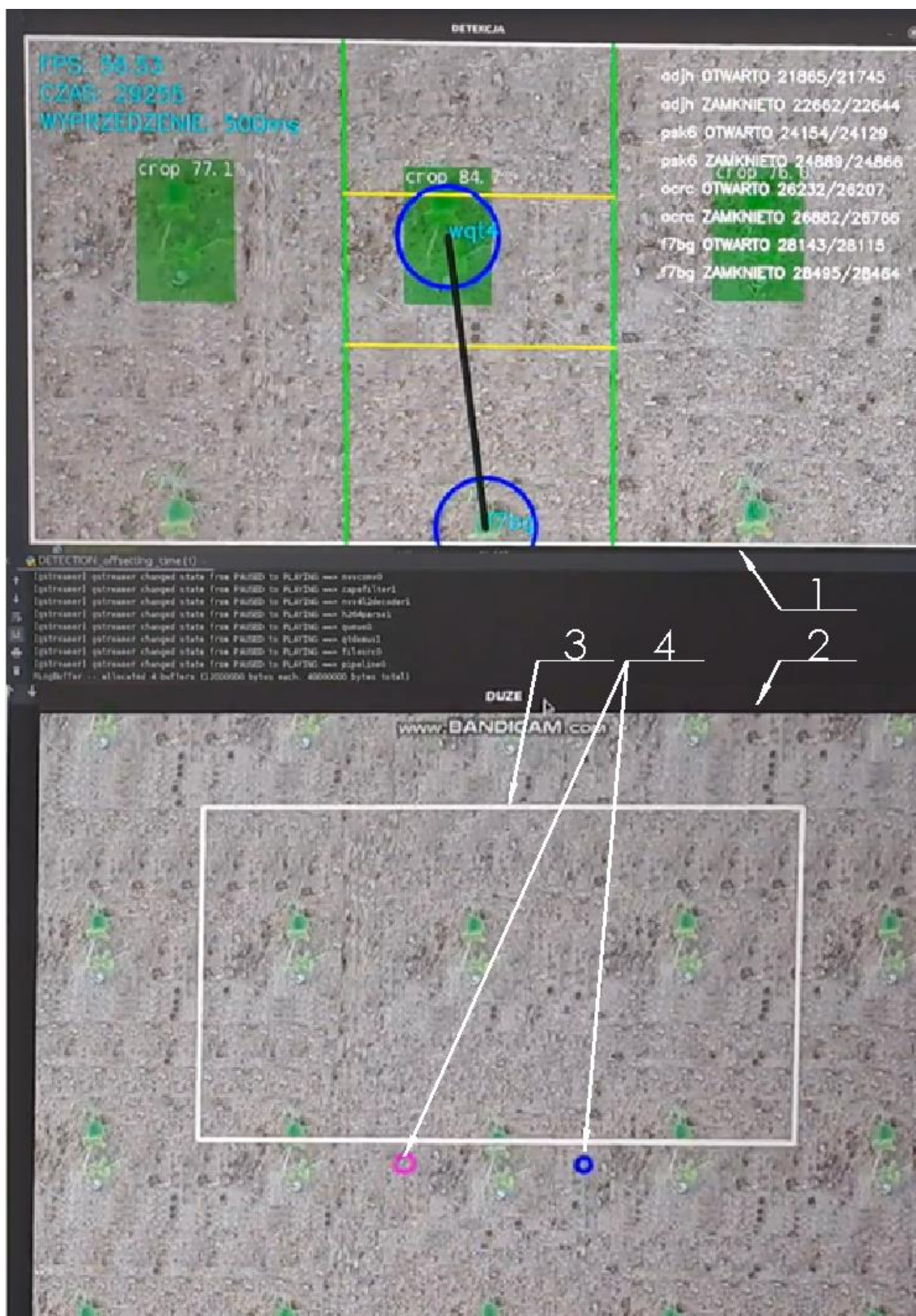
W celu weryfikacji poprawności działania programu sterującego sekcją utworzono pełną symulację pracy w warunkach rzeczywistych. W tym celu posłużono się repozytorium zdjęć rzepy dostępnej na serwisie GitHub [86] i przygotowano na jej podstawie film symulujący przemieszczenie się wzdłuż rzędów roślin. W tym celu utworzono obraz o rozdzielczości 1500×12000 pikseli, który naśladuje skan powierzchni pola z rzędami roślin. Utworzono metodą kopiowania w pionie zestawu 5 rzędów roślin. Następnie przesuając ten obraz utworzono film symulujący jazdę wzdłuż pola (rys. 75).



Rysunek 75. Film symulujący przemieszczania się wzdłuż rzędów roślin.

Źródło: Opracowanie własne.

Dodatkowo przygotowano oprogramowanie, które korzystając z filmu przedstawionego na rysunku 75 zaznaczało teoretyczny obszar widzenia kamery, który przekazywany był do oprogramowania sterującego (rys. 76). Dodatkowo na obrazie z filmu zaznaczone było położenie noży dłutowych, które znajdują się poza obszarem kamery. Komendy wykonywane przez program sterujący powodowały przesuw poprzeczny obszaru przekazywanego do oprogramowania sterującego oraz ruch noży dłutowych. Prędkości ruchów poprzecznych oraz rozsuwania i zsuwania noży dłutowych wynikały bezpośrednio z modelu matematycznego.



Rysunek 76. Symulacja działania oprogramowania. 1- widok z programu sterującego, 2 – widok symulacji przejazdu wzdłuż rzędów roślin, 3 – obszar widziany przez program sterujący, 4 – położenie wirtualnych końców noży dłutowych.
 Źródło: Opracowanie własne.

11. Metodyka badań w kanale glebowym

Kanał glebowy to zaawansowane stanowisko badawcze, wykorzystywane do testowania narzędzi rolniczych i mechanizmów jezdnych w ściśle kontrolowanych warunkach. Jego konstrukcja stalowa o wymiarach 10 m × 2 m × 1 m [96] umożliwia przeprowadzanie badań pełnowymiarowych zespołów roboczych, takich jak korpusy płuzne, zęby spulchniające lub dowolne sekcje robocze maszyn rolniczych.

Wnętrze kanału wypełniane jest glebą o określonych właściwościach fizycznych, takich jak wilgotność i zagęszczenie, co pozwala na powtarzalne i precyzyjne pomiary. Nad powierzchnią gleby porusza się wózek narzędziowy, którego prędkość można regulować w zakresie od 0,1 do 7,2 km/h, umożliwiając dokładną analizę pracy testowanych elementów [96].

Stanowisko badawcze wyposażono w nowoczesne systemy pomiarowe takie, jak czujniki zwięzłości i gęstości gleby, urządzenia do rejestracji profilu powierzchni. Przygotowanie podłoża do badań realizowane jest za pomocą dedykowanego zestawu narzędzi, w tym spulchniacza, wału zagęszczającego i zgarniaka. Dzięki eliminacji wpływu warunków atmosferycznych oraz pełnej kontroli nad parametrami gleby, kanał glebowy stanowi idealne środowisko do badań nad interakcją elementów roboczych maszyn rolniczych z podłożem, zapewniając wysoką precyzję i powtarzalność wyników.

Stan fizyczny gleby został określony na podstawie analizy składu granulometrycznego oraz pomiaru wilgotności i zwięzłości. Wilgotność gleby oznaczono metodą suszarkowo-wagową zgodnie z normą PN-ISO 11465:1999 [97], odnosząc wynik do masy gleby w stanie wilgotnym. Codzienny monitoring wilgotności polegał na pobraniu 30-gramowej próbki gleby, która następnie była suszona na wagosuszarce WPE 300 S przez 25 minut. Precyzja ważenia próbek wynosiła 0,01 g.

Właściwości fizyczne gleby:

- typ gleby: piasek gliniasty,
- frakcja ilowa (<0,002 mm): 2%,
- frakcja pyłowa (0,002–0,05 mm): 36%,
- frakcja piaskowa (>0,05 mm): 62%,
- gęstość gleby w stanie suchym: 1535 ±11 kg/m³,
- wilgotność gleby: 9,4 ±0,3%,
- kąt tarcia wewnętrznego: 37°,
- kąt tarcia gleba-stal: 24°,

- kohezja: 17 kPa,
- adhezja: 10 kPa.

11.1. Przygotowanie torów roślin i chwastów

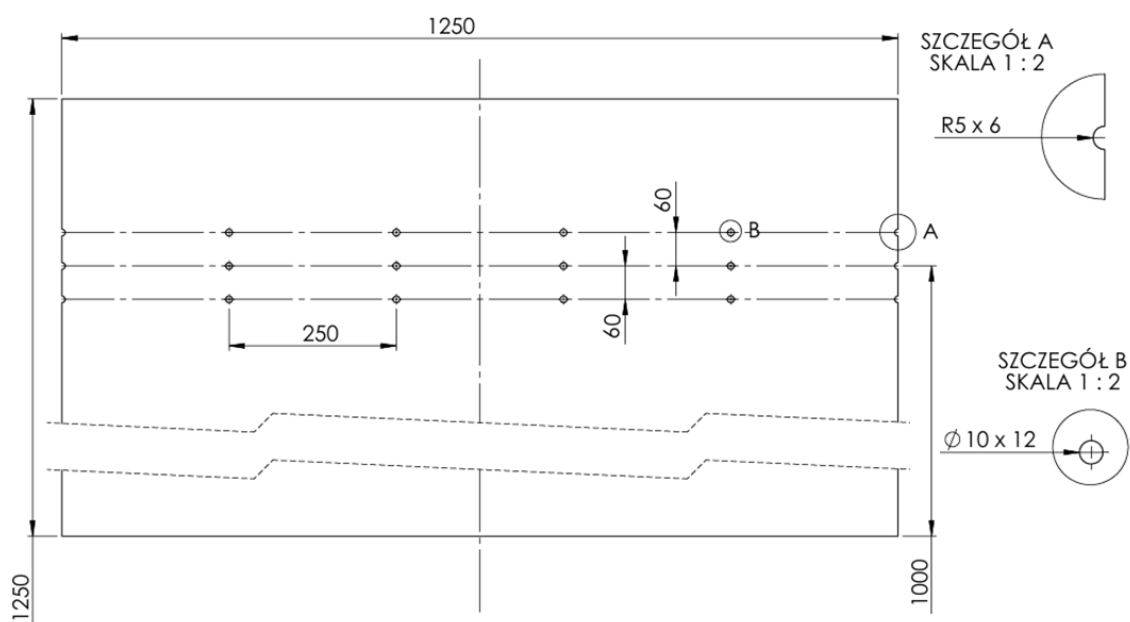
Badania prowadzone na kanale glebowym cechują się dużą powtarzalnością. Dzięki temu możliwe było powtarzanie przejazdów dla jednakowych prędkości oraz trajektorii ruchu. Dodatkowo jego prostokątna powierzchnia pozwala na lokalizowanie współrzędnych roślin w prosty sposób. Do badań na kanale glebowym opracowane zostały 4 warianty rozmieszczenia roślin w rzędach. Każdy wariant badano przy obecności chwastów oraz bez chwastów. Wszystkie badania wykonane były przy trzech prędkościach roboczych: 0,8 km/h, 1,0 km/h oraz 1,2 km/h. Aby zachować powtarzalność, w przejazdach 1, 2 i 3 z chwastami umieszczano je 250 mm przed rośliną, w osi rośliny. Natomiast w wariantcie 4, ze względu na niewielką odległość między roślinami, wynoszącą 250 mm w osi wzdłuż kanału glebowego, chwasty znajdowały się na środku odcinka łączącego te rośliny. W tym celu zaprojektowano matrycę (tab. 6) umożliwiającą adresowanie roślin i chwastów w danym wariantcie.

Tabela 6. Matryca ustawień roślin z zaznaczonymi pozycjami chwastów. Oznaczenia: R – roślina; C1, C2, C3 – chwasty w trzech rodzajach.

Warianty	Punkty charakterystyczne do umieszczania roślin uprawianych lub chwastów											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	H	I
Wariant 1	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
-60												
0	R	C1	R	C2	R	C3	R	C1	R	C2	R	C3
60												
Wariant 2	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
-60		C1	R							C2	R	C3
0	R			C2	R			C1	R			
60						C3	R					
Wariant 3	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
-60				C2	R			C1	R			
0	R									C2	R	C3
60		C1	R			C3	R					
Wariant 4	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
-60				C2	R					R	C3	
0	R				C3	R			C2		R	
60		C1	R					C1	R			

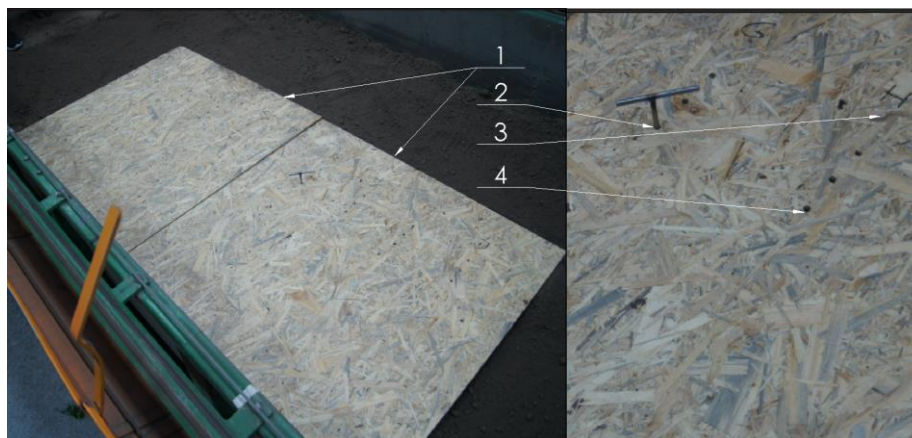
Źródło: Opracowanie własne.

W celu odwzorowania wariantów przedstawionych na rysunku 77 zbudowano matrycę z dwóch jednakowych płyt OSB o wymiarach 1250x1250, która posiadała otwory umożliwiające odwzorowanie położenia roślin i chwastów

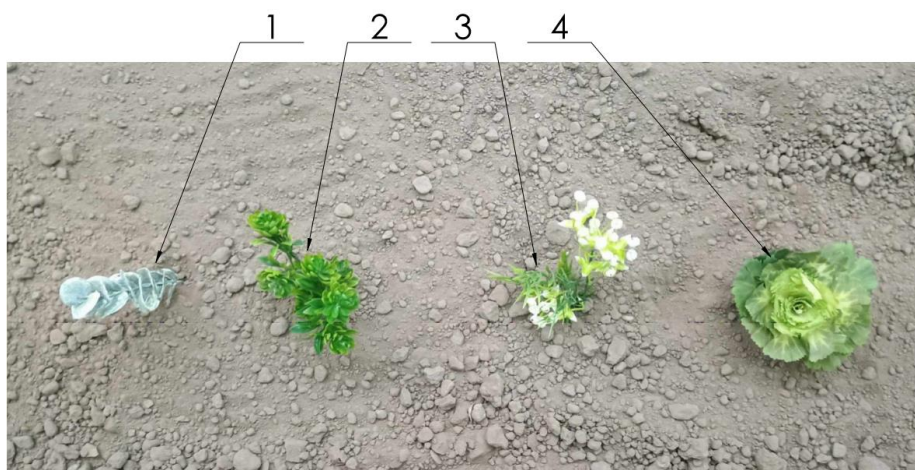


Rysunek 77. Matryca ustawień roślin z zaznaczonymi pozycjami chwastów w przypadku rzędów roślin zakłóconych chwastami.
Źródło: Opracowanie własne.

Przedstawione na rysunku 78 płyty z wyciętymi otworami układane były wzdłuż lewej krawędzi kanału glebowego tak, by krawędź boczna płyty stykała się ze ścianą boczną kanału glebowego. Krawędź poprzeczna płyty była ustawiana na wcześniej przygotowanym znaku na ścianie bocznej kanału glebowego tak, by za każdym ułożeniem płyty były w tej samej pozycji. Następnie, w otworach, w których miałyby być umieszczone rośliny przekładany był metalowy pręt o średnicy 8 mm, tworząc znaki na glebie w kanale glebowym. Po zdjęciu płyt rośliny i chwasty były umieszczone w odpowiednio zaznaczonych śladach na glebie. Do przygotowywania torów roślin i chwastów używano roślin kapusty i chwastów w trzech rodzajach: C1, C2 i C3 (rys. 79). Przykład rozmieszczenia roślin i chwastów dla wariantu nr 3 przedstawiony został na rysunku 80.



Rysunek 78. Oznaczenie miejsc na rośliny i chwasty na kanale glebowym. 1 – matryce z płyty OSB z otworami w charakterystycznych punktach, 2 – przyrząd do oznaczania miejsca na rośliny i chwasty, 3 – oznaczenia literowe kolumn otworów, 4 – otwory.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 79. Elementy do tworzenia torów roślin i chwastów w kanale glebowym. 1 – chwast rodzaju C1, 2 - chwast rodzaju C3, 3 – chwast rodzaju C2, 4 – roślina kapusty.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 80. Rozkład roślin i chwastów dla wariantu 3. 1 – Chwasty rodzaju C1, 2 – Chwasty rodzaju C2, 3 – Chwasty rodzaju C3.
Źródło: Opracowanie własne.

Dla każdej kombinacji prędkości roboczej, zachwaszczenia oraz trajektorii przejazd wykonywany był 3-krotnie. Opracowano konwencję identyfikowania przejazdów w następujący sposób:

$$W\{1\}V\{2\}C\{3\}P\{4\}$$

Oznaczenia:

- $\{1\}$ oznacza wariant trajektorii rzędu roślin, przyjmuje wartości 1,2,3,4
- $\{2\}$ oznacza prędkość roboczą, przyjmuje wartości 08 dla 0,8km/h, 10 dla 1km/h oraz 12 dla 1,2km/h
- $\{3\}$ oznacza obecność chwastów, 0 oznacza brak chwastów, 1 oznacza obecność chwastów
- $\{4\}$ oznacza próbę, przyjmuje wartości 1,2,3

11.2. System rejestracji sygnałów

Celem systemu rejestracji sygnału było zebranie danych na temat ruchów elementów roboczych w czasie rzeczywistym. System oparty był na systemie myRIO-1900. MyRIO to kompaktowy, wbudowany system reprogramowalny opracowany przez National Instruments, przeznaczony głównie do zastosowań edukacyjnych oraz prototypowania w zakresie systemów sterowania i akwizycji danych. Wyposażony jest w procesor ARM oraz programowalną strukturę FPGA, co pozwala na szybkie przetwarzanie sygnałów i sterowanie w czasie rzeczywistym [98].

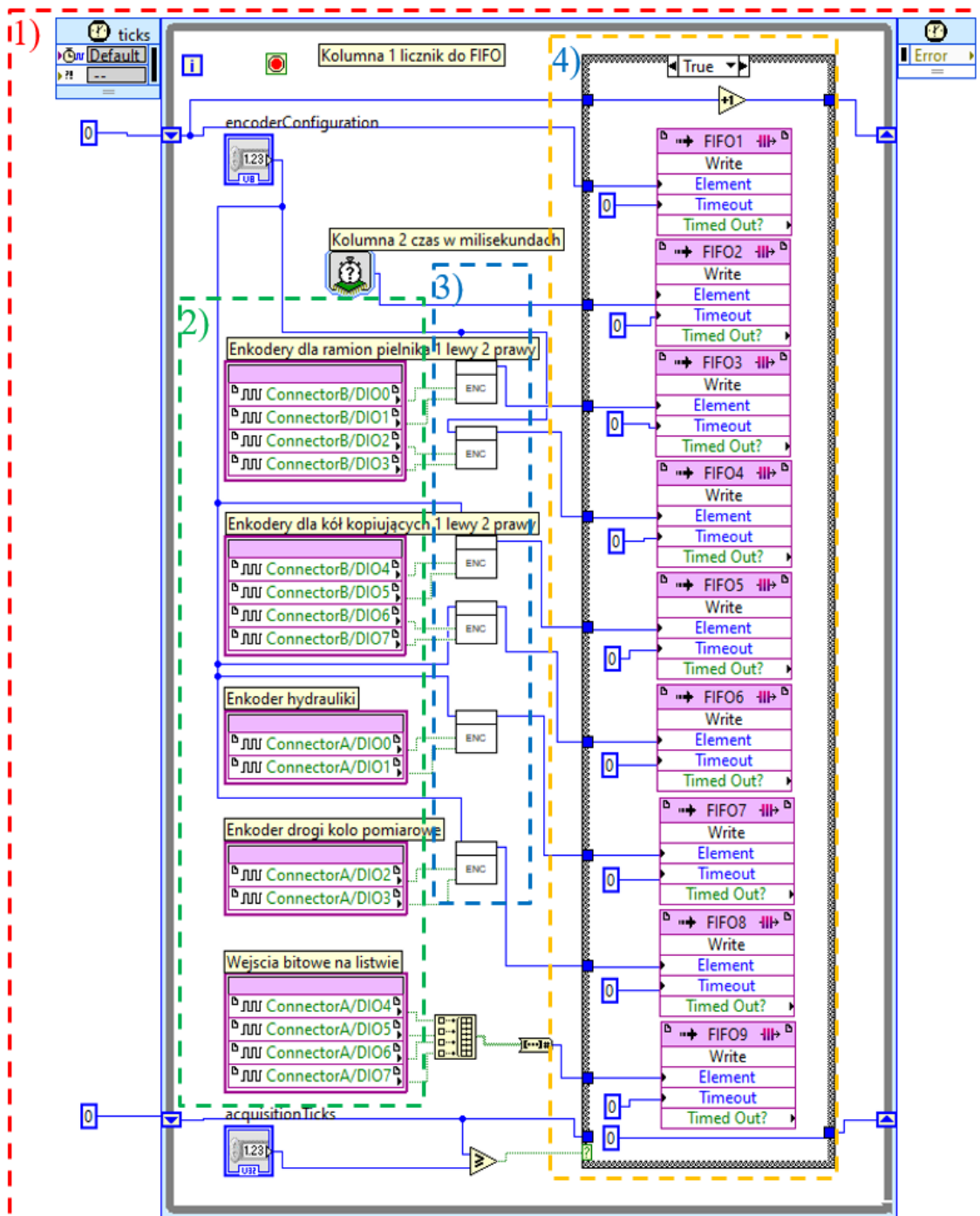
System rejestracji ruchów elementów oraz sygnałów przedstawiony został na rysunku 81. Enkoder oznaczony numerem 1 mierzył kąt $FF'E$ zgodnie ze schematem (rys. 27), czyli kąt obrotu czworoboku przesuwu poprzecznego sekcji pielącej. Enkodery oznaczone numerem 3,4 mierzyły zmianę kątów $L_1M_1K_2$ oraz $L_2M_2K_2$ zgodnie ze schematem (rys. 27), co odwzorowywało nierówności terenu po obu stronach. Enkoder oznaczony numerem 5 posiadał zamocowane kółko poruszające się po bieżni prowadnicy wózka kanału glebowego. Umożliwiał pomiar przemieszczenia wzdłużnego sekcji roboczej. Enkodery oznaczone numerem 6 mierzyły zmianę kątów $W_1U_1Y_1$ oraz $W_2U_2Y_2$ zgodnie ze schematem (rys. 27).



Rysunek 81. Elementy systemu rejestracji sygnałów: 1 – enkoder mierzący kąt obrotu czworoboku przesuwu poprzecznego sekcji pielącej, 2 – moduł akwizycji danych MyRIO, 3, 4 – enkodery mierzące kąty obrotu czworoboków przegubowych pionowych do kopiowania nierówności terenu, 5 – enkoder mierzący kąt obrotu rolki poruszającej się po bieżni prowadnicy kanału glebowego, 6 - enkodery mierzące kąty obrotu noży dłutowych.
 Źródło: Opracowanie własne.

Struktura FPGA modułu MyRIO zaprogramowana została w programie LabView z dodatkiem FPGA, zaś za akwizycję danych pomiarowych odpowiadał moduł LabView Real-Time. W opracowanym rozwiązaniu, główna pętla programu realizowana na układzie FPGA pracuje z okresem 25 nanosekund, co odpowiada częstotliwości 40 MHz. Wejścia modułu myRIO-1900, służące do odczytu sygnałów cyfrowych z enkoderów oraz sygnałów sterujących, zostały zdefiniowane w obszarze wejść/wyjść (I/O Node) przy użyciu biblioteki LabVIEW FPGA.

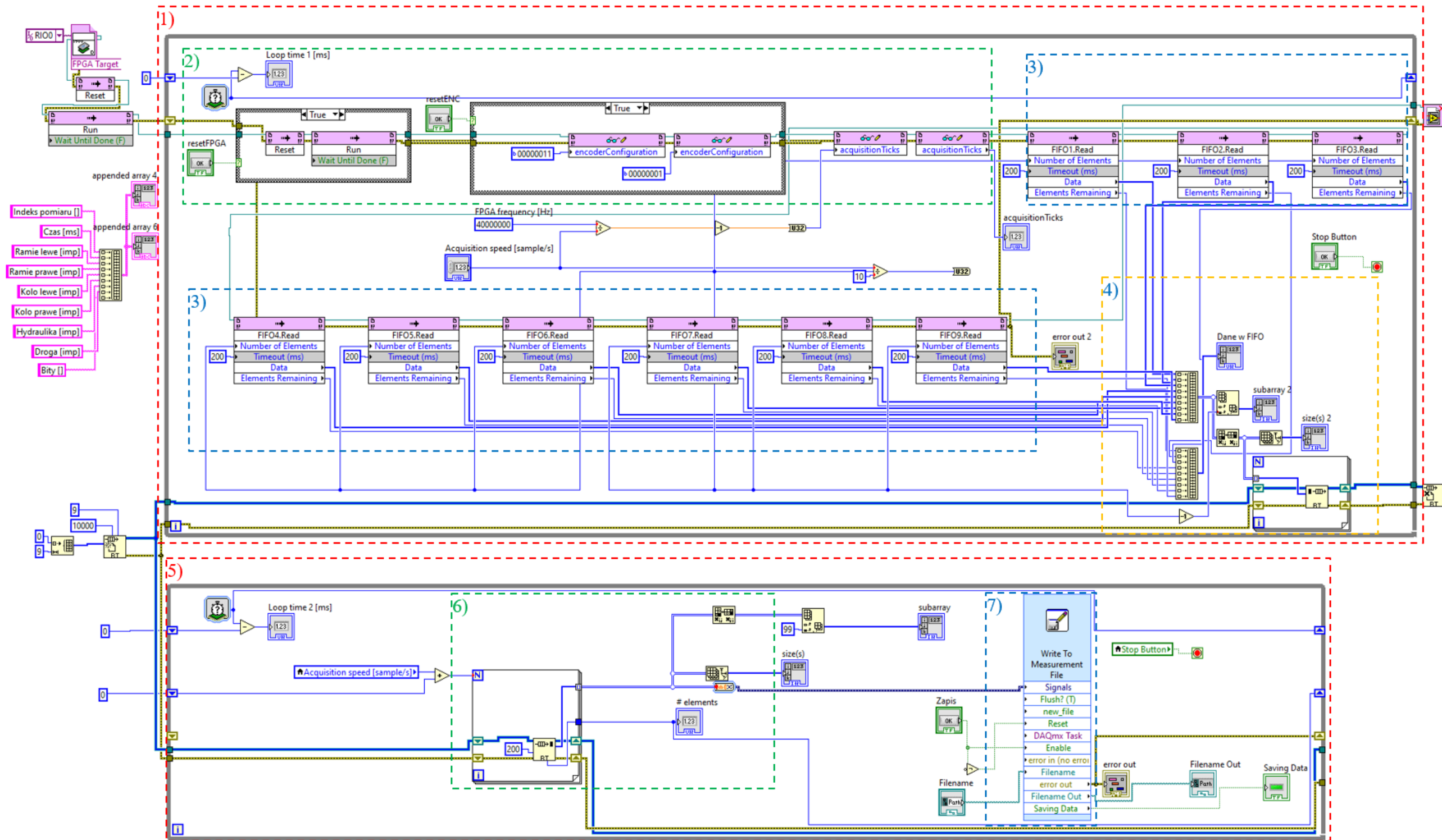
Za odczyt chwilowych wartości sygnałów z enkoderów i wejść cyfrowych odpowiadają dedykowane funkcje (Encoder.vi) z biblioteki LabVIEW FPGA dla modułu myRIO-1900. W ramach konfiguracji enkoderów przyjęto pracę z enkoderem kwadraturowym o fizycznej rozdzielczości 3600 impulsów na jeden pełny obrót [99]. Pomiarowa rozdzielczość sygnału w module myRIO-1900 została ustalona na 14400 impulsów na obrót. Dane pomiarowe z odczytów są zapisywane do kolejek FIFO, wykorzystując funkcję zapisu (Write – FIFO Method) z biblioteki LabVIEW FPGA. Kolejki FIFO mają pojemność 511 elementów, a każdy element to 32-bitowa liczba całkowita bez znaku. Dane do pamięci FIFO zapisywane są cyklicznie co 5 milisekund. Schemat struktury FPGA przedstawiony został na rysunku 82.



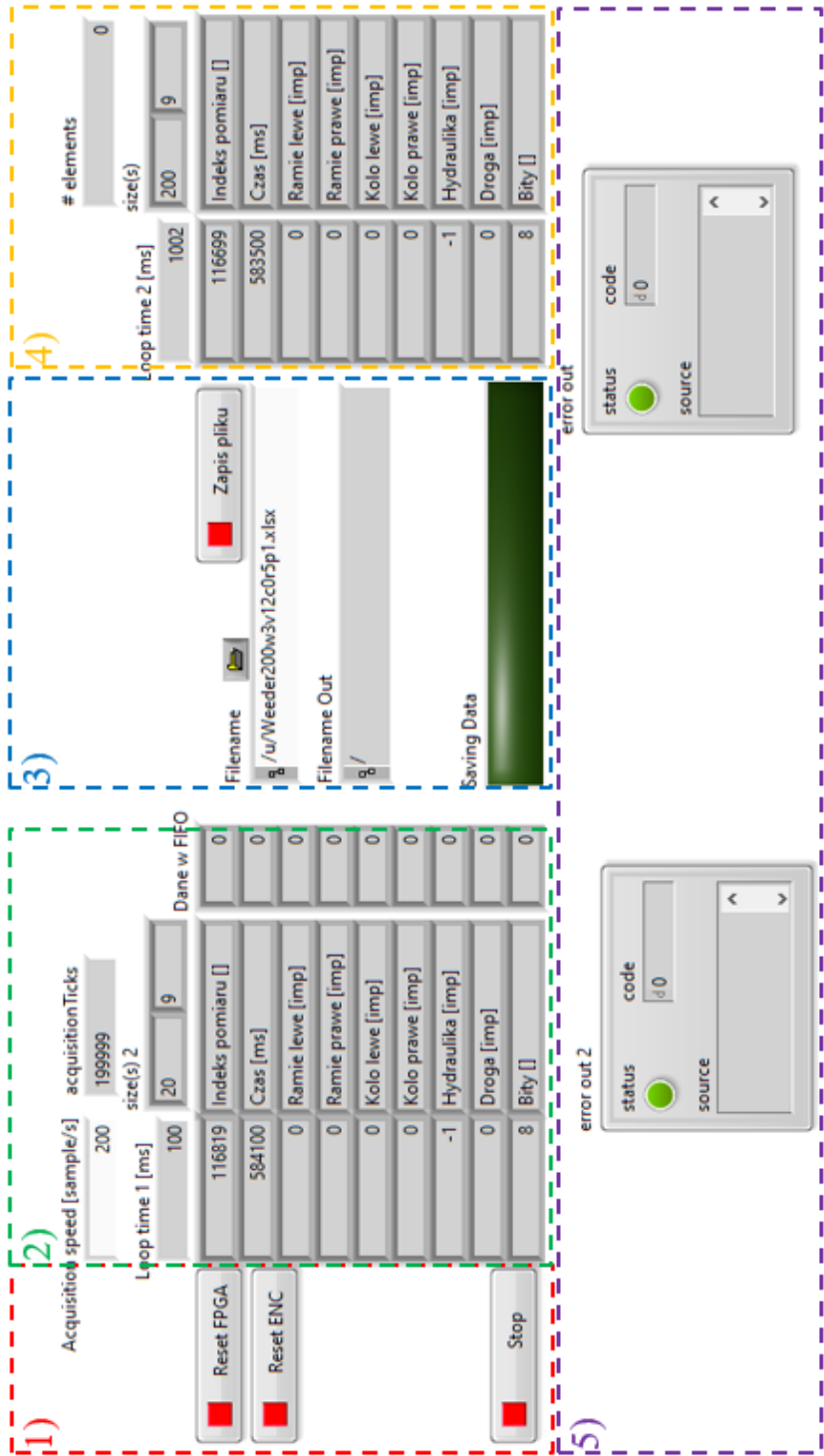
Rysunek 82. Schemat struktury opracowanej w Labview dla modułu myRIO-1900 umożliwiającej pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych: 1 – główna pętla programu, 2 – obszar definicji wejść modułu myRIO-1900 służących do odczytu sygnałów cyfrowych z enkoderów i sterujących (biblioteka Labview FPGA, I/O Node), 3 – funkcje opowiadające za odczyt chwilowych wartości enkoderów i wejść cyfrowych (biblioteka Labview FPGA, myRIO-1900, Encoder.vi), 4 – zapis danych pomiarowych do kolejek FIFO (biblioteka Labview FPGA, Write (FIFO Method)).
 Źródło: Opracowanie własne.

W module akwizycji danych główna pętla programu pracuje z okresem 100 ms. W każdym cyklu pętli pobierane są 20 wierszy danych z poszczególnych kolejek FIFO, które zawierają wartości pomiarowe.

Za odczyt wartości ze sprzętowych kolejek FIFO, przechowujących dane o położeniu enkoderów oraz wartościach wejść cyfrowych, odpowiadają funkcje z biblioteki LabVIEW FPGA (Invoke Method Function). Dane pomiarowe są przygotowywane i zapisywane do kolejki FIFO aplikacji czasu rzeczywistego przy pomocy funkcji z biblioteki LabVIEW Real-Time (RT FIFO Write Function). Odczytane dane z kolejek FIFO są wstawiane do struktury 2-wymiarowej macierzy, która umożliwia późniejsze umieszczenie tych danych w kolejce FIFO dla aplikacji czasu rzeczywistego w module myRIO-1900. Dodatkowo, zaprojektowano niezależną pętlę obsługującą proces zapisu zgromadzonych danych pomiarowych do pliku. Ta pętla działa z okresem 1 sekundy, a w każdym cyklu pobiera 200 wierszy danych pomiarowych z enkoderów oraz wejść bitowych. Takie rozwiązanie zapewnia poprawną pracę pętli odbierającej dane z FPGA, bez blokowania jej w trakcie uruchamiania zapisu danych do pliku. Funkcje z biblioteki LabVIEW Real-Time (RT FIFO Read Function) odpowiadają za odbiór danych z kolejki FIFO aplikacji systemu czasu rzeczywistego oraz przygotowanie tych danych do zapisania w pliku. Właściwy zapis danych do pliku odbywa się za pomocą funkcji z biblioteki LabVIEW (Write To Measurement File Express VI), która zapisuje dane w formacie arkusza kalkulacyjnego Excel. Struktura Real-Time pokazana została na rysunku nr 83. Interfejs użytkownika przedstawiono na rysunku 84.



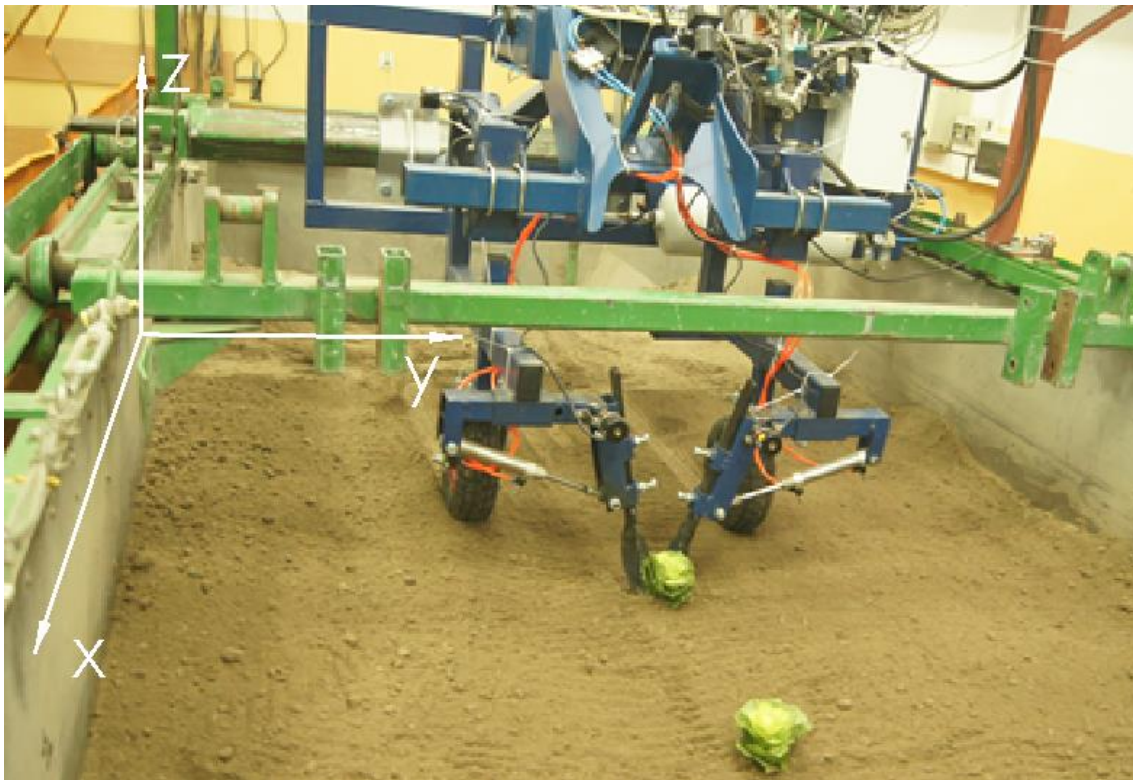
Rysunek 83. Schemat struktury opracowanej w LabView Real-Time Module dla modułu myRIO-1900 umożliwiający pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych:
 1 – główna pętla programu, 2 – obszar sterowania strukturą FPGA oraz licznikami dla enkoderów (biblioteka Labview FPGA, Invoke Method Function, Read/Write Control Function), 3 – funkcje opowiadające za odczyt wartości ze sprzętowych kolejek FIFO przechowujących dane: położenie enkoderów i wartości wejść cyfrowych (biblioteka Labview FPGA, Invoke Method Function), 4 – przygotowanie i zapis danych do kolejki FIFO aplikacji czasu rzeczywistego (biblioteka Labview Real-Time, RT FIFO Write Function), 5 – pętla obsługi zapisu danych do pliku, 6 – odbiór z kolejki FIFO i przygotowanie danych do zapisu (biblioteka Labview Real-Time, RT FIFO Read Function), 7 – zapis danych do pliku (biblioteka Labview, Write To Measurement File Express VI).
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 84. Schemat interfejsu użytkownika struktury opracowanej w Labview Real-Time Module dla modułu myRIO-1900 umożliwiającej pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych: 1 – elementy do sterowania strukturą FPGA i liczników dla enkoderów pomiarowych, 2 – obszar sterowania wyświetlania procesu informacji dla procesu pomiarowego: enkoderów i pól bitowych, 3 – obszar sterowania i wyświetlania informacji dla procesu zapisu danych w pliku, 4 – obszar wyświetlania informacji uzyskanych z procesu dodawania poszczególnych danych pomiarowych do pliku, 5 –obszar informacji o błędach w czasie wykonywania aplikacji.
 Źródło: Opracowanie własne.

11.3. Kalibracja systemu rejestracji sygnałów

W wszystkich wariantach trajektorii pierwsza roślina jest w jednakowej pozycji, która będzie pozycją odniesienia. Aby zapewnić powtarzalność badań, wykorzystując tryb ręczny, przemieszczono sekcje tak, by noże dotykały pierwszej rośliny oraz roślina była w osi. Dodatkowo wszystkie przejazdy rozpoczynane były z jednakowej pozycji, która zaznaczona była na kanale glebowym oraz z jednakowej pozycji siłownika hydraulicznego. Pozwoliło to na powtarzalne wykonywanie przejazdów oraz wyliczanie rzeczywistych pozycji noży pielących. Dodatkowo pierwsza roślina zawsze była w jednakowej pozycji. Po przeliczeniu wartości kątowych enkoderów odsunięcie pierwszej rośliny wynosiło 1650 mm w osi x oraz 1010 mm w osi y. Odczyt odsunięcia pierwszej rośliny przedstawiono na rysunku 85.



Rysunek 85. Ustawienie noży dłutowych stycznie do pierwszej rośliny w osi x i centralnie do rośliny w osi y w celu odczytu odsunięcia.

Źródło: Opracowanie własne.

12. Wyniki badań sekcji pielącej na kanale glebowym

W celu precyzyjnej analizy pracy elementów roboczych przeprowadzono badania w kontrolowanych warunkach kanału glebowego. Po uruchomieniu stanowiska badawczego zbadano czasy reakcji poszczególnych elementów sekcji pielącej oraz obliczono opóźnienia ruchu elementów roboczych. W drugiej części wykonano przejazdy próbne i dokonano pomiarów ruchu elementów roboczych. Badania te miały na celu określenie różnic w odwzorowaniu trajektorii przejazdu modelowego, a także analizę wpływu chwastów na trajektorię ruchu noży dłutowych. Do analizy wyników wykorzystano narzędzia statystyczne umożliwiające ocenę zgodności przejazdu rzeczywistego z modelem.

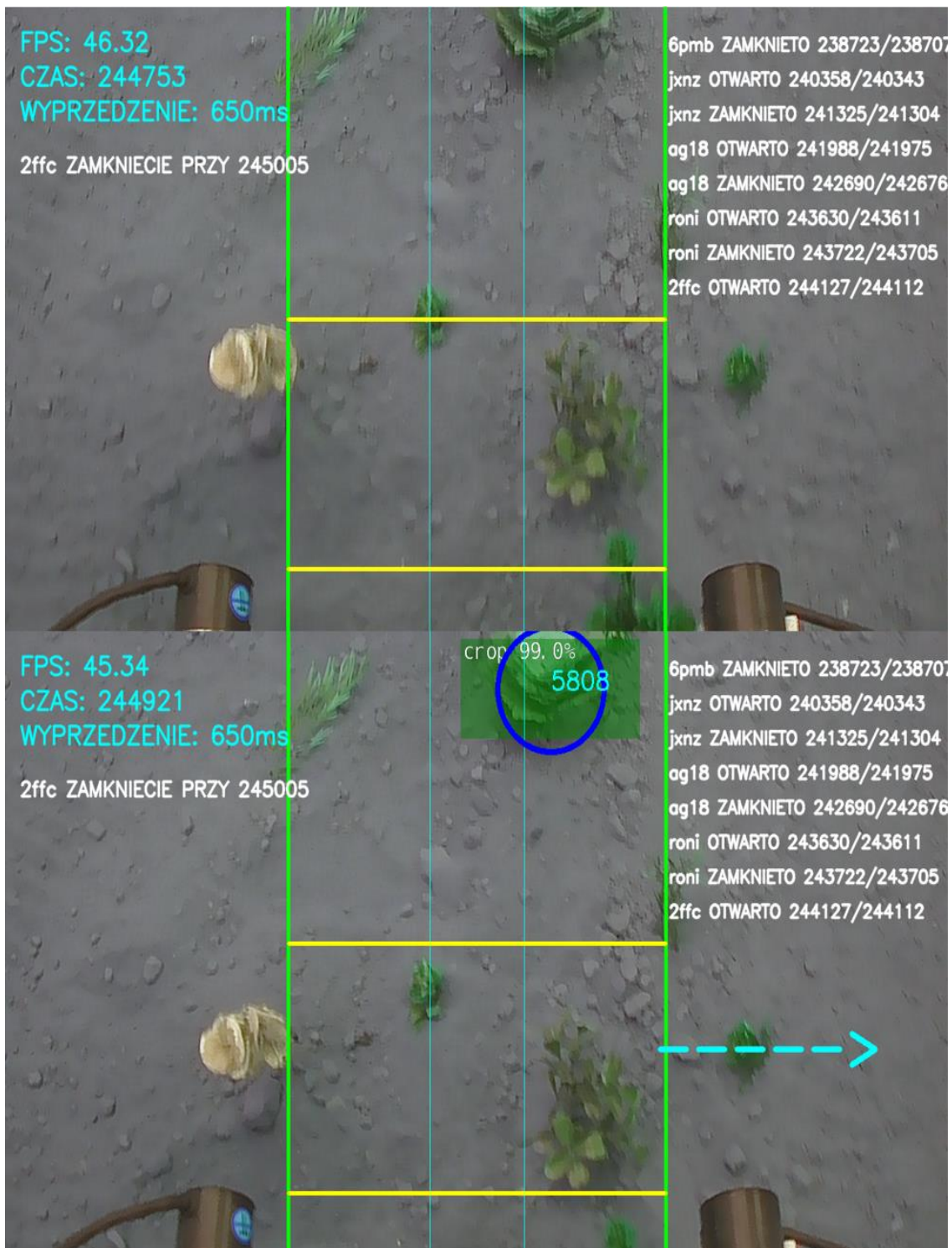
12.1. Uruchomienie stanowiska badawczego i przejazdy próbne

Aby dokładnie przedstawić zasadę działania systemu mechatronicznego w warunkach rzeczywistych, wstępnie wykonano przejazdy próbne. Podczas tych przejazdów wykonano serię zdjęć przedstawiających istotę działania systemu mechatronicznego opartego o widzenie maszynowe (rys. 86-89). Zdjęcia przedstawiają aktualny widok z perspektywy widoku systemu sterującego.

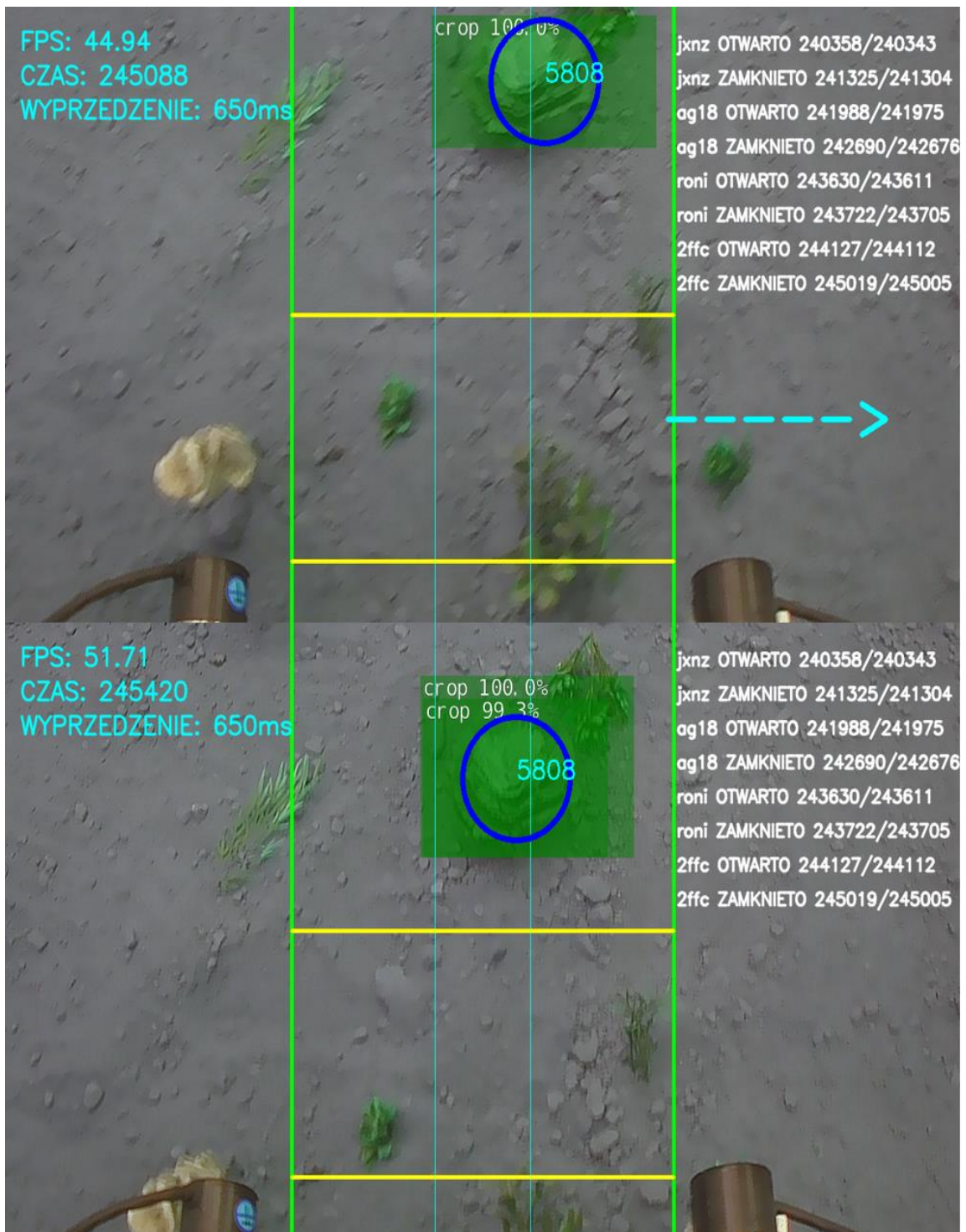
W pierwszym etapie, przedstawionym na rysunku 86 następuje wykrycie rośliny przez system sztucznej inteligencji i określenie jej współrzędnych. Następnie ocenione zostaje jej położenie poprzeczne i sprawdzenie, czy jej środek mieści się w liniach histerezy, które wyznaczają obszar który uważany jest za centralne ustawienie. Jeżeli roślina znajduje się po lewej, bądź prawej stronie następuje podjęcie decyzji o wywołaniu przesuwu poprzecznego.

W kolejnym etapie, przedstawionym na rysunku 87, następuje przesuw poprzeczny sekcji tak, by środek rośliny znalazł się w zakresie histerezy określającej jej właściwe położenie (rys. 87), dodatkowo cały czas sprawdzane jest położenie pionowe rośliny i jego położenie względem bramek górnych i dolnych, które wywołają ruchu noży dłutowych.

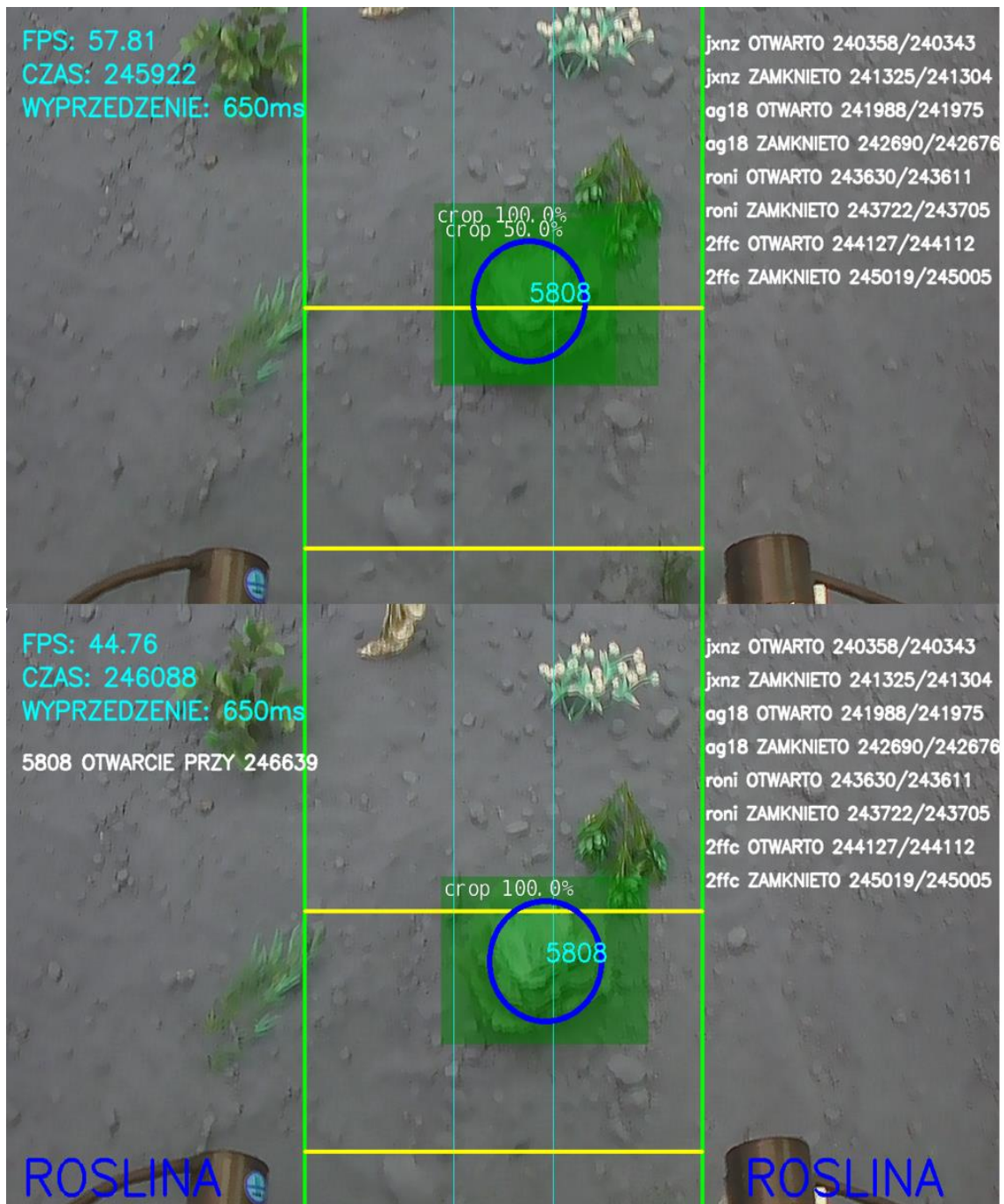
Podczas przekroczenia górnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych (rys. 88), system generuje komendę rozwarcia noży dłutowych, która zostaje przekazywana na osobny wątek wykonawczy sterujący przekaźnikami siłowników pneumatycznych. Komenda zostanie wykonana po upływie czasu opóźnienia, zależnego od prędkości roboczej maszyny (rys. 89).



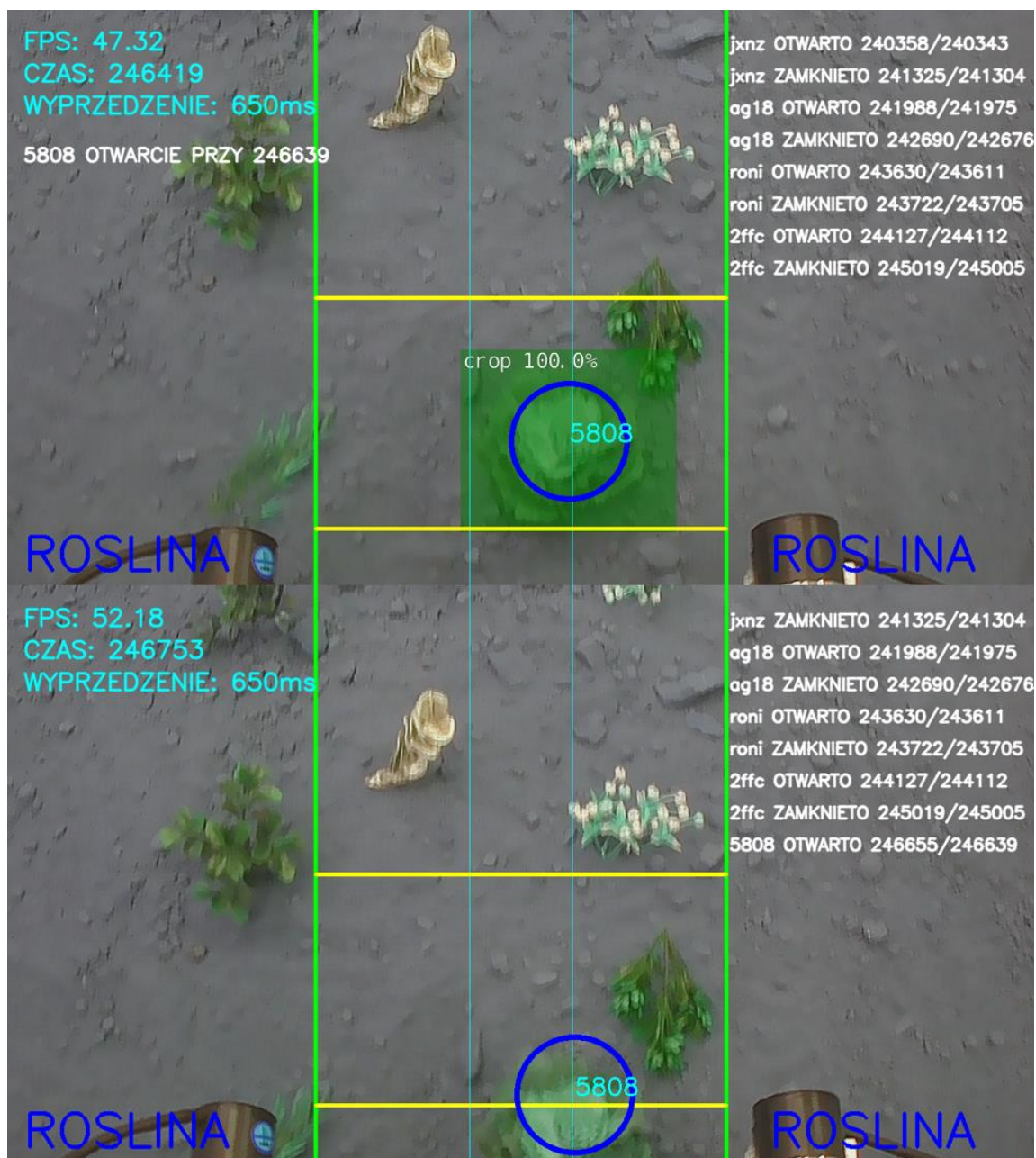
Rysunek 86. Wykrycie rośliny przez system i ocena jej położenia poprzecznego.
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 87. Wykonanie przesuwu poprzecznego części roboczej sekcji pielącej.
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 88. Wykrycie przekroczenia przez roślinę górnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych.
 Źródło: Opracowanie własne.



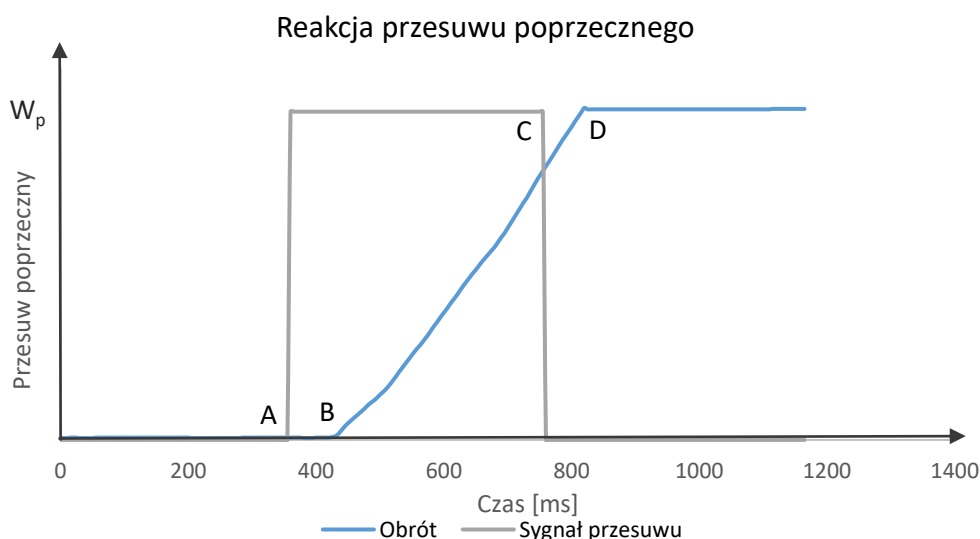
Rysunek 89. Wykrycie przekroczenia przez roślinę dolnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych.

Źródło: Opracowanie własne.

Podczas przekroczenia dolnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych (rys. 89) system generuje komendę zwarcia noży dłutowych, która zostaje przekazywana na osobny wątek wykonawczy sterujący przekaźnikami siłownikami pneumatycznymi. Komenda zostanie wykonana po upływie czasu opóźnienia, zależnego od prędkości roboczej maszyny, podobnie jak w przypadku komendy rozwarcia noży dłutowych.

12.2. Badania czasów opóźnień elementów roboczych sekcji pielącej i wyznaczenie opóźnień reakcji

Ważnym parametrem kalibracyjnym, oprócz centralnego ustawienia kamery jest określenie opóźnienia reakcji elementów roboczych względem systemu sterującego. Zbadano reakcję siłownika hydraulicznego FE oraz pary siłowników pneumatycznych W_1Y_1 i W_2Y_2 zgodnie ze schematem (rys. 27). W tym celu posłużono się systemem enkoderów rejestrujących obrót elementów połączonym z odczytem sygnałów wyjściowych z komputera sterującego Jetson Xavier NX. Do określenia zbadania reakcji siłownika FE wykonano serię 10 pomiarów wywołania przesuwu poprzecznego sekcji pielącej przez system i je zapisano. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe jest wyznaczenie czasu opóźnienia reakcji elementów roboczych sekcji pielącej od pojawienia się sygnału cyfrowego oraz poznanie charakterystyki ruchu elementów roboczych. Do określenia reakcji siłowników pneumatycznych W_1Y_1 i W_2Y_2 wykonano serię 10 pomiarów wywołania ruchu wewnętrznego i zewnętrznego noży dłutowych i zarejestrowano charakterystykę ruchu noży dłutowych oraz wystąpienia sygnału sterującego. Przykładowy wykres reakcji przesuwu poprzecznego przedstawiono na rysunku 89, zaś przykładowy wykres reakcji noży dłutowych przedstawiono na rysunku 90. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 7 oraz 8.



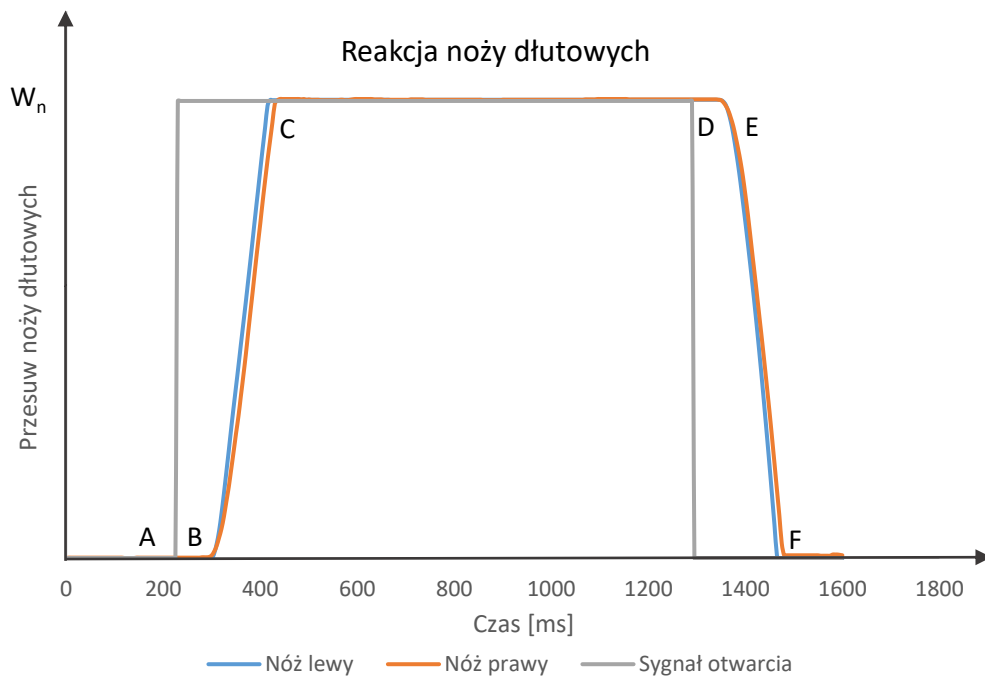
Rysunek 90. Wykres zmian położenia siłownika hydraulicznego w stosunku do wystąpienia sygnału sterującego przekaźnikiem przesuwu w funkcji czasu. A – początek wystąpienia sygnału przesuwu, B – rozpoczęcie ruchu poprzecznego części roboczej, C – koniec sygnału przesuwu, D – koniec ruchu poprzecznego części roboczej, W_p – wartość przesuwu poprzecznego części roboczej.

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 7. Czasy reakcji wywoływania i zatrzymywania ruchu poprzecznego.

Lp.	Czas reakcji załączania	Czas reakcji rozłączania	Średnia
1	70	70	70
2	70	65	67,5
3	70	70	70
4	70	70	70
5	70	70	70
6	70	65	67,5
7	70	70	70
8	70	65	67,5
9	70	70	70
10	70	65	67,5
Średnia			69
Odchylenie standardowe średnich			1,29

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 91. Wykres zmian położenia siłowników pneumatycznych w stosunku do wystąpienia sygnału sterującego przekaźnikiem ruchu noży dłutowych w funkcji czasu, A – początek wystąpienia sygnału ruchu zamykania noży dłutowych, B – rozpoczęcie ruchu zamykania noży dłutowych, C – osiągnięcie maksymalnego zamykania noży dłutowych, D – koniec występowania sygnału ruchu zamykania noży dłutowych, E – początek ruchu rozamykania noży dłutowych, F – koniec ruchu rozamykania noży dłutowych, W_n – wartość przesuwu poprzecznego noży dłutowych wynikającego z ruchu wahadłowego noży dłutowych.

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 8. Czasy poszczególnych reakcji ruchu zwarcia i rozwarcia noży wahliwych. ROL – czas reakcji rozpoczęcia ruchu noża lewego w kierunku od osi rzędu, ROP – czas reakcji rozpoczęcia ruchu noża prawego w kierunku od osi rzędu, RZL – czas reakcji rozpoczęcia ruchu noża lewego w kierunku do osi rzędu, RZP – czas reakcji rozpoczęcia ruchu noża prawego w kierunku do osi rzędu, COL – czas ruchu noża lewego w kierunku od osi rzędu, COP- czas ruchu noża prawego w kierunku od osi rzędu, CZL – czas ruchu noża lewego w kierunku do osi rzędu, CZP – czas ruchu noża prawego w kierunku do osi rzędu, CROL- łączny czas ruchu noża lewego w kierunku od osi rzędu od pojawienia się sygnału, CROP- łączny czas ruchu noża prawego w kierunku od osi rzędu od pojawienia się sygnału, CRZL- łączny czas ruchu noża lewego w kierunku od osi rzędu od pojawienia się sygnału, CRZP- łączny czas ruchu noża prawego w kierunku do osi rzędu od pojawienia się sygnału, RŚ- średni łączny czas ruchu w kierunku od / do osi rzędu.

Lp.	Czasy poszczególnych operacji												RŚ
	ROL	ROP	RZL	RZP	COL	COP	CZL	CZP	CROL	CROP	CRZL	CRZP	
1	70	70	65	65	130	135	135	140	200	205	200	205	202,5
2	70	70	70	65	130	135	135	135	200	205	205	200	202,5
3	70	70	70	70	135	135	140	140	205	205	210	210	207,5
4	70	70	65	70	135	130	135	140	205	200	200	210	203,75
5	65	70	70	70	135	135	135	135	200	205	205	205	203,75
6	70	70	70	65	130	140	140	135	200	210	210	200	205
7	70	70	70	70	130	130	135	140	200	200	205	210	203,75
8	70	65	70	70	135	130	135	140	205	195	205	210	203,75
9	70	70	70	70	135	135	140	140	205	205	210	210	207,5
10	70	70	65	70	130	135	135	135	200	205	200	205	202,5
Średnia												204,25	
Odchylenie standardowe średnich												1,88	

Źródło: Opracowanie własne.

Zarówno w przypadku siłownika hydraulicznego, jak i siłowników pneumatycznych czas reakcji na rozpoczęcie wykonywania ruchu wyniósł ok. 70 ms. Siłowniki pneumatyczne, połączone równolegle działały w sposób powtarzalny i ich trajektoria ruchu była zbliżona i symetryczna, cechując się odchyłką w czasach na poziomie prędkości próbkowania wynoszącej 5 ms. Średnia czasu ruchu rozwarcia oraz zwarcia noży dłutowych od momentu pojawienia się sygnału cyfrowego do zakończenia wykonywania ruchu wyniosła 204,25 ms. Uwzględniając prędkość próbkowania wartość tę przyjęto jako równą 205 ms. Dodatkowo w wyniku testów wydajnościowych przyjęto średnią prędkość działania programu na 50 klatek na sekundę, a więc średni czas wykonywania jednej iteracji programu wynosi 20 ms. Jest to istotny parametr w celu ustawienia właściwego czasu opóźnienia od wykrycia rośliny do ustawienia sygnału wywołania ruchu noży dłutowych. Kamerę zamontowano w taki sposób, by bramka wychwytywania roślin znajdowała się 0,2 m przed nożami pielącymi. Na podstawie pomiarów czasów reakcji obliczono parametry istotne w procesie sterowania w czasie rzeczywistym i przedstawiono w równaniach (187) – (190).

W równaniach (191) - (195) obliczono czasy, o które należy opóźnić ruch noży dłutowych, z którymi przeprowadzane będą badania trajektorii na kanale glebowym. W równaniach (196) – (200) określono czasy, dla których należy opóźnić sterowanie poprzeczne po wyjściu ostatniej rośliny z obszaru, w którym następuje generowanie komend ruchu noży dłutowych.

$$s_n = 0,20 [m] \quad (187)$$

$$t_0 = 0,205 [s] \quad (188)$$

$$t_{fps} = 0,02 [s] \quad (189)$$

$$t_r = 0,07 [s] \quad (190)$$

$$t_n(v_t) = \frac{s_n}{v_t} - t_0 - t_{fps} \quad (191)$$

$$t_n(v_t) = \frac{0,2}{v_t} - 0,225 [s] \quad (192)$$

$$t_n(v_1) = 0,675 [s] \quad (193)$$

$$t_n(v_2) = 0,495 [s] \quad (194)$$

$$t_n(v_3) = 0,375 [s] \quad (195)$$

$$t_p(v_t) = \frac{s_n}{v_t} - t_r - t_{fps} \quad (196)$$

$$t_p(v_t) = \frac{0,2}{v_t} - 0,09[s] \quad (197)$$

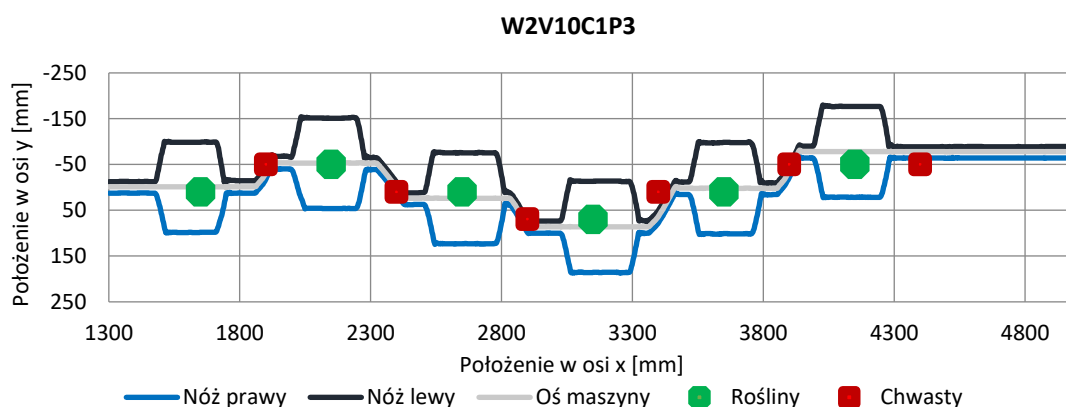
$$t_p(v_1) = 0,81 [s] \quad (198)$$

$$t_p(v_2) = 0,63 [s] \quad (199)$$

$$t_p(v_3) = 0,51 [s] \quad (200)$$

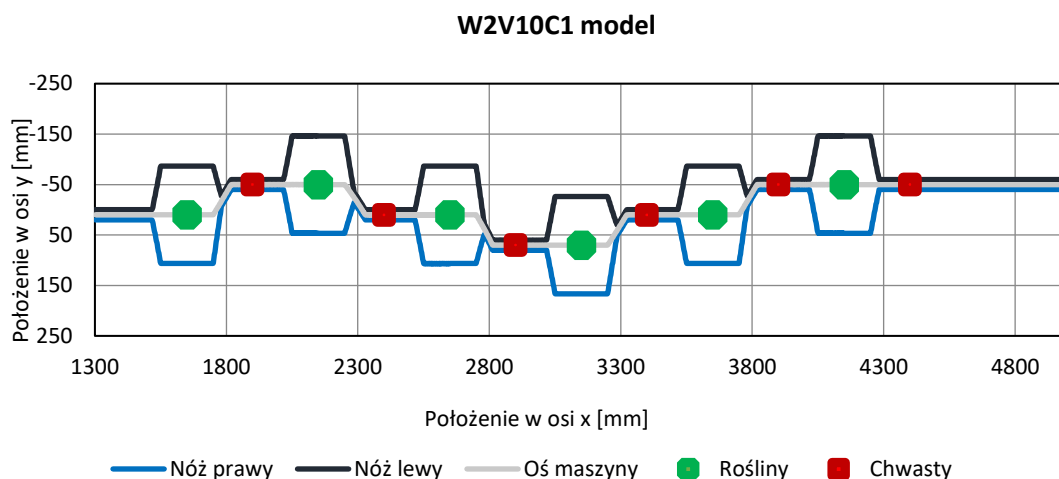
12.3. Interpretacja wyników z enkoderów obrotowych

Dane z enkoderów zawierały jedynie liczby impulsów, które zostały zarejestrowane przez enkoder od czasu zresetowania. Jeden impuls oznacza 1/3600 obrotu, a więc 0,1 stopnia kąta obrotu. Wykorzystując zależności matematyczne zmian kątów do przemieszczeń poszczególnych elementów, wynikające z modelu matematycznego, zostały wyliczone rzeczywiste pozycje noży dłutowych lewego i prawego oraz obliczono położenia osi maszyny względem kanału glebowego, a więc punktu środkowego pomiędzy nożami w położeniu rozwartym. Zakres przejazdu uwzględnianego w opracowywaniu trajektorii ruchu ograniczono do zakresu 1300 – 5000 mm. Pozwoliło to na pominięcie początkowego etapu ustawiania się osi symetrii noży dłutowych w osi pierwszej rośliny. Dodatkowo dla każdego przejazdu obliczono modelową trajektorię ruchu noży pielących wykorzystując metodę „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”, co umożliwiło zarówno wizualne porównanie trajektorii, jak i analizy dopasowania trajektorii rzeczywistej do założonego modelu. Dodatkowo dla każdego przejazdu podczas badań wykonano zdjęcie po wykonanym przejeździe. Na wszystkich wykresach trajektorii ruchu noży dłutowych osie x oraz y są zgodne z rysunkiem 85, a więc x oznacza kierunek wzdłuż kanału glebowego, zaś y oznacza kierunek poprzeczny do kanału glebowego. Rysunki 92, 93, 94 pokazują odpowiednio próbę rzeczywistą, trajektorię modelową odpowiadającą prędkości roboczej, rozkład roślin i chwastów oraz zdjęcie po wykonanej próbie rzeczywistej z widocznymi śladami na glebie.



Rysunek 92. Trajektorii po przeliczeniach sygnałów z uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego dla próby W2V10C1P3 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 3).

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 93. Wariant W2V10C1 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów), trajektoria wygenerowana przez autorski program komputerowy wykorzystujący model matematyczny.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 94. Przejazd W2V10C1P3 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 3), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe.
Źródło: Opracowanie własne.

Po każdej próbie, oprócz wykonania zdjęć dokumentujących przejazd zapisane zostały następujące wartości:

- liczba roślin zniszczonych – traktowana jako liczba roślin, na których szerokości noże pozostały w pozycji zwartej bądź nastąpił fizyczny kontakt z rośliną,
- liczba chwastów pozostawionych – traktowana jako liczba chwastów, na których szerokości noże miały w pozycję rozwartą tj. chwast potraktowany został jak roślina.

12.4. Przedstawienie wyników prób przejazdów

Dla każdego przejazdu sekcji pielęgnacyjnej w kanale glebowym, oprócz wygenerowania trajektorii, zastosowano narzędzia statystyczne pozwalające określić miary odwzorowania przejazdu modelowego dla lewego oraz prawego noża. Wykorzystując autorskie oprogramowanie (rys. 70) dla wszystkich zarejestrowanych punktów na osi x (wzdłuż kanału glebowego) obliczono odpowiadające im wartości na osi y dla modelowej trajektorii w koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”. Następnie wartości rzeczywiste porównane zostały z wartościami modelowymi w programie Excel za pomocą następujących narzędzi:

- test korelacji Pearsona,
- średni błąd absolutny wyrażony w milimetrach,
- średni błąd standardowy wyrażony w milimetrach.

Dodatkowo liczby chwastów pozostawionych oraz liczby roślin niewykrytych przeliczone zostały na wartości procentowe z całej liczby chwastów bądź roślin (tab. 9, 10). Zestawiono wyniki dla wszystkich przejazdów, a także dokonano grupowania w następujących kryteriach (tab. 11):

- obecność chwastów,
- wariant rozkładu roślin,
- prędkość robocza.

Tabela 9. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej cz. 1. W – numer wariantu rozkładu roślin, V – prędkość robocza sekcji pielącej [km/h], C – obecność chwastów, P – numer próby, RL- współczynnik korelacji R-Pearsona dla noża lewego, MAEL – średni błąd bezwzględny noża lewego, SEML – błąd standardowy średniej dla noża lewego, RR – współczynnik korelacji R-Pearsona dla noża prawego, MAER – średni błąd bezwzględny noża prawego, SEMR – błąd standardowy średniej dla noża prawego, %R – procent zniszczonych roślin, %C- procent ominiętych chwastów.

Identyfikacja przejazdu			Wskaźniki odwzorowania trajektorii modelowych									
W	V	C	P	RL	MAE L	SEM L	RR	MAE R	SEM R	%R	%C	
1	0,8	0	1	0,94	7,09	13,03	0,95	7,83	12,55	0,00	0,00	
			2	0,92	20,09	16,08	0,91	11,73	16,65	0,00	n.d.	
			3	0,89	6,60	18,38	0,88	14,27	19,14	0,00	n.d.	
		1	1	0,89	7,39	18,86	0,88	13,16	19,74	0,00	0,00	
			2	0,90	21,69	17,44	0,89	30,75	18,62	0,00	0,00	
			3	0,91	6,03	16,92	0,90	12,23	17,57	0,00	0,00	
	1	0	1	0,88	23,98	19,36	0,89	37,66	19,36	0,00	n.d.	
			2	0,94	30,33	13,46	0,95	41,11	13,32	0,00	n.d.	
			3	0,90	28,18	18,21	0,90	42,61	18,55	0,00	n.d.	
		1	1	0,92	18,90	15,70	0,91	29,63	17,13	0,00	0,00	
			2	0,92	20,63	16,32	0,91	12,37	17,32	0,00	0,00	
			3	0,90	22,44	17,91	0,89	14,36	18,66	0,00	0,00	
	1,2	0	1	0,91	7,05	17,26	0,90	13,89	17,96	0,00	n.d.	
			2	0,90	22,37	17,83	0,90	13,05	18,30	0,00	n.d.	
			3	0,92	14,04	16,24	0,91	6,96	16,93	0,00	n.d.	
		1	1	0,87	9,75	20,13	0,86	13,33	21,16	0,00	0,00	
			2	0,91	24,91	16,98	0,89	16,36	18,68	0,00	0,00	
			3	0,95	33,66	13,05	0,93	25,24	14,59	0,00	0,00	
	2	0,8	0	1	0,90	24,86	32,84	0,87	25,97	31,60	0,00	n.d.
				2	0,88	30,71	36,43	0,81	32,36	39,96	0,00	n.d.
				3	0,87	34,35	42,32	0,81	30,42	38,69	0,00	n.d.
			1	1	0,91	28,35	31,74	0,83	28,15	33,61	0,00	0,00
				2	0,93	23,72	27,55	0,89	22,98	28,25	0,00	0,00
				3	0,91	22,12	31,26	0,90	20,49	27,54	0,00	0,00
1		0	1	0,92	24,11	30,31	0,89	23,08	27,28	0,00	n.d.	
			2	0,87	23,84	31,60	0,81	25,31	30,53	0,00	n.d.	
			3	0,83	30,56	36,93	0,76	32,42	35,32	0,00	n.d.	
		1	1	0,91	24,41	29,40	0,86	27,07	29,17	0,00	0,00	
			2	0,84	32,39	37,95	0,78	32,61	36,88	0,00	0,00	
			3	0,92	22,80	29,83	0,89	24,22	28,44	0,00	0,00	
1,2		0	1	0,87	26,24	32,87	0,75	29,93	39,10	0,00	n.d.	
			2	0,81	33,77	38,37	0,74	31,25	41,52	0,00	n.d.	
			3	0,82	34,29	43,45	0,76	31,57	44,04	0,00	n.d.	
		1	1	0,85	29,57	36,19	0,80	21,49	28,72	0,00	0,00	
			2	0,81	36,70	37,51	0,46	43,70	46,97	16,67	0,00	
			3	0,91	27,44	33,12	0,86	28,88	31,32	0,00	0,00	

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 10. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej cz. 2.

Identyfikacja przejazdu			Wskaźniki odwzorowania trajektorii modelowych								
W	V	C	P	RL	MAE L	SEM L	RR	MAE R	SEM R	%R	%C
3	0,8	0	1	0,82	25,92	33,89	0,87	19,11	27,44	0,00	n.d.
			2	0,78	29,82	39,06	0,80	27,39	39,32	0,00	n.d.
			3	0,63	34,52	49,79	0,70	29,19	43,51	0,00	n.d.
		1	1	0,88	33,38	30,30	0,87	25,49	28,17	0,00	16,67
			2	0,86	31,32	30,78	0,85	26,47	32,97	0,00	0,00
			3	0,84	33,26	33,01	0,85	28,10	32,77	0,00	0,00
	1	0	1	0,83	30,54	31,45	0,85	23,54	29,62	0,00	n.d.
			2	0,68	35,05	40,35	0,76	30,02	36,84	0,00	n.d.
			3	0,83	20,94	31,45	0,83	22,90	34,50	0,00	n.d.
		1	1	0,71	57,36	46,46	0,80	47,05	48,05	0,00	16,67
			2	0,86	31,42	29,90	0,85	25,18	34,14	0,00	16,67
			3	0,87	30,57	30,58	0,88	24,87	32,90	0,00	0,00
	1,2	0	1	0,74	32,26	33,19	0,85	27,83	37,23	0,00	n.d.
			2	0,73	31,54	36,40	0,77	29,18	40,48	0,00	n.d.
			3	0,75	27,92	38,45	0,75	27,38	41,51	0,00	n.d.
		1	1	0,85	26,50	29,11	0,86	19,43	30,01	0,00	0,00
			2	0,89	24,85	28,59	0,87	23,18	32,61	0,00	16,67
			3	0,90	20,34	24,60	0,92	17,96	27,69	0,00	0,00
4	0,8	0	1	0,87	20,26	27,89	0,86	21,63	29,98	0,00	n.d.
			2	0,86	22,83	28,48	0,87	19,71	29,99	0,00	n.d.
			3	0,88	17,99	24,37	0,90	15,89	23,79	0,00	n.d.
		1	1	0,86	23,31	24,21	0,85	24,34	27,73	0,00	0,00
			2	0,90	17,36	22,70	0,88	17,29	25,61	0,00	0,00
			3	0,84	26,19	29,16	0,85	26,18	28,70	0,00	0,00
	1	0	1	0,61	33,18	42,15	0,75	29,69	40,55	0,00	n.d.
			2	0,78	30,89	36,52	0,77	31,96	34,66	0,00	n.d.
			3	0,83	24,23	29,93	0,86	26,39	34,80	0,00	n.d.
		1	1	0,88	20,01	26,37	0,83	22,06	29,65	0,00	0,00
			2	0,87	20,87	28,81	0,89	19,69	28,81	0,00	0,00
			3	0,78	25,11	33,04	0,82	22,86	28,83	0,00	0,00
	1,2	0	1	0,78	22,42	34,37	0,86	24,06	29,34	0,00	n.d.
			2	0,86	21,83	30,21	0,84	22,02	33,65	0,00	n.d.
			3	0,88	17,44	25,89	0,79	24,22	32,70	0,00	n.d.
		1	1	0,91	17,55	25,01	0,85	21,31	30,37	0,00	0,00
			2	0,60	36,07	41,25	0,64	41,33	46,02	0,00	0,00
			3	0,89	22,57	24,22	0,87	19,92	27,40	0,00	0,00
Średnia				0,85	25,18	28,82	0,84	24,63	29,55	0,22	1,85

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 11. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej grupowane po poszczególnych kryteriach, RL- Współczynnik korelacji R-Pearsona dla noża lewego, MAEL – średni błąd bezwzględny noża lewego, SEML – błąd standardowy średniej dla noża lewego, RR – współczynnik korelacji R-Pearsona dla noża prawego, MAER – średni błąd bezwzględny noża prawego, SEMR – błąd standardowy średniej dla noża prawego, %R – procent zniszczonych roślin, %C- procent ominiętych chwastów.

GRUPA	Wskaźniki odwzorowania trajektorii modelowych							
	RL	MAE L	SEM L	RR	MAE R	SEM R	%R	%C
C1	0,87	25,30	27,39	0,85	24,16	28,52	0,46	1,85
C0	0,84	25,08	30,23	0,84	25,08	30,59	0,00	nd.
W1	0,91	18,10	16,82	0,90	19,77	17,60	0,00	0,00
W2	0,88	28,35	34,43	0,80	28,44	34,39	0,93	0,00
W3	0,80	30,97	34,30	0,83	26,35	34,99	0,00	7,41
W4	0,83	23,34	29,70	0,83	23,92	31,25	0,00	0,00
V08	0,87	22,91	28,17	0,86	22,10	28,10	0,00	1,39
V10	0,85	27,61	29,33	0,85	27,86	29,39	0,00	2,78
V12	0,85	25,05	28,93	0,82	23,90	31,18	0,69	1,39

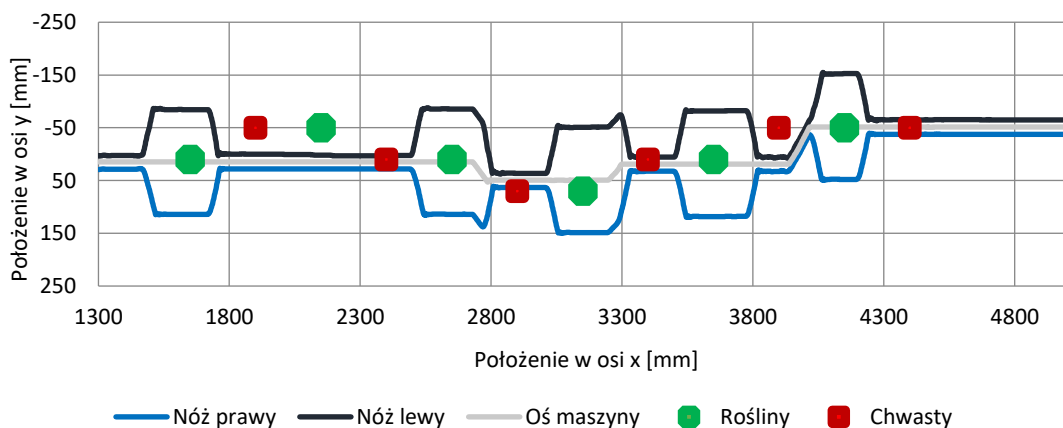
Źródło: Opracowanie własne.

Podczas przejazdów zarejestrowano wystąpienia następujących zdarzeń:

- Zniszczenie 1 rośliny w przejeździe W2V12C1P2,
- Pozostawienie 1 chwastu w 4 przejazdach: W3V08C1P1, W3V10C1P1, W3V10C1P2, W3V12C1P2.

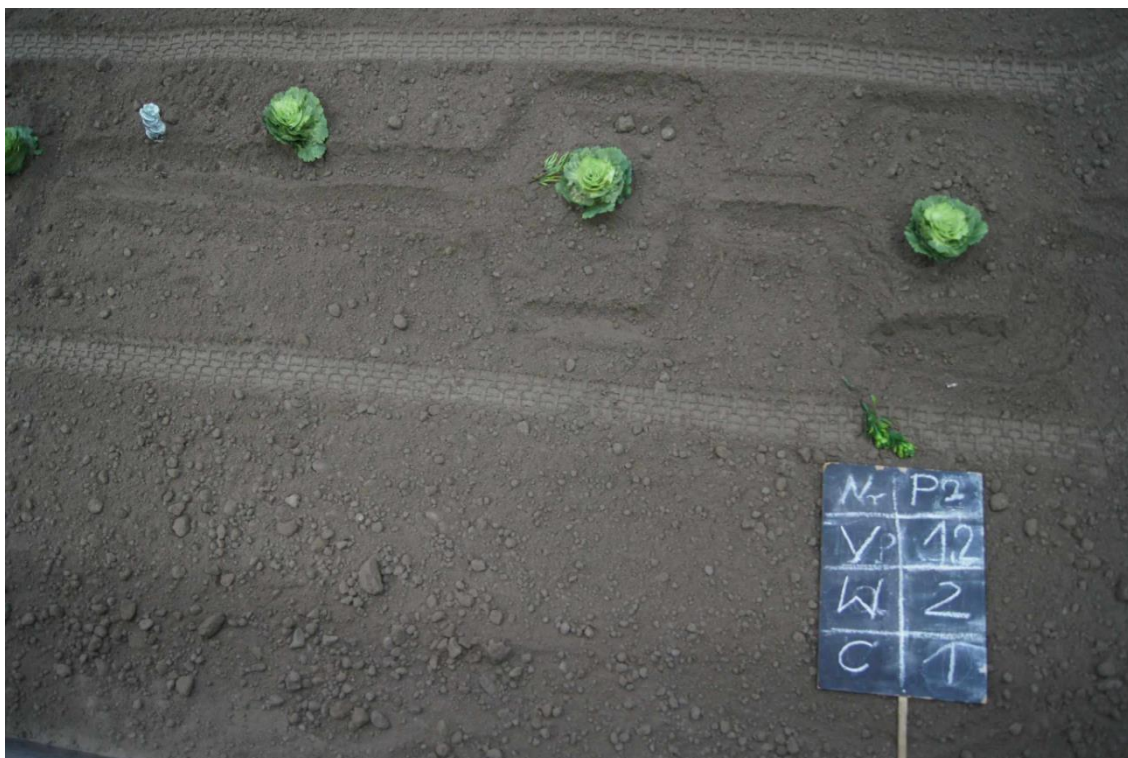
Przykłady zdarzeń zniszczenia rośliny bądź pozostawienia chwastu przedstawione zostały na rysunkach 95 i 96 oraz 97 i 98.

W2V12C1P2



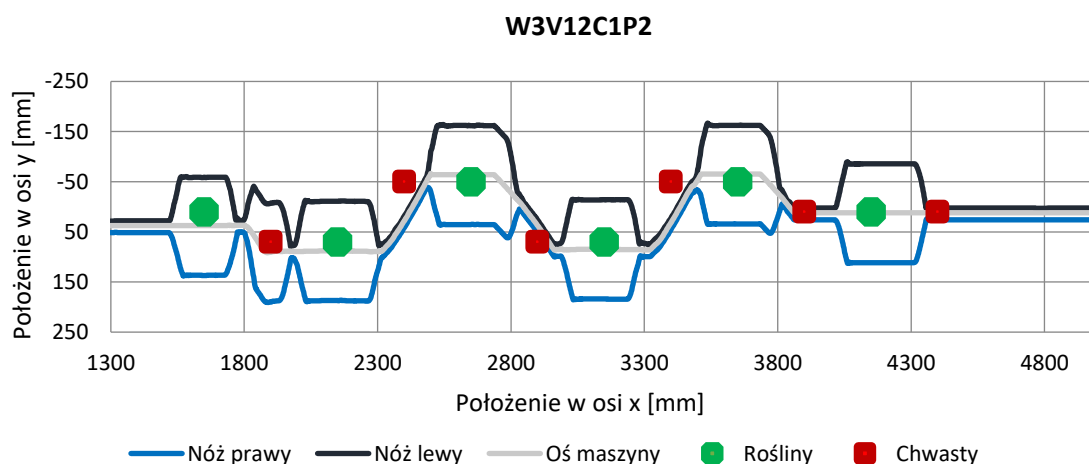
Rysunek 95. Przejazd W2V12C1P2 (wariant 2, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego.

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 96. Przejazd W2V12C1P2 (wariant 2, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe.
Źródło: Opracowanie własne.

Zdarzenie zniszczenia rośliny pokazane na rysunkach 97 oraz 98 dotyczy drugiej rośliny w krzywoliniowym rzędzie roślin zakłóconym chwastami. Po prawidłowym ominięciu pierwszej rośliny przez noże dłutowe sekcja pieląca nie zmieniła położenia poprzecznego tak, by ustawić się osiowo do rośliny drugiej. Nie nastąpiło również rozwarcie noży dłutowych. W dalszej części tor ruchu przebiegał prawidłowo.



Rysunek 97. Przejazd W3V12C1P2 (wariant 3, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 98. Przejazd W3V12C1P2 (wariant 3, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe.
Źródło: Opracowanie własne.

Zdarzenie ominięcia chwastu pokazane rysunkach 97 oraz 98 dotyczy pierwszego chwastu krzywoliniowym rzędzie roślin zakłóconym chwastami. Po prawidłowym ominięciu pierwszej rośliny przez noże dłutowe sekcja pieląca wykonała ruch poprzeczny ustawiając się w osi chwastu i nastąpił ruch noży dłutowych na zewnątrz. Po ominięciu chwastu nastąpił ruch noży dłutowych w kierunku wewnętrznym. W dalszej części tor ruchu przebiegał prawidłowo.

13. Dyskusja wyników badań

Przejazdy sekcji w kanale glebowym o różnych wariantach rozkładu roślin i chwastów, przy różnych prędkościach roboczych pokazały możliwości zastosowania autorskiego rozwiązania sekcji pielącej do usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin. Pomimo, iż badania ujawniły wadę konstrukcyjną sekcji pielącej opisaną w dalszej części, to serie przejazdów potwierdziły, iż wykorzystanie detekcji obiektów za pomocą sieci neuronowych w usuwaniu chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach jest właściwym kierunkiem, a koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” może być właściwym podejściem w sterowaniu ruchem elementów roboczych sekcji pielnika.

13.1. Zdarzenie zniszczenia uprawianej rośliny

W 72 przejazdach, spośród 450 roślin, zniszczona została jedna roślina, co daje 0,22% zniszczonych roślin podczas badań. Incydent ten nastąpił podczas przejazdu sekcji pielącej w powtórzeniu 2 wariantu 2 rozkładu roślin zakłóconego chwastami przy prędkości 1,2 km/h. Możliwe przyczyny wystąpienia tego zdarzenia to:

1. Zawieszenie się programu sterującego bądź kamery.
2. Rozpoznanie rośliny, lecz poza liniami zakresu sterowania poprzecznego.
3. Awaria sterowania elementami roboczymi, tj. przekaźników bądź elektrozaworów.
4. Nierozpoznanie rośliny i kontynuacja przejazdu prawidłowo, lecz z pominięciem rośliny, co spowodowało jej zniszczenie.

W celu dokładnego zbadania przyczyny incydentu zniszczenia rośliny pobrano dane diagnostyczne z pracy oprogramowania sterującego i przeanalizowano je. Pozwoliło to na odrzucenie możliwych przyczyn 1 oraz 2, program działał prawidłowo, liczba klatek na sekundę wahała się pomiędzy 40 a 50. Również możliwa przyczyna 3 została odrzucona, ponieważ system zbierający dane pomiarowe nie zarejestrował sygnałów sterujących przekaźnikami przesuwu poprzecznego oraz ruchem noży dłutowych. Dane diagnostyczne potwierdziły możliwą przyczynę 4. W żadnej klatce podczas przejazdu na szerokości widoczności rośliny kapusta nie została wykryta. Program działał prawidłowo przy założeniu, iż na tej szerokości nie ma rośliny, w związku z czym nie został wysłany zarówno sygnał przesuwu poprzecznego, jak i ruchu wahadłowego noży dłutowych. Próg detekcji w programie sterującym ustawiony był na 90% pewności, iż jest to roślina właściwa, czyli kapusta. W przypadku tej rośliny próg ten nie został osiągnięty.

Występowanie takich sytuacji świadczy o tym, że model sieci neuronowej nie był wystarczająco nauczony. Wynika to z niedostatecznego zbioru danych uczących bądź zbyt małej liczby iteracji programu uczącego sieć.

13.2. Zdarzenia omijania chwastów

W 36 przejazdach z obecnością chwastów, spośród 216 sztucznych chwastów, ominięte zostały 4 chwasty, co daje 1,85% zniszczonych chwastów podczas badań. W każdym przypadku chwast potraktowany został jako roślina uprawiana, co skutkowało ustawieniem centralnym sekcji w osi chwastu oraz wywołaniem ruchu noży pielących. Pomimo wysokiego progu detekcji, wynoszącego 90% pewności, iż obiekt jest rośliną uprawną, wykrycie potraktowane zostało jako roślina uprawna. W każdym przypadku rozpoznawanie chwastu jako rośliny dotyczyło chwastu klasy C1 (rys. 79), więc prawdopodobnie jego kształt i kolor najbardziej przypominał kapustę z punktu widzenia sieci neuronowej. Występowanie takich sytuacji świadczy o tym, że model sieci neuronowej nie był wystarczająco nauczony rozróżniania chwastów od roślin, zwłaszcza pod kątem chwastu klasy C1. Wynika to z niedostatecznego zbioru danych uczących bądź zbyt małej liczby iteracji programu uczącego sieć. Mimo tych incydentów, 1,85% ominiętych chwastów w rzędzie jest bardzo dobrym wynikiem i uwzględniając fakt, iż zabieg pielenia wykonuje się kilkakrotnie, w krótkich odstępach czasu, chwasty pozostawione prawdopodobnie zostałyby usunięte w kolejnych przejazdach.

13.3. Poziom odwzorowania ścieżek modelowych trajektorii ruchu noży pielących podczas przejazdów sekcji pielącej

Poziom odwzorowania zachowania przebiegu modelowego określono za pomocą testu korelacji Pearsona oraz średniego błędu absolutnego i błędu standardowego. Porównywano trajektorie rzeczywiste z danych z enkoderów ze ścieżkami modelowymi wygenerowanymi na podstawie metody „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”. Parametry te były osobno wyliczane dla trajektorii prawego noża oraz trajektorii lewego noża. Średnia testów korelacji Pearsona dla lewego i prawego noża wyniosła odpowiednio 0,85 oraz 0,84. Najwyższe wartości osiągnęto dla wariantu 1, gdzie wynosiły odpowiednio 0,91 oraz 0,90, zaś najniższe dla wariantu 3, gdzie wynosiły odpowiednio 0,80 i 0,83. Ciekawą obserwacją jest fakt, iż dla teoretycznie bardziej skomplikowanego

wariantu 4 osiągnięto lepsze wyniki zarówno pod kątem testu korelacji Pearsona, jak i wartości błędów, jednak różnice były niewielkie.

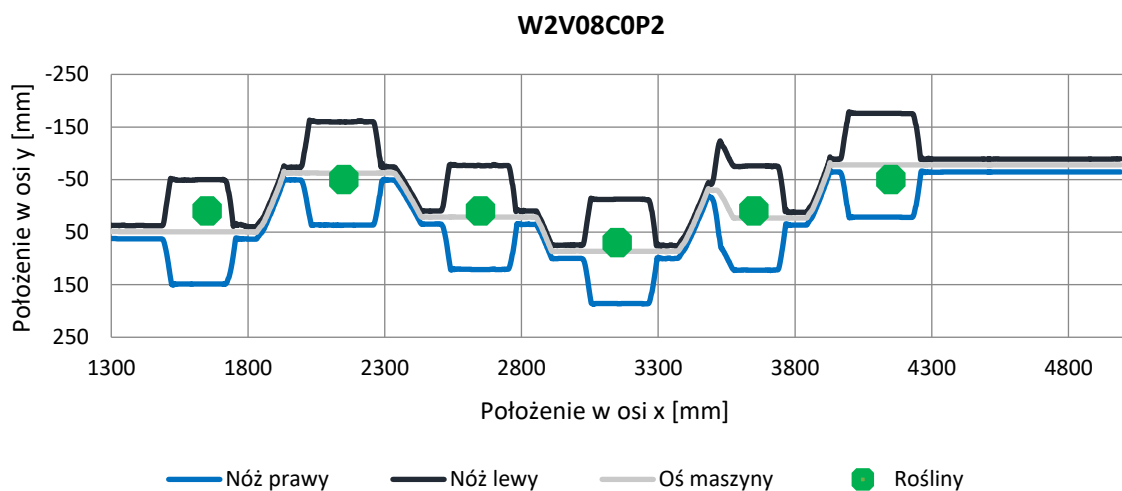
Po pogrupowaniu wyników pod kątem obecności chwastów okazało się, iż obecność chwastów nie wpływa negatywnie na poziom odwzorowanych ścieżek. Zarówno współczynnik korelacji Pearsona, jak i wartości błędów średniego absolutnego oraz standardowego osiągały korzystniejsze wartości. Gorszy natomiast jest wynik zniszczonych roślin, ponieważ zdarzenie zniszczenia rośliny miało miejsce w wariancie, w którym występowały chwasty. Zdarzenie zniszczenia rośliny mogło wynikać z wpływu obecności chwastu na działanie systemu, lecz biorąc pod uwagę sposób działania modelu sieci neuronowej i widoczność rośliny mimo obecności chwastu, wystąpienie tego zdarzenia miało charakter losowy, niezależny od obecności chwastów. Trajektorie ruchu noży w przypadku obecności chwastów oraz braku chwastów są podobne, co pokazuje jakość metody wykorzystania detekcji obiektów za pomocą sieci neuronowych w usuwaniu chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.

Dla wszystkich trzech prędkości roboczych, wynoszących 0,8 km/h, 1,0 km/h oraz 1,2 km/h, wyniki testu korelacji Pearsona, jak i wartości błędów osiągają wartości na podobnym poziomie. Oznacza to, iż w prędkość robocza zakresie 0,8 km/h do 1,2 km/h nie wpływa istotnie na jakość pracy urządzenia. Podczas badań przetestowano również wyższe prędkości robocze. W wyniku tych testów okazało się, iż przy prędkości roboczej powyżej 1,5 km/h występuje znaczące pogorszenie detekcji obiektów i niszczenie roślin. Wynika to z faktu rozmywania obrazu podczas wykonywania zdjęć w ruchu z powodu standardowego rodzaju migawki w zastosowanej kamerze, a co za tym idzie pogorszenia detekcji obiektów na rozmazanym zdjęciu. Istnieje wysokie prawdopodobieństwo, iż zastosowanie kamery specjalistycznej do wykonywania zdjęć w ruchu umożliwiłoby przejazdy z wyższymi prędkościami roboczymi.

13.4. Problem przesterowania mechanizmu przesuwu poprzecznego sekcji pielącej

System sterujący zakładał histerezę centralnego ustawienia roślin o szerokości 50 mm, po 25 mm w lewo oraz w prawo względem centralnego ustawienia roślin. Przy zmierzonym czasie reakcji przesuwu poprzecznego 70 ms oraz maksymalnym czasie opóźnienia wynikającego z prędkości działania programu na poziomie 25 ms (przy 40

klatkach na sekundę), zakładając prędkość maksymalną przesuwu poprzecznego równą 329 mm/s, przesuw w czasie 95 ms, wyniósłby 31,26 mm. Przy szerokości pasa histerezy 50 mm zjawisko przesterowania nie powinno nastąpić, nawet przy granicznej maksymalnej prędkości przesuwu poprzecznego, która ma miejsce przy maksymalnym wysunięciu siłownika hydraulicznego. Przykładowe zdarzenie przesterowania przedstawiono na rysunku 99.



Rysunek 99. Przejazd W2V08C0P2 (wariant 2, prędkość 0,8 km/h, brak chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego. Zjawisko przesterowania widoczne na pomiędzy 3400 mm, a 3700 mm w osi x.
 Źródło: Opracowanie własne.

Zjawisko wyraźnego przesterowania zaobserwowano tylko przy prędkości 0,8 km/h. Przez to, że przy prędkości 0,8 km/h gleba powodowała największy opór przesuwu poprzecznego sformułowano wniosek, iż przyczyną przesterowania są naprężenia skrętne działające na sekcję podczas przesuwu poprzecznego.

Podczas skręcania wspornika zawieszenia części roboczych lewej i prawej, oznaczonego numerem 4 (rys. 100), następuje również obrót kamery w kierunku skręcanym. W wyniku obrotu kamery, system sterujący widzi, iż roślina znajduje się w osi pomimo tego, iż mechanizm przesunięty jest za roślinę. Po powrocie elementu 4 do pozycji nominalnej, z punktu widzenia kamery roślina przestaje być osiowo, po czym następuje korekcja położenia poprzecznego w stronę przeciwną. Przypuszczenia o skręcaniu elementu oznaczonego numerem 4 potwierdziły również obserwacje zachowania sekcji przy manualnym przesuwaniu poprzecznym. Przekrój elementu 4 nie jest profilem zamkniętym, lecz ma przekrój zbliżony do dwuteownika, więc jest to błąd

konstrukcyjny. Zastąpienie go odpowiednio mniej podatnym na skręcanie przekrojem zamkniętym prawdopodobnie rozwiązałoby problem przesterowania przesuwu poprzecznego przy niskich prędkościach. Dodatkowo, charakter przegubowy mechanizmów sekcji pielącej i obecność pewnych luzów na połączeniach obrotowych może potęgować zjawisko skręcania się wspornika zawieszenia części roboczych.

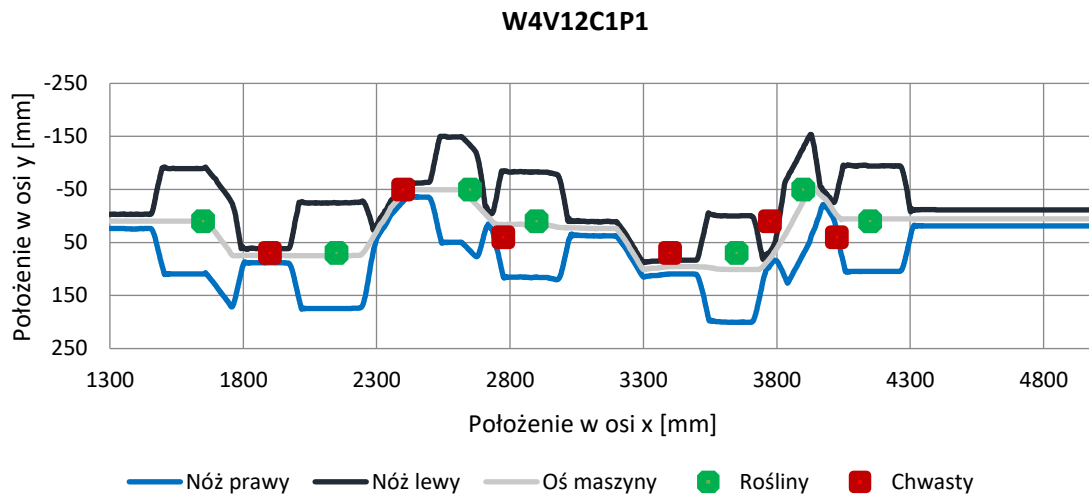


Rysunek 100. Naprężenie skrętne działające na sekcję podczas przesuwu poprzecznego. 1 – siła reakcji oporu gleby podczas przesuwu poprzecznego, 2 – siła przesuwu poprzecznego, 3 – moment skręcający wynikający z sił działających na konstrukcję, 4 – wspornika zawieszania części roboczych lewej i prawej podatny na skręcanie.
Źródło: Opracowanie własne.

13.5. Ocena jakości pracy sekcji pielącej

Badania na kanale glebowym miały również na celu sprawdzenie poziomu spełnienia wymagań agrotechnicznych dla sekcji roboczej pielnika pracującej w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin. Sprawdzone, czy możliwe jest skuteczne usuwanie chwastów w rzędach, w których pas rozrzutu poprzecznego roślin wynosi 120 mm, gdzie minimalna odległość pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie wynosi 300 mm. Co więcej sekcja robocza w wariantcie 4 testowana była dla trajektorii roślin, w której odległość pomiędzy roślinami wzdłuż kanału wynosiła 250 mm. Jest to wartość niższa, niż minimalna zakładaną odległość roślin (rys. 101). W takiej konfiguracji sekcja również niszczyła chwasty przez ruch noży dłutowych pomiędzy poszczególnymi roślinami.

Pomimo, iż noże przemieszczały się w bliskim sąsiedztwie roślin, nie zaobserwowano żadnego kontaktu ze sztuczną rośliną kapusty.



Rysunek 101. Przejazd W4V12C1P1 (wariant 4, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 1), trajektoria po przeliczeniach sygnałów z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego.

Źródło: Opracowanie własne.

Wariant 4 nie był w rzeczywistości możliwym rozkładem roślin, lecz miał na celu sprawdzenie granicznych możliwości sekcji pielącej. Analizując przejazd przedstawiony na rysunku 101, licząc od strony lewej roślina 5, 6 oraz 7 rozmieszczone są w odstępach 250 mm wzdłuż kanału glebowego. Dodatkowo ich ustawienia poprzeczne wynoszą kolejno 60, -60, 0. Pomiędzy rośliną nr 5 i 6 nastąpiło jednoczesne złożenie 120 mm ruchu poprzecznego z ruchem noży dłutowych, dzięki czemu uniknięto zniszczenia roślin.

Serie przejazdów w kanale glebowym we wszystkich wariantach pozwalają na sformułowanie tezy, iż opracowane rozwiązanie spełnia wymagania agrotechniczne, które przed nim postawiono. Średnia zniszczonych roślin ze wszystkich przejazdów wyniosła 0,22%, natomiast odsetek ominiętych chwastów wyniósł 1,85%. W literaturze, w ocenie pracy elementów pracujących w międzyrzędziach dopuszcza się do 2% uszkodzonych roślin oraz 95% zniszczonych chwastów w międzyrzędziach [81]. Podczas prób w kanale glebowym odsetek zniszczonych roślin był ponad 8-krotnie niższy, zaś odsetek zniszczonych chwastów w rzędzie wyniósł 98,15%. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że sekcja pielnika do zwalczania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin spełnia te wskaźniki jakości pracy pracując w rzędzie roślin.

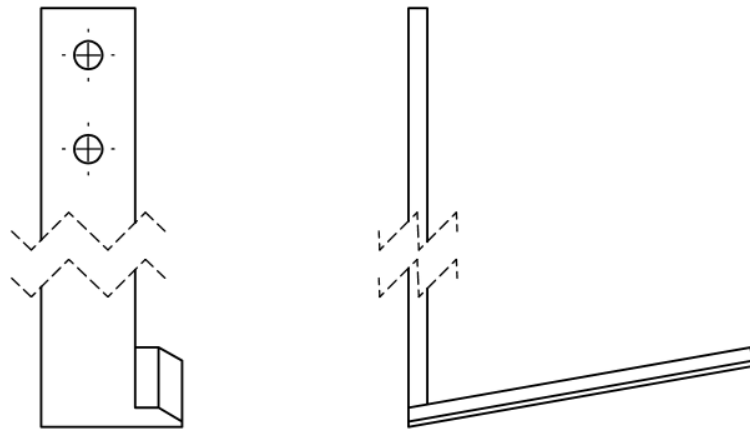
W porównaniu do rozwiązań bazujących na systemach wizyjnych i algorytmach głębokiego uczenia, opracowana sekcja pieląca wykazała porównywalnie wysoką skuteczność w eliminacji chwastów, osiągając 98,15% skuteczności usuwania w rzędzie przy jednoczesnym uszkodzeniu roślin na poziomie 0,22%. W badaniach Peteinatosy i in. [74], precyzja wykrywania chwastów wahała się od 77% do 98%, co wskazuje na dużą zależność skuteczności od jakości przetwarzania obrazu i warunków środowiskowych. Z kolei inteligentny pielnik opracowany przez Chang i in. [75] osiągnął skuteczność usuwania chwastów na poziomie 84–92% przy niższej prędkości roboczej (0,36-0,54 km/h), jednak przy jej wzroście do 0,72 km/h efektywność spadała do 64%, a uszkodzenia roślin rosły do 44,4%. W porównaniu z tym rozwiązaniem, testowana sekcja pieląca zapewnia wyższą skuteczność eliminacji chwastów niezależnie od prędkości roboczej w zakresie 0,8 – 1,2 km/h, przy minimalnym ryzyku uszkodzenia upraw. Ponadto, w systemie autorstwa Quan L. i in. [76], bazującym na platformie zrobotyzowanej, skuteczność wykrywania chwastów wyniosła 90,9%, co również plasuje się poniżej poziomu uzyskanego w przeprowadzonych badaniach.

13.6. Zastosowanie innego rodzaju noża pielącego niż nóż dłutowy

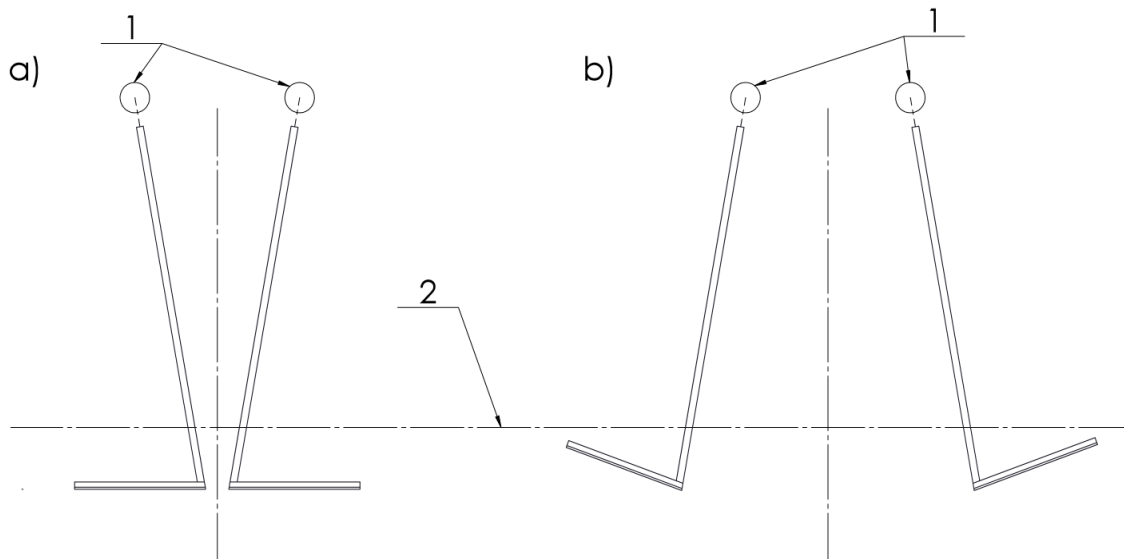
W opracowanym rozwiązaniu sekcji pielącej pracującej w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin zastosowane zostały noże dłutowe, które pracują w rzędach roślin. Zdecydowano się na takie rozwiązanie, ponieważ ich przekrój pozwala na precyzyjne rysowanie ścieżki trajektorii ruchu noży na glebie. Z powodu niewielkiej powierzchni działania noża na glebę, możliwa jest wizualna ocena trajektorii, po jakiej poruszały się noże podczas próby (rys. 94, 96, 98).

W badaniach, które opierały się na nożach dłutowych liczba zniszczonych roślin odnosiła się do sytuacji, w której noże pozostały w pozycji zwartej na szerokości rośliny lub doszło do fizycznego kontaktu z jej powierzchnią. Natomiast liczba pozostawionych chwastów oznacza przypadki, w których noże znajdowały się w pozycji rozwartej na szerokości chwastu, traktując go jako roślinę uprawną. Podczas przejazdu oznaczonego symbolem W2V12C1P2 (rys. 96) noże dłutowe pozostały zamknięte przy drugiej roślinie. W teorii roślina nie została uszkodzona, lecz w rzeczywistości, przy większej szerokości noży roślina zostałaby wycięta. Ponadto w sytuacji, gdyby pozycja chwastu odbiegała od osi następnej rośliny o wartość wyższą, niż szerokość noża dłutowego, chwast nie zostałby zniszczony. W zaproponowanym rozwiązaniu sekcji pielącej

możliwe jest zastosowanie innego rodzaju noży pielących, które charakteryzują się większym polem działania. Przy zastosowaniu koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” najlepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie noży kątowych w kształcie litery „L”, skierowanych prostopadłe do osi rzędu, w kierunku od osi rzędu. Zamontowanie prostopadłych noży kątowych typu „L” (rys. 102) pozwala na zwiększenie szerokości pola oddziaływania do wartości szerokości noża „L”. Rysunek 103 przedstawia zestaw noży kątowych „L” w pozycji zwartej i rozwartej.

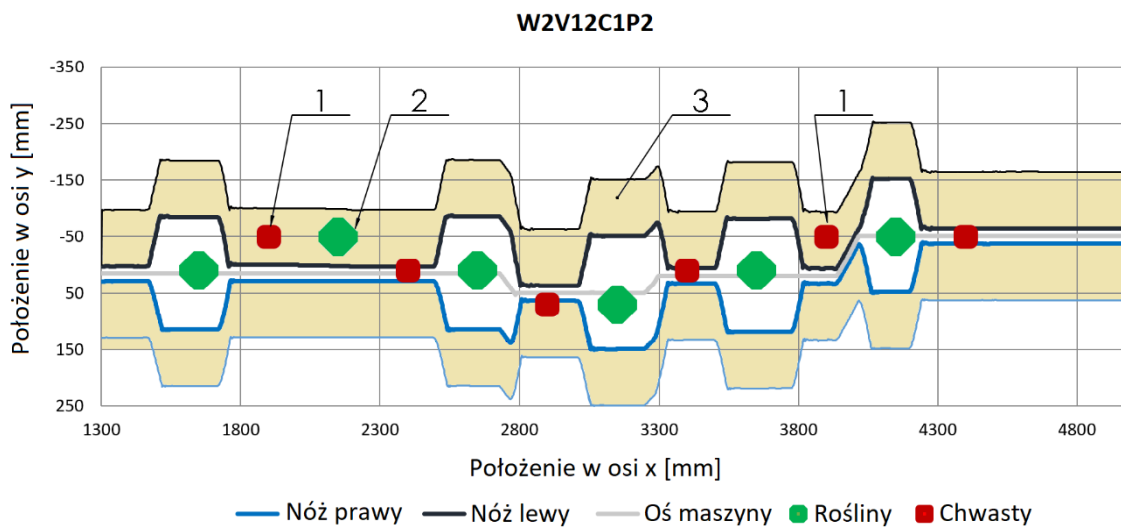


Rysunek 102. Nóż kątowy „L” zaproponowany do zastosowania w sekcji pielącej pracującej w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin.
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 103. Noże kątowne „L” w układzie wahadłowym, widok z przodu. a – pozycja zwarta, b – pozycja rozwarta, 1 – osie obrotu noży, 2 – poziom gleby.
Źródło: Opracowanie własne.

W zaproponowanym rozwiązaniu noża kąтового „L”, w pozycji zwartej, powierzchnia tnąca noża ustawiona jest w pozycji poziomej (rys. 103a). Niesie to za sobą konsekwencję nierównej głębokości pracy w przypadku ustawienia noży pielących w pozycji rozwartej (rys. 103b). Nie jest to jednak istotny problem, ponieważ w pozycji rozwartej noże pielące pracują w międzyrzędziu, które powinno być uprawiane przez niezależne zęby pracujące w międzyrzędziu. Pole oddziaływania noży kątowych „L” o szerokości noża wynoszącej 100 mm przedstawiono na rysunku 104.



Rysunek 104. Pola oddziaływania noży kątowych „L”, gdyby zastosowane zostały podczas próby W2V12C1P2 zamiast noży dłutowych. 1 – chwast, który nie został zniszczony przez nóż dłutowy, lecz zostałby zniszczony przez nóż kątowy „L”, 2 – roślina uprawiana, która nie została zniszczona przez nóż dłutowy, lecz zostałaby zniszczona przez nóż kątowy „L”, 3 – pole oddziaływania noży kątowych „L”.

Źródło: Opracowanie własne.

14. Podsumowanie i wnioski

Opracowana sekcja pieląca do niszczenia chwastów w uprawach o krzywoliniowych rzędach roślin była próbą rozwiązania problemu utylitarnego, którym jest efektywne zniszczenie chwastów, które znajdują się w rzędzie roślin, którego tor nie jest równoległy do rzędu sąsiedniego. W tym celu zaproponowano autorskie rozwiązanie problemu w postaci autorskiej koncepcji mechanizmu pielącego połączonego z autorskim systemem sterowania, który w przeciwieństwie do rozwiązań rynkowych jest oparty na konwolucyjnych sieciach neuronowych zamiast standardowych metod analizy obrazu. Na podstawie przeprowadzonych badań i dyskusji wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Na podstawie wyników badań postawiono wniosek, iż opracowane rozwiązanie może wypełnić lukę w technologii niechemicznego zwalczania chwastów w postaci usuwania chwastów w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin na poziomie wymań agrotechnicznych.
2. Wyniki przejazdów sekcji pielącej pokazują, że zakłócenia w postaci chwastów nie wpłynęły negatywnie na stopień odwzorowania modelowych trajektorii ruchu noży dłutowych. Przy obecności chwastów osiągnięto nawet wyższe współczynniki korelacji odwzorowania ścieżki modelowej dla noży dłutowych na poziomie 0,87 i 0,85 w porównaniu z brakiem chwastów, gdzie uzyskano wartości 0,84 oraz 0,84. Błędy bezwzględne i standardowe również osiągnęły niższe wartości przy obecności chwastów. Różnice są jednak niewielkie i można przyjąć, że wyniki przy obecności i braku chwastów były podobne. Przy obecnym rozwoju technologii i wzroście wydajności mikrokomputerów w zakresie sztucznej inteligencji, wykorzystanie detekcji obiektów za pomocą sieci neuronowych jest właściwym kierunkiem w rozwiązaniach mechanicznego zwalczania chwastów, ponieważ daje możliwość rozpoznania roślin i skuteczne odróżnienie ich od chwastów, na co nie pozwalają klasyczne metody detekcji obiektów oparte o algorytmiczną analizę obrazu.
3. Zastosowanie innego rodzaju noża pielącego niż dłutowy pozwoliłoby zwiększyć powierzchnię wycinania chwastów przez noże o ruchu wahadłowym. Zaproponowany nóż kątowy typu „L” o odpowiednio dobranej szerokości pozwoli pokryć całą powierzchnię pomiędzy roślinami w rzędzie.
4. Metoda „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” jest uniwersalną metodą do wyznaczania najlepszej trajektorii ruchu noży pielących o ruchu wahadłowym.

5. Model matematyczny mechanizmu jest rozwiązaniem pozwalającym na dynamiczne badanie parametrów geometrycznych i kinematycznych mechanizmu. Wykorzystanie równań modelu matematycznego oraz algorytmu koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin” pozwala wyznaczać trajektorie ruchu noży pielących dla dowolnych parametrów kinematycznych i geometrycznych mechanizmu, dla dowolnego położenia roślin.
6. Czasy reakcji elementów roboczych, takich jak ruch wahadłowy noży dłutowych oraz przesuw poprzeczny charakteryzują się wysoką powtarzalnością (maksymalne różnice na poziomie 10 ms przy próbkowaniu systemu rejestracji danych 5 ms) i niskim odchyleniem standardowym średnich opóźnień na poziomie poniżej 2 ms, co umożliwia skuteczne uwzględnienie tych czasów w opóźnieniach komend ruchu wahadłowego noży dłutowych bądź przesuwu poprzecznego.
7. Zdarzenia omijania chwastów oraz zniszczenia rośliny pokazują, iż trening sieci neuronowej do rozpoznawania kapusty i odróżniania jej od chwastów mógł być niedostateczny. Należy rozważyć powiększenie zbioru danych oraz zwiększenie liczby iteracji treningu.
8. Zautomatyzowanym sposobem na zwiększenie zbioru danych mogłaby być akwizycja zdjęć podczas pracy systemu, na przykład wykonywanie zdjęcia i zapisywanie go co określony czas np. 10 s. Takie zdjęcia są bardzo dobrym źródłem do przygotowania zbioru danych, ponieważ pokazują rzeczywistą perspektywę widzenia maszynowego.
9. Przy zastosowaniu kamery do filmowania w ruchu, z migawką typu „Global Shutter” prawdopodobnie możliwe byłoby osiągnięcie wyższych prędkości roboczych. W obecnym rozwiązaniu bazującym na kamerze ze standardową migawką prędkości wyższe, niż 1,5 km/h powodowały rozmazywanie obrazu i nieefektywną detekcję.
10. Prototyp koncepcji sekcji pielącej posiadał wadę konstrukcyjną polegającą na niedostatecznej sztywności wspornika zawieszenia części roboczych. Powodowało to zmianę perspektywy widoku kamery podczas przesuwu bocznego przy niskiej prędkości i zwiększonym oporze gleby, co przyczyniało się do zakłóceń odczytu rzeczywistego położenia sekcji pielącej i mniej precyzyjne sterowanie, a w najgorszym wypadku prowadziło do przesterowania przesuwu poprzecznego. Przekonstruowanie wspornika zawieszenia części roboczych tak, by był mniej podatny na skręcanie przekrojem zamkniętym powinno zminimalizować zjawisko przesterowania przesuwu poprzecznego.

15. Spis literatury

- [1] European Commission Representation in Poland, „Ład ekologiczny”, [Online]. Dostępny: https://poland.representation.ec.europa.eu/news/lad-ekologiczny-2021-03-25_pl [Dostęp: 12 kwietnia 2024 r.].
- [2] Producent maszyn APV, [Online]. Dostępny: <https://www.apv-polska.pl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [3] Producent maszyn Lemken, [Online]. Dostępny: <https://www.lemken.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [4] Producent maszyn Mazotti, [Online]. Dostępny: <https://www.mazotti.it> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [5] Producent maszyn Schmotzer, [Online]. Dostępny: <https://www.schmotzer.de> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [6] Producent maszyn Kongskilde, [Online]. Dostępny: <https://www.kongskilde.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [7] Producent maszyn Struik Holland, [Online]. Dostępny: <https://www.struikholland.nl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [8] A. Dobrzański i K. Adamczewski, „Niechemiczne metody zwalczania chwastów. Stan obecny i perspektywy”, Instytut Ochrony Roślin, Poznań, 2009.
- [9] J. Rabcewicz i P. Wawrzyniak, „Wpływ głębokości roboczej chwastowników na efektywność niszczenia chwastów w sadach”, w *Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa, XXXV lat Wydziału Inżynierii Produkcji Akademii Rolniczej w Lublinie, Problemy Inżynierii Rolniczej w Aspekcie Rolnictwa Zrównoważonego*, Lublin, 2005.
- [10] A. Lisowski i in., „Duckfoot tools connected with flexible and stiff tines: Three components of resistances and soil disturbance”, *Soil & Tillage Research*, pp. 76-90, 2016.
- [11] K. Słowiński i J. Walczyk, „Analiza oporów roboczych maszyn szkółkarskich na przykładzie pielnika”, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, vol. 486, pp. 155-160, 2002.
- [12] H. Bernacki, *Teoria konstrukcja maszyn rolniczych Tom I, Część I i II*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1981.

- [13] Producent maszyn Bomet, [Online]. Dostępny: <https://www.bomet.pl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [14] Producent maszyn Kult-Kress, [Online]. Dostępny: <https://www.kult-kress.de> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [15] Producent maszyn Tilmor, [Online]. Dostępny: <https://www.tilmor.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [16] D. C. Cloutier i in., „Non-chemical weed management: principles, concepts and technology”, pod red. M. K. Upadhyaya i R. E. Blackshaw, Wallingford: Cabi, 2007.
- [17] J. K. Kouwenhoven, „Intra-row mechanical weed control—possibilities and problems”, *Soil & Tillage Research*, vol. 41, pp. 87-104, 1997.
- [18] Producent maszyn Bednar, [Online]. Dostępny: <https://www.bednar.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [19] J. Machleb i in., „Sensor-Based Intrarow Mechanical Weed Control in Sugar Beets with Motorized Finger Weeders”, *Agronomy*, vol. 11, no. 8, p. 1517, 2021.
- [20] Producent maszyn Johnny Seeds, [Online]. Dostępny: <https://www.johnnyseeds.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [21] A. Peruzzi i in., „Physical weed control in organic carrots in the Fucino Valley”, w *Proceedings of 13th EWRS Symposium*, Bari, 2005.
- [22] Producent maszyn Einböck, [Online]. Dostępny: <https://www.einboeck.at> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [23] K. Lejman, „Opory skrawania gleby narzędziami o kształcie klina prostego i symetrycznego klina ukośnego”, *Inżynieria Rolnicza*, vol. 3, no. 63, pp. 279-288, 2005.
- [24] K. Lejman, „Siły pionowe działające na narzędzia o kształcie klina prostego i symetrycznego klina ukośnego”, *Inżynieria Rolnicza*, vol. 3, no. 78, pp. 233–239, 2006.
- [25] K. Lejman, „Wpływ zwięzłości gleby na wartości sił pionowych działających na narzędzia kultywacyjne”, *Inżynieria Rolnicza*, vol. 5, no. 103, pp. 51–57, 2008.
- [26] M. Fríd i in., „The effect of working conditions on the selected parameters of duckfoot shares”, *Research in Agricultural Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 66–74, 2004.
- [27] Y. Chen i in., „A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils”, *Soil and Tillage Research*, vol. 126, pp. 34–41, 2013.

- [28] Z. Owsiak i in., „Wpływ zmienności głębokości pracy narzędzia na opory skrawania gleby", *Inżynieria Rolnicza*, vol. 4, no. 79, pp. 45–53, 2006.
- [29] U. A. Rosa i D. Wulfsohn, „Soil bin monorail for high-speed testing of narrow tillage tools", *Biosystems Engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 444–454, 2008.
- [30] T. Nowakowski i in., „Impact of technical parameters on the horizontal resistance component when slicing soil with a duckfoot share", *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Agriculture*, no. 65, pp. 5-13, 2015.
- [31] R. L. Kushwaha i C. Linke, „Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds", *Soil and Tillage Research*, vol. 39, no. 1-2, pp. 61-73, 1996.
- [32] R. L. Kushwaha i J. Shen, „Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool", *Transactions of the ASAE*, pp. 1315–1319, 1995.
- [33] U. A. Rosa, „Performance of narrow tillage tools with inertial and strain rate effects", Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada, 1997.
- [34] R. L. Kushwaha i Z. X. Zhang, „Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools", *Journal of Terramechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 69–86, 1998.
- [35] K. Sharifat, „Soil Translocation with Tillage Tools", Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada, 1999.
- [36] H. M. Hanna, R. G. Hartzler i D. C. Erbach, „High-speed cultivation and banding for weed management in no-till corn", *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, pp. 359–365, 2000.
- [37] H. G. Sogaard, „Evaluation of the accuracy of a laser optic position determination system", *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 74, pp. 275-280, 1999.
- [38] R. Freimann i F. Sterlemann, „Autonomous, off-road vehicle navigation and implement control system, using DGPS and initial backup", w *International Conference on Agricultural Engineering-AgEng, part 1*, Warwick, 2000.
- [39] T. S. Stombaugh, E. R. Benson i J. W. Hummel, „Guidance control of agricultural vehicles at high field speeds", *Transactions of the ASAE*, vol. 42, no. 2, pp. 537-544, 1999.
- [40] R. Gerhards i S. Christensen, „Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley", *Weed Research*, vol. 43, pp. 385-392, 2003.

- [41] U. Klee, L. Hofmann i P. Pickel, „Safety aspects for automatic guidance of agricultural machines and low-cost solutions”, *Research in Agricultural Engineering*, vol. 49, no. 3, pp. 103-109, 2003.
- [42] B. Åstrand i A. J. Baerveldt, „A vision-based row-following system for agricultural field machinery”, *Mechatronics*, vol. 15, no. 2, pp. 251–269, 2005.
- [43] M. Pérez-Ruiz, D. C. Slaughter, C. J. Gliever i S. K. Upadhyaya, „Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 80, pp. 41–49, 2012.
- [44] J. M. Guerrero i in., „Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields”, *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 656-664, 2013.
- [45] Cz. Waszkiewicz i A. Trzciniński, „Badania porównawcze pielnika aktywnego i biernego”, *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, vol. 6, pp. 5–6, 1996.
- [46] Producent maszyn MCMS, [Online]. Dostępny: <https://www.mcms.pl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [47] Producent maszyn Jagoda, [Online]. Dostępny: <https://www.jagoda.com.pl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [48] Producent maszyn Demetra Agri, [Online]. Dostępny: <https://www.demetraagri.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [49] Producent maszyn Fobro Mobil, [Online]. Dostępny: <https://www.fobromobil.com/de/project/hackbuerste> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [50] Producent maszyn Agromod, [Online]. Dostępny: <https://www.agromod.pl> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [51] J. Rabcewicz, „Rola precyzyjnej i bezpiecznej techniki ochrony roślin w podnoszeniu innowacyjności polskiego rolnictwa”, w *Niechemiczne metody zwalczania chwastów*, Nieborów, 2009.
- [52] W. Neuerburg i S. Padel, *Rolnictwo ekologiczne w praktyce*, Warszawa: Stowarzyszenie EKOLAND Stiftung LEBEN & UMWELT, 1994.
- [53] Z. Zbytek, „Ekspertyza. Niemechaniczne (mechaniczne) metody zwalczania chwastów dla produkcji ekologicznej”, PIMR, Poznań, 2009.
- [54] S. Buchowski, „Opielanie, obredlanie, szczotkowanie”, *Wiadomości Rolnicze*, vol. 6, no. 58, p. 15, 2009.

- [55] Producent maszyn Agrocom Polska, [Online]. Dostępny: <https://www.agrocompolska.pl>. [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [56] Producent maszyn Steketee, [Online]. Dostępny: <https://www.steketee.com> [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [57] V. Rueda-Ayala, J. Rasmussen i R. Gerhards, „Mechanical weed control”, w *Precision crop protection – the challenge and use of heterogeneity*, pp. 279-294, 2010.
- [58] A. Cavalieri, S. Janssen, A. Smithson i T. Buisman, „Economic viability of weeding strategies in organically grown sugar beets”, KVL The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark, 2001.
- [59] H. W. Griepentrog, T. Gulhom-Hansen i J. Nielsen, „First field results from intra-row rotor weeding”, w *Proceedings of the 7th European Weed Research Society Workshop on Physical and Cultural Weed Control*, Salem, 2007.
- [60] A. P. Dedousis, „An investigation into the design of precision weeding mechanisms for inter or intra-row weed control”, Ph.D. dissertation, Cranfield University, Cranfield, 2007.
- [61] N. D. Tillett, T. Haguea, A. C. Grundyb i A. P. Dedousis, „Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision”, *Biosystems Engineering*, vol. 99, pp. 171–178, 2008.
- [62] Producent maszyn Garford, [Online]. Dostępny: <https://www.garford.com>. [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [63] D. C. Slaughter, M. Perez-Ruiz, F. Fathallah i F. Upadhyaya, „GPS-based intra-row weed control system: performance and labor savings”, w *International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng*, Valencia, 2012.
- [64] G. Zaborowski i P. Schulze Lammers, „Prototype of a rotary hoe for intra-row weeding”, w *12th IFToMM World Congress*, Besançon, 2007.
- [65] Producent maszyn Vision Weeding, [Online]. Dostępny: www.visionweeding.com [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [66] S. Z. Knezevic, S. Fennimore i A. Datta, „Thermal Weed Control”, w *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 2nd ed., Academic Press, 2017.
- [67] A. M. Peerzada i B. S. Chauhan, „Chapter 2 - Thermal Weed Control: History, Mechanisms, and Impacts”, w *Weed Control*, Academic Press, 2018, pp. 9-31.

- [68] A. Upadhyay, K. P. Singh, K. B. Jhala, M. Kumar i A. Salem, „Non-chemical weed management: Harnessing flame weeding for effective weed control", *Heliyon*, 2024.
- [69] Flame Engineering, [Online]. Dostępny: www.flameengineering.com [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [70] Producent maszyn AgXtend, [Online]. Dostępny: www.agxtend.com [Dostęp: 9 września 2024 r.].
- [71] M. J. Slaven, M. Koch i C. P. D. Borger, „Exploring the potential of electric weed control: a review", *Weed Science*, vol. 71, no. 5, pp. 403-421, 2023.
- [72] M. Zawada, S. Legutko, J. Gościańska-Łowińska, S. Szymczyk, M. Nijak, J. Wojciechowski i M. Zwierzyński, „Mechanical Weed Control Systems: Methods and Effectiveness", *Sustainability*, vol. 15, no. 21, p. 15206, 2023.
- [73] M. Darbyshire, S. Coutts, P. Bosilj, E. Sklar i S. Parsons, „Review of weed recognition: A global agriculture perspective", *Computers and Electronics in Agriculture*, p. 109499, 2024.
- [74] G. G. Peteinatos, P. Reichel, J. Karouta, D. Andújar i R. Gerhards, „Weed identification in maize, sunflower, and potatoes with the aid of convolutional neural networks", *Remote Sensing*, vol. 12, no. 24, p. 4185, 2020.
- [75] C. L. Chang, B. X. Xie i S. C. Chung, „Mechanical control with a deep learning method for precise weeding on a farm", *Agriculture*, vol. 11, no. 11, p. 1049, 2021.
- [76] L. Quan, W. Jiang, H. Li, Q. Wang i L. Chen, „Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode", *Biosystems Engineering*, vol. 216, pp. 13-31, 2022.
- [77] J. Kuczewski i Cz. Waszkiewicz, *Mechanizacja rolnictwa: maszyny i urządzenia do produkcji roślinnej i zwierzęcej*, Warszawa: Wydawnictwo SGGW, 1997.
- [78] M. Mazański i Z. Wójcicki, *Maszyny rolnicze*, Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1976.
- [79] W. Gruchalski, *Zarys eksploatacji ciągników i maszyn rolniczych*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1967.
- [80] S. Dąbrowski i D. Kozłowska, *Maszyny i ciągniki rolnicze*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1981.
- [81] W. Drejerski, *System maszyn rolniczych, cz. 9*, Warszawa: IBMER, 1982.

- [82] K. Kulpa, „Mechanizm sekcji roboczej pielnika rządowego”, Polska, Patent PL 242821 B1, 2 maja 2023 r.
- [83] Vision Platform AI, „Kompletny przewodnik po wykrywaniu obiektów”, [Online]. Dostępny: <https://www.visionplatform.ai/pl/kompletny-przewodnik-po-wykrywaniu-obiektow-wprowadzenie-do-wykrywania-w-2024-roku> [Dostęp: 9 lutego 2025 r.].
- [84] Sklep internetowy Botland, [Online]. Dostępny: www.botland.com.pl [Dostęp: 9 lutego 2025 r.].
- [85] Dokumentacja TensorFlow Lite, [Online]. Dostępny: www.tensorflow.org/lite [Dostęp: 22 stycznia 2024 r.].
- [86] Olle Welin, „Object-detection-Dataset-Crop-Weed2”, GitHub, [Online]. Dostępny: <https://github.com/ollewelin/Object-detection-Dataset-Crop-Weed2>. [Dostęp: 29 maj 2022 r.].
- [87] Oprogramowanie LabelImg, [Online]. Dostępny: <https://github.com/HumanSignal/labelImg>. [Dostęp: 9 lutego 2025 r.].
- [88] NVIDIA, „Get Started with Jetson Xavier NX Devkit”, [Online]. Dostępny: www.developer.nvidia.com/embedded/learn/get-started-jetson-xavier-nx-devkit [Dostęp: 12 marca 2024 r.].
- [89] NVIDIA, „TensorRT”, [Online]. Dostępny: www.developer.nvidia.com/tensorrt [Dostęp: 28 maja 2023 r.].
- [90] Oprogramowanie SolidWorks, [Online]. Dostępny: www.solidworks.pl [Dostęp: 28 maja 2023 r.].
- [91] Sklep internetowy Kamami, [Online]. Dostępny: www.kamami.pl [Dostęp: 18 sierpnia 2023 r.].
- [92] Sklep internetowy PNEUMATICS, [Online]. Dostępny: www.pneumatics.pl [Dostęp: 18 lutego 2024 r.].
- [93] Sklep internetowy Mizar, [Online]. Dostępny: www.sklep.mizar.com.pl [Dostęp: 18 sierpnia 2024 r.].
- [94] V. Belton i T. J. Stewart, *Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach*, Nowy Jork: Springer New York, 2012.
- [95] Microsoft, „WinForms Overview”, [Online]. Dostępny: www.learn.microsoft.com/pl-pl/dotnet/desktop/winforms/overview [Dostęp: 22 stycznia 2025 r.].

[96] J. Buliński, J. Klonowski i L. Sergiel, „Wykorzystanie kanału glebowego do badań zespołów roboczych narzędzi i mechanizmów jezdnych”, *Inżynieria Rolnicza*, vol. 14, no. 1, pp. 93-98, 2010.

[97] PN-ISO 11465:1999, „Jakość gleby. Oznaczanie zawartości suchej masy gleby i wody w glebie przeliczeniu na suchą masę gleby. Metoda wagowa”.

[98] Producent urządzeń National Instruments, [Online]. Dostępny: www.ni.com [Dostęp: 9 września 2024 r.].

[99] Sklep internetowy EBMiA, [Online]. Dostępny: www.ebmia.pl [Dostęp: 9 września 2024 r.].

16. Spis rysunków i tabel

Rysunek 1. Zasada działania układu równoległoboku przegubowego w warunkach nierównomierności terenu	14
Rysunek 2. Systemy zawieszenia pielników na ciągniku	15
Rysunek 3. Mechaniczna regulacja głębokości pracy	15
Rysunek 4. Parametry gęsiostopki stosowanej w uprawie międzyrzędowej	17
Rysunek 5. Noże kątowe	18
Rysunek 6. Sekcja pielnika Bomet Nembus	19
Rysunek 7. Pielniki obrotowe o poziomej osi obrotu	20
Rysunek 8. Elementy doprawiające stosowane w uprawie międzyrzędowej	20
Rysunek 9. Gwiazdy palcowe doprawiające glebę w rzędzie roślin.	21
Rysunek 10. Palce pielnika torsyjnego.	22
Rysunek 11. Pielnik o pionowej osi obrotu	24
Rysunek 12. Pielnik o poziomej osi obrotu	25
Rysunek 13. Pielnik szczotkowy o poziomej osi obrotu	26
Rysunek 14. Systemy kierowania pielnikiem	27
Rysunek 15. Systemy kierowania pielnikiem	28
Rysunek 16. Automatyczne systemy prowadzenia pielników	29
Rysunek 17. Pielniki o cykloidalnym ruchu narzędzia	31
Rysunek 18. Nożycowy element roboczy	31
Rysunek 19. System pielenie pomiędzy roślinami w oparciu o mapę GPS	32
Rysunek 20. Pielnik z mechanizmem z obrotową motyką firmy Poulsen APS	32
Rysunek 21. Pielnik płomieniowy Row Crop Flamer	33
Rysunek 22. Urządzenie XPOWER	34
Rysunek 23. Przykładowe ułożenie gęsiostopek oraz noży pielących dla rozstawu rzędów 70 cm	42
Rysunek 24. Odchylenia w położeniach roślin oraz wynikające ze sprężystości koła ciągnika	43
Rysunek 25. Założenia stawiane przed sekcją roboczą pielnika do krzywoliniowych i nierównoległych rzędów roślin	44
Rysunek 26. Autorska koncepcja mechanizmu sekcji roboczej	48
Rysunek 27. Schemat mechanizmu sekcji roboczej pielnika w 3 rzutach	49

Rysunek 28. Kąty w trójkącie $EE'F$	51
Rysunek 29. Kąty w trójkącie $Y1U1W1$	53
Rysunek 30. Wizualizacja wybranych elementów kinematycznych mechanizmu dla współczynników $a = 0,8$; $b = 1,2$; $h = 100 \text{ mm}$	58
Rysunek 31. Wizualizacja wybranych elementów kinematycznych mechanizmu dla współczynników $a = 1,2$; $b = 1$; $h = -100 \text{ mm}$	59
Rysunek 32. Zależność wartości poszczególnych kątów mechanizmu w zależności od wartości współczynników a i b	62
Rysunek 33. Zależność zmian długości boków czworoboków przegubowych $ABCD$ i oraz mechanizmu dźwigniowego $W1U1Y1$ od współczynników a i b	62
Rysunek 34. Przesunięcie części roboczej sekcji pielnika w kierunku wzdłużnym Δx oraz poprzecznym Δy w zależności od współczynnika wysunięcia tłoka	63
Rysunek 35. Przesunięcie wzdłużne części roboczej sekcji pielnika w zależności od zmiany wysokości terenu h	63
Rysunek 36. Prędkość kątowna punktu C będącego końcem ramienia wahliwego czworoboku przegubowego $ABCD$ w funkcji wartości współczynnika a	64
Rysunek 37. Prędkość kątowna końców noży dłutowych $T1$ oraz $T2$ w funkcji wartości współczynnika b	64
Rysunek 38. Prędkości liniowe punktu C w zależności od wartości współczynnika a	65
Rysunek 39. Prędkości liniowe punktu końców noży dłutowych $T1$ oraz $T2$ w zależności od wartości współczynnika b	65
Rysunek 40. Wartość składowej x promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego $T1$ w zależności od współczynników b oraz h	67
Rysunek 41. Wartość składowej y promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego $T1$ w zależności od współczynników a i b	68
Rysunek 42. Wartość składowej z promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego $T1$ w zależności od współczynników a i b	68
Rysunek 43. Wykresy bezwzględnych wartości długości promienia wodzącego od punktu D do końca noża dłutowego $T1$ w zależności od parametrów a i b dla wartości h_{max} , h_0 i h_{min}	69
Rysunek 44. Wykres zmian położenia poprzecznych części roboczej sekcji pielającej przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ i $W2Y2$ i stałym położeniu siłownika FE	70

Rysunek 45. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej $vt1$	70
Rysunek 46. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej $vt2$	71
Rysunek 47. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i stałym położeniu siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej $vt3$	71
Rysunek 48. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej $vt1$	72
Rysunek 49. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej $vt2$	72
Rysunek 50. Wykres zmian położenia końców noży dłutowych $T1$ i $T2$ przy ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłowników $W1Y1$ oraz $W2Y2$ i ciągłym ruchu posuwisto-zwrotnym siłownika FE dla prędkości jazdy sekcji pielącej v	73
Rysunek 51. Proces opracowania gotowego modelu sieci neuronowej do rozpoznawania roślin	76
Rysunek 52. Przykłady zdjęć rzepy pozyskanych z repozytorium GitHub	77
Rysunek 53. Oznaczanie zdjęć w oprogramowaniu LabelMG	78
Rysunek 54. Przykładowa zawartość pliku XML zawierająca definicje obiektów na zdjęciu w formacie Pascal VOC	78
Rysunek 55. Przykładowa zawartość zbiorczego pliku CSV z definicjami obiektów	79
Rysunek 56. Podgląd treningu modelu SSD Mobilenet v2 na zbiorze zdjęć rzepy	79
Rysunek 57. Wyniki detekcji obiektów na zbiorze testowym po wykonaniu 20k kroków treningu modelu SSD	80
Rysunek 58. Przykładowa klatka filmu video używanego do testów wydajnościowych	81
Rysunek 59. Detekcja obiektów przeprowadzana podczas testów wydajnościowych	82
Rysunek 60. Optymalizacja modelu Tensorflow do modelu TensorRT wspieranego przez platformę NVIDIA	83
Rysunek 61. Model geometryczny sekcji roboczej pielnika	85

Rysunek 62. Dobór elementów automatyki	87
Rysunek 63. Schemat ideowy układu sterowania	88
Rysunek 64. Prace przy etapie 3 budowy sekcji roboczej	89
Rysunek 65. Koncepcja „Stycznych do stref bezpieczeństwa roślin”	90
Rysunek 66. Koncepcja „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”	91
Rysunek 67. Porównanie drogi złożonych noży w koncepcjach przy prędkości roboczej wynoszącej 0,5 m/s	93
Rysunek 68. Trajektoria ruchu przy błędzie ustawienia osiowego δ	93
Rysunek 69. Schemat blokowy wyznaczania trajektorii ruchu noży sekcji pielącej w koncepcji „Wyłączonych stref bezpieczeństwa roślin”	96
Rysunek 70. Program obliczający trajektorię noży sekcji pielącej dla zadanych parametrów mechanizmu, zadanego położenia startowego sekcji pielącej oraz zadanego rozkładu roślin	98
Rysunek 71. Część I schematu blokowego algorytmu sterowania	100
Rysunek 72. Część II schematu blokowego algorytmu sterowania	101
Rysunek 73. Część III schematu blokowego algorytmu sterowania	102
Rysunek 74. Widok z perspektywy kamery programu sterującego	103
Rysunek 75. Film symulujący przemieszczania się wzdłuż rzędów roślin	104
Rysunek 76. Symulacja działania oprogramowania	105
Rysunek 77. Matryca ustawień roślin z zaznaczonymi pozycjami chwastów w przypadku rzędów roślin zakłóconych chwastami	108
Rysunek 78. Oznaczanie miejsc na rośliny i chwasty na kanale glebowym	109
Rysunek 79. Elementy do tworzenia torów roślin i chwastów w kanale glebowym	109
Rysunek 80. Rozkład roślin i chwastów dla wariantu 3	109
Rysunek 81. Elementy systemu rejestracji sygnałów	111
Rysunek 82. Schemat struktury opracowanej w Labview dla modułu myRIO-1900 umożliwiającej pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych	112
Rysunek 83. Schemat struktury opracowanej w LabView Real-Time Module dla modułu myRIO-1900 umożliwiający pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych	115
Rysunek 84. Schemat interfejsu użytkownika struktury opracowanej w Labview Real-Time Module dla modułu myRIO-1900 umożliwiającej pomiar wartości chwilowych położenia 6 enkoderów i 4 stanów bitowych	117

Rysunek 85. Ustawienie noży dłutowych stycznie do pierwszej rośliny w osi x i centralnie do rośliny w osi y w celu odczytu odsunięć	118
Rysunek 86. Wykrycie rośliny przez system i ocena jej położenia poprzecznego	120
Rysunek 87. Wykonanie przesuwu poprzecznego części roboczej sekcji pielącej	121
Rysunek 88. Wykrycie przekroczenia przez roślinę górnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych	122
Rysunek 89. Wykrycie przekroczenia przez roślinę dolnej linii bramki wywoływania ruchu noży dłutowych	123
Rysunek 90. Wykres zmian położenia siłownika hydraulicznego w stosunku do wystąpienia sygnału sterującego przekaźnikiem przesuwu w funkcji czasu	124
Rysunek 91. Wykres zmian położenia siłowników pneumatycznych w stosunku do wystąpienia sygnału sterującego przekaźnikiem ruchu noży dłutowych w funkcji czasu	125
Rysunek 92. Trajektoria po przeliczeniach sygnałów z uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego dla próby W2V10C1P3 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 3)	128
Rysunek 93. Wariant W2V10C1 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów), trajektoria wygenerowana przez autorski program komputerowy wykorzystujący model matematyczny	129
Rysunek 94. Przejazd W2V10C1P3 (wariant 2, prędkość 1 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 3), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe	129
Rysunek 95. Przejazd W2V12C1P2 (wariant 2, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego	133
Rysunek 96. Przejazd W2V12C1P2 (wariant 2, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe	134
Rysunek 97. Przejazd W3V12C1P2 (wariant 3, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów uzyskanych z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego	134
Rysunek 98. Przejazd W3V12C1P2 (wariant 3, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 2), zdjęcie powierzchni gleby po wykonanym przejeździe	135

Rysunek 99. Przejazd W2V08C0P2 (wariant 2, prędkość 0,8 km/h, brak chwastów, powtórzenie 2), trajektoria po przeliczeniach sygnałów z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego	139
Rysunek 100. Naprężenie skrętne działające na sekcję podczas przesuwu poprzecznego	140
Rysunek 101. Przejazd W4V12C1P1 (wariant 4, prędkość 1,2 km/h, obecność chwastów, powtórzenie 1), trajektoria po przeliczeniach sygnałów z enkoderów po wykorzystaniu modelu matematycznego	141
Rysunek 102. Nóż kątowy „L” zaproponowany do zastosowania w sekcji pielącej pracującej w krzywoliniowych i nierównoległych rzędach roślin	143
Rysunek 103. Noże kątowe „L” w układzie wahadłowym, widok z przodu	143
Rysunek 104. Pola oddziaływania noży kątowych „L”, gdyby zastosowane zostały podczas próby W2V12C1P2 zamiast noży dłutowych	144
Tabela 1. Porównanie wydajności Jetson Nano oraz Jetson Xavier NX	82
Tabela 2. Porównanie wydajności w detekcji obiektów w wybranych rozwiązaniach po przeprowadzeniu autorskiego benchmarku	84
Tabela 3. Kryteria oceny koncepcji	94
Tabela 4. Ocena koncepcji trajektorii ruchu noży dłutowych	94
Tabela 5. Porównanie wariantów koncepcji pod kątem spełniania kryteriów	95
Tabela 6. Matryca ustawień roślin z zaznaczonymi pozycjami chwastów	107
Tabela 7. Czasy reakcji wywoływania i zatrzymywania ruchu poprzecznego	125
Tabela 8. Czasy poszczególnych reakcji ruchu zwarcia i rozwarcia noży wahliwych	126
Tabela 9. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej cz. 1	131
Tabela 10. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej cz. 2	132
Tabela 11. Przejazdy robocze oraz miary odwzorowania korelacji modelowej grupowane po poszczególnych kryteriach	133

Załącznik 1

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 242821 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **437195**

(22) Data zgłoszenia: **2021.03.04**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2022.09.05 BUP 36/2022**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2023.05.02 WUP 18/2023**

(51) MKP:

A01M 21/02 (2006.01)

A01M 21/00 (2006.01)

A01B 39/18 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA
WIEJSKIEGO W WARSZAWIE, Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

KRZYSZTOF KULPA, Białystok, PL

(74) Pełnomocnik:

Andrzej Witek, Wrocław, PL

(54) Tytuł:

Mechanizm sekcji roboczej pielnika rządowego

PL 242821 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem patentu jest mechanizm sekcji roboczej pielnika rzędowego pozwalający na prowadzenie narzędzia wzdłuż krzywoliniowych, nierównoległych rzędów roślin oraz niszczenia chwastów pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie.

Do pielęgnacji upraw międzyrzędowych stosuje się pielniki zawieszane na trójpunktowym układzie zawieszenia, przyczepiane, a także transportowane na kołach wydźwigowych. Najczęściej składają się one z ramy sztywnej bądź składanej, na której zamocowane są sekcje robocze z odpowiednimi narzędziami. Mogą być to zęby sprężyste, półsprężyste bądź stałe, zakończone odpowiednimi redlicami, a także różnego rodzaju przyrządy doprawiające takie jak zgrzebła, koła gwieździste, czy wałki umożliwiający strunowe. Pielniki opcjonalnie wyposażane są w podsiewacz nawozów lub dozownik środków ochrony roślin. Narzędzia sekcji roboczych połączone są w płaszczyźnie pionowej z ramą za pomocą czworoboku przegubowego, co umożliwia im równoległe przemieszczanie się w pionie. Dzięki temu narzędzie działa na glebę pod jednakowym kątem skrawania w przypadku wystąpienia nierówności terenu.

Poszczególne rzędy roślin nie są nigdy idealnie równoległe. Z jednej strony zaburzenia takie powstają z powodu pewnych odchyłek podczas zabiegów siewu lub sadzenia, a także z samej specyfiki wzrostu rośliny, którego kierunek często odbiega od idealnego pionowego. Z drugiej strony zaobserwować można nierównoległość pomiędzy kolejnymi przejazdami sadzenia wynikającą z niemożliwości idealnego odwzorowania poprzedniego przejazdu przez operatora, przez co w celu minimalizacji strat wynikających z tych zaburzeń wymuszone jest używanie pielników o dokładnie tej samej liczbie sekcji, jakie posiadały maszyny sadzące lub siejące, mimo tego, iż z reguły posiadają one znacznie mniejsze zapotrzebowanie na moc.

Z niemieckiego zgłoszenia patentowego DE2638034A1 znany jest kultywator rzędowy, zawierający sekcję roboczą składającą się z ruchomej tulei nośnej, która jest połączona nośnikiem sekcji roboczej, zawierającej dwa narzędzia robocze – końcowe i pośrednie. Do tulei nośnej zamontowane są równoległe do siebie łączniki, do których dalej przyłączona jest druga tuleja nośna przytrzymując ramię robocze narzędzia roboczego końcowego. Pierwsza i druga tuleja nośna oraz równoległe łączniki są połączone w ten sposób, że tworzą czworobok, gdzie na w punktach odpowiadających jednej z jego przekątnych zamontowany jest siłownik do podnoszenia narzędzia roboczego końcowego (regulacji wysokości pracy). Ramię robocze końcowego narzędzia roboczego połączone jest z drugim siłownikiem, którego drugi koniec przymocowany jest do ruchomej tulei nośnej. Taka konstrukcja sekcji roboczej umożliwi podnoszenie i przemieszczanie końcowego narzędzia roboczego w taki sposób, że może ono być prowadzone równoległe do rzędu roślin, obracane względem obrabianego rzędu roślin przy jednoczesnej regulacji głębokości obróbki w rzędzie.

Z polskiego opisu patentowego PL231734B1 znana jest konstrukcja pielnika rzędowego posiadającego sekcje robocze z narzędziami pielącymi, połączonymi w płaszczyźnie pionowej z ramą za pomocą czworobocznego elementu przegubowego, w którym każda sekcja robocza jest połączona z jednym czworobocznym elementem przegubowym, charakteryzującym się tym, że czworoboczny element przegubowy składa się z dwóch czworoboków przegubowych równoległych względem siebie w płaszczyźnie pionowej, przy czym pierwszy czworobok przegubowy składa się z ramion poziomych, połączonych obrotowo z ramionami pionowymi, do których również obrotowo, w płaszczyźnie pionowej przymocowany jest pierwszy siłownik, zaś drugi czworobok przegubowy składa się z ramion poziomych połączonych obrotowo z ramionami pionowymi, a naprzeciwległe ramiona czworoboków przegubowych są połączone obrotowo poziomymi segmentami łączącymi, zaś górne ramiona poziome czworoboków przegubowych są połączone z drugim siłownikiem połączonym z zestawem sterującym wysuwem siłownika, a przedni segment łączący jest przystosowany do połączenia z ramą pielnika, natomiast do tylnego segmentu jest zamocowany zespół wspornika pionowego wraz z ramieniem koła kopiującego i kołem kopiującym, a także wysięgnik wzdłużny z uchwytem do mocowania narzędzia pielącego.

Problemem technicznym jest dostarczenie sekcji roboczej pielnika rzędowego, która umożliwiłaby kompensację krzywoliniowości rzędu, w którym wykonywany jest wysiew oraz umożliwiłaby pracę w nierównoległych rzędach roślin, pracę w terenie o zmiennej wysokości powierzchni oraz umożliwiłaby niezależne działanie poszczególnych sekcji roboczych w pielniku, niszczenie chwastów oraz pielęgnację gleby pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie.

Przedmiotem wynalazku jest mechanizm sekcji roboczej pielnika rzędowego zawierający segment poziomy, do którego zamocowane są dwa segmenty pionowe, przy czym do każdego segmentu pionowego zamocowany jest segment roboczy, charakteryzujący się tym, że segment poziomy zawiera belkę stałą przednią, do mocowania do ramy nośnej pielnika, belkę przesuwającą poprzecznie i siłownik hydrauliczny przesuwu poprzecznego, i do belki przesuwanej poprzecznie zamontowany jest wysięgnik kamery z modułem sterującym, i do belki przesuwanej poprzecznie zamocowany jest przynajmniej jeden segment pionowy za pomocą belki pionowej przedniej, przy czym segment pionowy zawiera siłownik hydrauliczny unoszący i zawiera belkę pionową tylną, do której zamocowana jest belka narzędziowa segmentu roboczego, i belka narzędziowa zawiera na pierwszym końcu poprzeczną belkę mocującą zęba sprężystego, do mocowania zęba sprężystego, i belka narzędziowa na drugim końcu zawiera belkę noża wahliwego do mocowania noża wahliwego, i belka mocująca noża wahliwego połączona jest z nożem wahliwym za pomocą siłownika pneumatycznego.

W korzystnej realizacji wynalazku segmenty pionowe stanowią segment prawy i lewy.

W następnej korzystnej realizacji wynalazku segment poziomy ma kształt czworoboku składającego się z belki stałej przedniej połączonej za pomocą ramion z belką przesuwającą poprzecznie.

W innej korzystnej realizacji wynalazku siłownik hydrauliczny przesuwu poprzecznego jest zamocowany na przekątnej segmentu poziomego.

W jeszcze następnej korzystnej realizacji wynalazku segment pionowy ma kształt czworoboku składającego się z belki pionowej przedniej połączonej za pomocą belki poziomej górnej i belki poziomej dolnej z belką pionową tylną.

W jeszcze innej korzystnej realizacji wynalazku siłownik hydrauliczny unoszący jest zamocowany na przekątnej segmentu pionowego.

W kolejnej korzystnej realizacji wynalazku pierwszy koniec belki narzędziowej odpowiada miejscu mocowania belki narzędziowej do belki pionowej tylnej.

W kolejnej innej korzystnej realizacji wynalazku belka narzędziowa pierwszego z segmentów roboczych, prawego lub lewego, jest zamocowana w taki sposób, że belka narzędziowa drugiego z segmentów roboczych, prawego lub lewego, jest przesunięta równoległe względem belki narzędziowej pierwszego segmentu roboczego.

Mechanizm sekcji roboczej pielnika według wynalazku zbudowany jest z czworoboku przegubowego mocowanego do ramy maszyny w tylnej jego części (segment poziomy) i pracującego w płaszczyźnie poziomej, do którego przedniego ramienia zamocowany jest pionowy segment. Do poziomego segmentu zamocowane są symetrycznie dwa czworoboki przegubowe pionowe (segmenty pionowe) kopiujące teren – odpowiednio dla lewej i prawej strony rzędów roślin. Do czworoboków przegubowych pionowych symetrycznie zamontowane są dwie belki narzędziowe segmentów roboczych. Belki narzędziowe posiadają ząb pracujący w międzyrzędziu w tylnej części oraz nóż wahliwy mający możliwość zmiany położenia kąтового z osią obrotu wzdłuż toru jazdy maszyny w przedniej części. Sekcja robocza podczas pracy porusza się w osi rzędu roślin, który podczas pracy znajduje się pomiędzy belkami narzędziowymi. Sekcja robocza pielnika według rozwiązania wyposażona jest w 5 siłowników.

Pierwszy siłownik (poziomy, przesuwany poprzecznie) zamocowany jest na przekątnej poziomego czworoboku przegubowego w segmencie poziomym. Od jego położenia zależy przesunięcie poprzeczne sekcji względem ramy maszyny, do której sekcja jest przymocowana. Jest to siłownik hydrauliczny posiadający możliwość płynnej zmiany położenia w całym zakresie wysuwu, dzięki czemu możliwe jest dostosowanie się sekcji do krzywoliniowości rzędu roślin, tak by sekcja podczas pracy umiejscowiona była w osi rzędu.

Drugi i trzeci siłownik (pionowe, unoszące) są również siłownikami hydraulicznymi i umiejscowione są symetrycznie na czworobokach przegubowych (segmenty pionowe) pracujących w płaszczyźnie pionowej – odpowiednio lewym i prawym. Połączone one są równoległe – wysuwają i wsuwają się jednocześnie. Odpowiadają za regulację docisku narzędzia do gleby, a także umożliwiają ustawienie sekcji roboczej do pozycji transportowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest wyłączenie poszczególnych sekcji w pielniku i szybką zmianę szerokości roboczej pielnika wyposażonego w takie sekcje, na przykład w celu wykonania ostatniego przejazdu niepełną szerokością roboczą agregatu.

Czwarty oraz piąty siłownik (ukośne) to siłowniki pneumatyczne dwupołożeniowe, charakteryzujące się krótkim czasem zmiany położenia, znajdują się w segmentach roboczych. Zamontowane są symetrycznie, przy nożach wahliwych w belkach narzędziowych, odpowiednio lewej i prawej. Połączone są również równoległe – wysuwają i wsuwają się jednocześnie. Zmiana ich położenia odpowiada za

wychylenie noża wahliwego, który posiada dwie pozycje – zwartą oraz rozwartą. Pozycja zwarta powoduje umieszczenie noży wahliwych w osi rzędu, a więc kultywację gleby pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie. Pozycja rozwarta służy do omijania poszczególnych roślin w rzędzie w wypadku wykrycia przez system sterowania.

Podczas pracy, za sterowanie zarówno siłownikiem hydraulicznym umieszczonym na czworoboku przegubowym poziomym, jak i siłownikami pneumatycznymi odpowiadającymi za zwarcie bądź rozwarcie noży wahliwych odpowiada system wizyjny oparty o kamerę umieszczoną na wysięgniku w przedniej części sekcji roboczej, który zamontowany jest na pionowym segmencie łączącym czworobok przegubowy poziomy z czworobokami przegubowymi pionowymi, dzięki czemu możliwa jest kontrola położenia sekcji na stałej wysokości.

Prezentowane rozwiązanie dzięki swojej konstrukcji pozwala na pracę pielnikiem o innej liczbie sekcji, niż maszyna przeprowadzająca zabieg siewu lub sadzenia dzięki niezależnej kompensacji krzywoliniowości rzędu. Dzięki niej również możliwa jest praca w nierównoległych rzędach roślin. Ponadto dzięki uniezależnieniu od siebie sekcji i zastosowaniu rozwiązania z nożami wahliwymi sekcja posiada możliwość niszczenia chwastów i pielęgnacji gleby pomiędzy poszczególnymi roślinami w rzędzie.

Przedmiot wynalazku został przedstawiony na przykładzie wykonania oraz zobrazowany na rysunku, gdzie przedstawiono na fig. 1 rzut ogólny mechanizmu sekcji roboczej pielnika rzędowego, gdzie za pomocą strzałki wskazano kierunek pracy pielnika zawierającego mechanizm; fig. 2 – wyróżnienie segmentu poziomego; fig. 3 – wyróżnienie segmentu pionowego; fig. 4 – wyróżnienie segmentu roboczego; fig. 5 – przesunięcie belek narzędziowych.

Przykład

Mechanizm sekcji roboczej pielnika składa się z połączonych ze sobą: segmentu poziomego, do którego zamocowane są segmenty pionowe, a do każdego segmentu pionowego zamocowany jest segment roboczy. Można wówczas wyróżnić prawą i lewą stronę mechanizmu sekcji pielnika, tj. prawy lub lewy segment pionowy z prawym lub lewym segmentem roboczym, odpowiednio. Nie wpływa to na sposób pracy mechanizmu sekcji roboczej pielnika rzędowego lub jej konstrukcję. Dla jasności opisu wynalazku takie same elementy konstrukcyjne na figurach oznaczono taką samą numeracją. Dalszy opis konstrukcji mechanizmu sekcji roboczej pielnika rzędowego dotyczy prawej lub lewej strony sekcji roboczej, gdyż segment pionowy z segmentem roboczym są identyczne niezależnie od strony. Segment poziomy (fig. 2) składa się z belki stałej przedniej 1, która umożliwia mocowanie sekcji roboczej do ramy nośnej maszyny do pielienia. Dalej belka stała 1 połączona jest za pomocą obrotowych ramion 2 z belką przesuwaną poprzecznie 4. Na przekątnej czworoboku przegubowego utworzonego z belek 1, 2 i 4 zamocowany jest siłownik hydrauliczny 3, którego zmiana długości powoduje przesuw poprzeczny belki przesuwnej poprzecznie 4, będącej elementem segmentu poziomego. Na belce przesuwnej poprzecznie 4, w punkcie odpowiadającym środkowi osi rzędu roślin w warunkach roboczych znajduje się pionowy wysięgnik kamery z modułem sterującym 5. Do belki przesuwnej poprzecznie 4 przymocowany jest przynajmniej jeden układ kopiowania terenu w postaci czworoboku przegubowego pionowego, który stanowi segment pionowy (fig. 3). Do belki przesuwnej poprzecznie 4 mogą być zamocowane dwa układy kopiowania terenu, stanowią one wówczas układ prawy i lewy. Czworobok przegubowy pionowy składa się z belki pionowej przedniej 6 przymocowanej na stałe do belki przesuwnej poprzecznej 4. Do belki pionowej przedniej 6 przymocowane są obrotowo belka pozioma górna 7 oraz belka pozioma dolna 9, na których końcach, równoległe do belki pionowej przedniej 6, obrotowo przymocowana jest belka pionowa tylna 10. Na przekątnej czworoboku przegubowego utworzonego przez połączenie elementów 6, 7, 9 i 10 umieszczony przegubowo jest siłownik hydrauliczny unoszący 8, który reguluje wysokość belki narzędziowej 11 segmentu roboczego (fig. 4), która zamocowana jest do belki pionowej tylnej prawej 10, a także umożliwia podniesienie segmentu roboczego nad powierzchnię uprawy.

Segment roboczy prawy składa się z belki narzędziowej prawej 11, do której w części tylnej zamocowana jest poprzecznie ustawiona belka mocująca 12 z zębem sprężystym prawym 13, pracujący w międzyrzędziu. Położenie zęba sprężystego 13 na belce mocującej 12 jest regulowane w zależności od szerokości rzędu. W przedniej części belki narzędziowej poprzecznie zamocowana jest belka mocująca 14 z nożem wahliwym 16. Nóż wahliwy 16 na belce mocującej 14 jest zamocowany obrotowo w taki sposób, że jego oś obrotu jest równoległa do osi rzędu roślin w warunkach roboczych. Punkt mocowania noża wahliwego 16 do belki mocującej 14 znajduje się od wewnętrznej strony segmentu roboczego względem belki narzędziowej 11. Po stronie przeciwnej względem punktu mocowania noża wahliwego 16, tj. po stronie zewnętrznej, do przedniej belki mocującej 14

zamocowany jest obrotowo siłownik pneumatyczny 15, zaś drugi jego koniec połączony jest z nożem wahliwym prawym 16. Siłownik pneumatyczny 15, wraz z nożem wahliwym 16 tworzą mechanizm dźwigniowy, zaś wysuw siłownika pneumatycznego 15 powoduje umieszczenie noża wahliwego 16 w osi rzędu roślin podczas pracy maszyny do pielienia, a wsuw umieszczenie go w międzyczęści. Mechanizm sekcji roboczej pielnika zawiera prawy i lewy segment roboczy, wówczas to belka narzędziowa 11 jednego z segmentów wraz z odpowiednimi elementami (12, 13, 14, 15 i 16) jest przymocowana do belki poziomej górnej tylnej lewej 10, odpowiadającego mu segmentu pionowego, w taki sposób, że belka 11 jest przesunięta w osi równoległej do osi rzędu względem drugiego z segmentów roboczych, dzięki czemu przemieszczanie poprzeczne elementów roboczych, noży 13 i 16, sąsiadujących sekcji roboczych w pielniku jest bezkolizyjne. Przesunięcie, oznaczone jako D, zobrażowano na Fig. 5.

Segment poziomy umożliwia prowadzenie segmentów roboczych sekcji centralnie do osi rzędu poprzez ustawienie siłownika hydraulicznego 3. Segment pionowy (elementy 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10) umożliwia pracę w terenie o zmiennej wysokości powierzchni przy jednakowym kącie natarcia narzędzia 16 i 13 na glebę, a także uniesienie narzędzi, przy czym możliwe jest ich niezależnie unoszenie. Segment roboczy umożliwia niszczenie chwastów w międzyczęści zębem 13 oraz w osi rzędu nożem wahliwym 16, poprzez ustawienie go w osi rzędu poprzez wsuw siłownika 15 w momencie wykrycia chwastu przez system sterowania.

Lista oznaczeń:

- 1 – belka stała przednia,
- 2 – belka obrotowa pozioma prawa,
- 3 – siłownik hydrauliczny przesuwu poprzecznego,
- 4 – belka przesuwana poprzecznie,
- 5 – wysięgnik kamery z modułem sterującym,
- 6 – belka pionowa przednia segmentu pionowego,
- 7 – belka pozioma górna,
- 8 – siłownik hydrauliczny unoszący,
- 9 – belka pozioma dolna przednia segmentu pionowego,
- 10 – belka pionowa tylna segmentu pionowego,
- 11 – belka narzędziowa,
- 12 – belka mocująca ząb sprężysty,
- 13 – ząb sprężysty,
- 14 – belka mocująca noża wahliwego,
- 15 – siłownik pneumatyczny noża wahliwego,
- 16 – nóż wahliwy.

Zastrzeżenia patentowe

1. Mechanizm sekcji roboczej pielnika rzędowego zawierający segment poziomy, do którego zamocowane są dwa segmenty pionowe, przy czym do każdego segmentu pionowego zamocowany jest segment roboczy, **znamienny tym**, że segment poziomy zawiera belkę stałą przednią (1), do mocowania do ramy nośnej pielnika, belkę przesuwaną poprzecznie (4) i siłownik hydrauliczny przesuwu poprzecznego (3), i do belki przesuwnej poprzecznie (4) zamontowany jest wysięgnik kamery z modułem sterującym (5), i do belki przesuwnej poprzecznie (4) zamocowany jest przynajmniej jeden segment pionowy za pomocą belki pionowej przedniej (6), przy czym segment pionowy zawiera siłownik hydrauliczny unoszący (8) i zawiera belkę pionową tylną (10), do której zamocowana jest belka narzędziowa (11) segmentu roboczego, i belka narzędziowa (11) zawiera na pierwszym końcu poprzeczną belkę mocującą zęba sprężystego (12), do mocowania zęba sprężystego (13), i belka narzędziowa (11) na drugim końcu zawiera belkę noża wahliwego (14) do mocowania noża wahliwego (16), i belka mocująca noża wahliwego (14) połączona jest z nożem wahliwym (16) za pomocą siłownika pneumatycznego (15).

2. Mechanizm wg zastrz. 1, **znamienny tym**, że segmenty pionowe stanowią segment prawy i lewy.
3. Mechanizm wg zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że segment poziomy ma kształt czworoboku składającego się z belki stałej przedniej (1) połączonej za pomocą ramion (2) z belką przesuwaną poprzecznie.
4. Mechanizm wg zastrz. 1, 2 albo 3, **znamienny tym**, że siłownik hydrauliczny przesuwu poprzecznego (3) jest zamocowany na przekątnej segmentu poziomego.
5. Mechanizm wg zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że segment pionowy ma kształt czworoboku składającego się z belki pionowej przedniej (6) połączonej za pomocą belki poziomej górnej (7) i belki poziomej dolnej (9) z belką pionową tylną (10).
6. Mechanizm wg zastrz. 1, 2 albo 4, **znamienny tym**, że siłownik hydrauliczny unoszący (8) jest zamocowany na przekątnej segmentu pionowego.
7. Mechanizm wg zastrz. 1, **znamienny tym**, że pierwszy koniec belki narzędziowej (11) odpowiada miejscu mocowania belki narzędziowej (11) do belki pionowej tylnej (10).
8. Mechanizm wg zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że belka narzędziowa (11) pierwszego z segmentów roboczych, prawego lub lewego, jest zamocowana w taki sposób, że belka narzędziowa (11) drugiego z segmentów roboczych, prawego lub lewego, jest przesunięta równolegle względem belki narzędziowej (11) pierwszego segmentu roboczego.

Rysunki

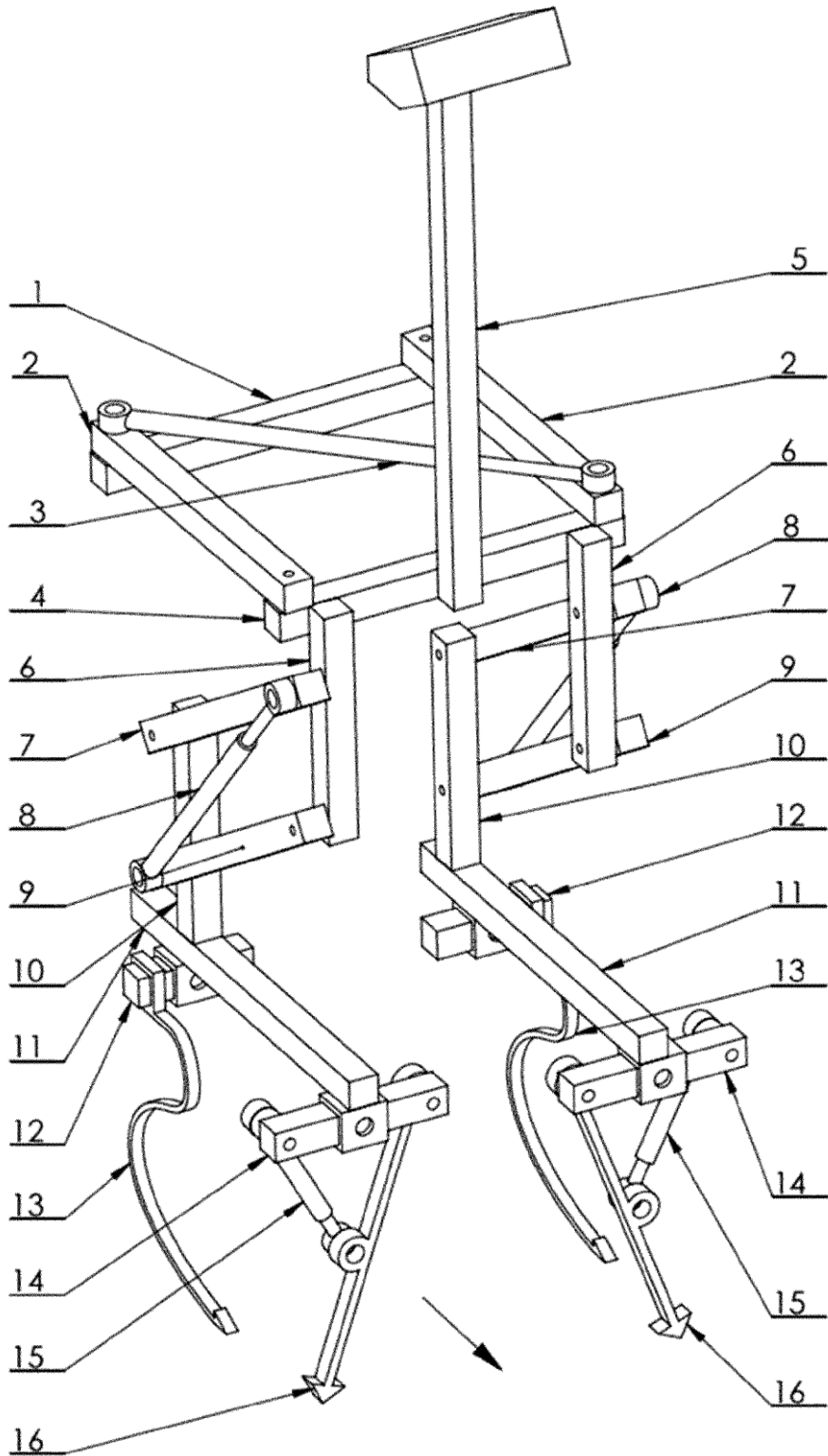


Fig. 1

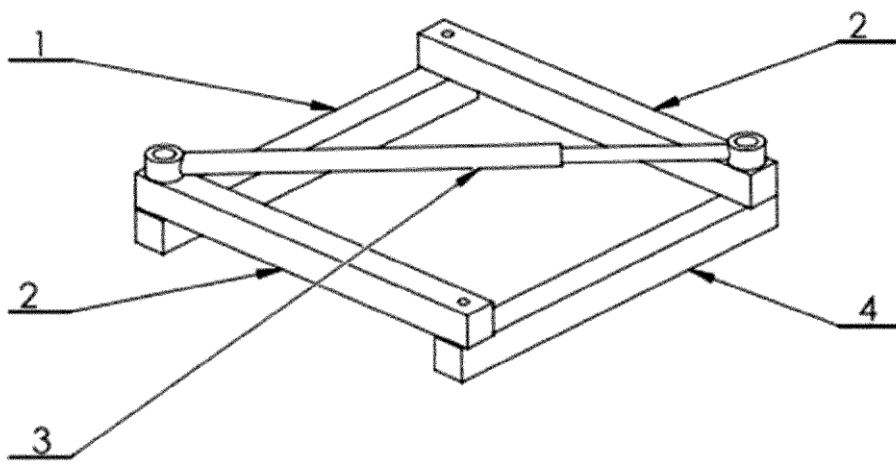


Fig. 2

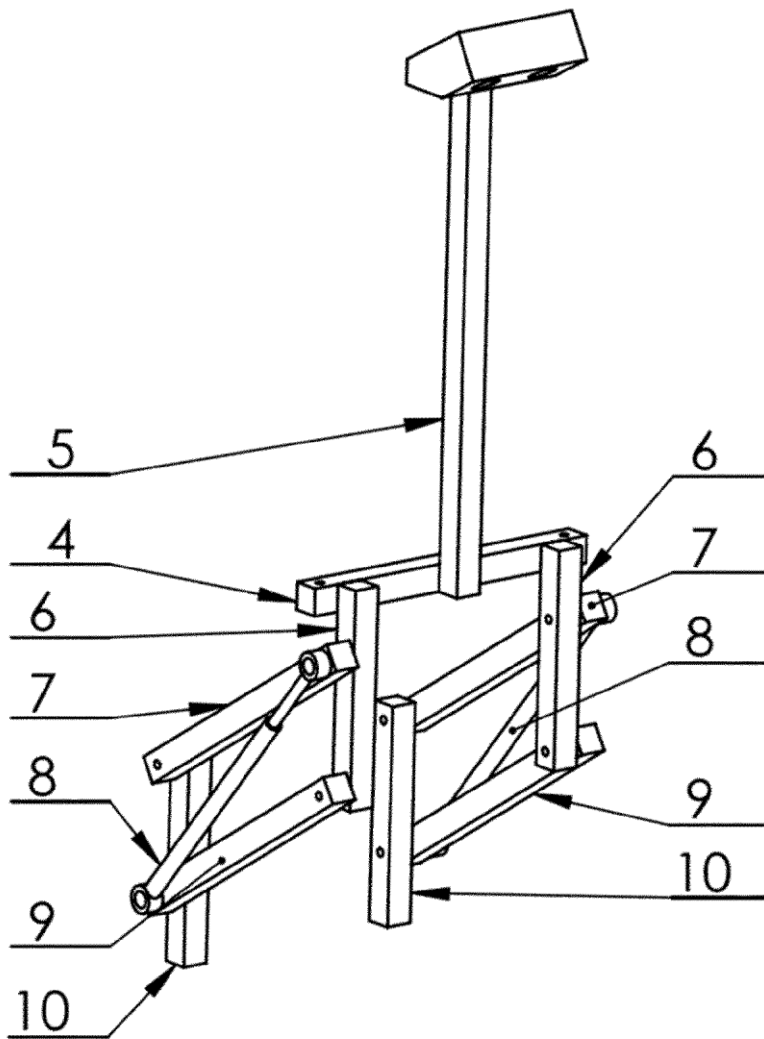


Fig. 3

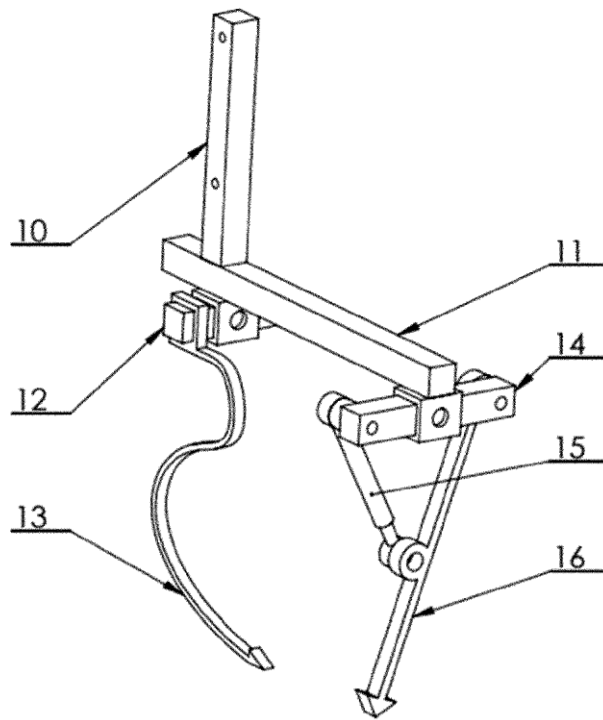


Fig. 4

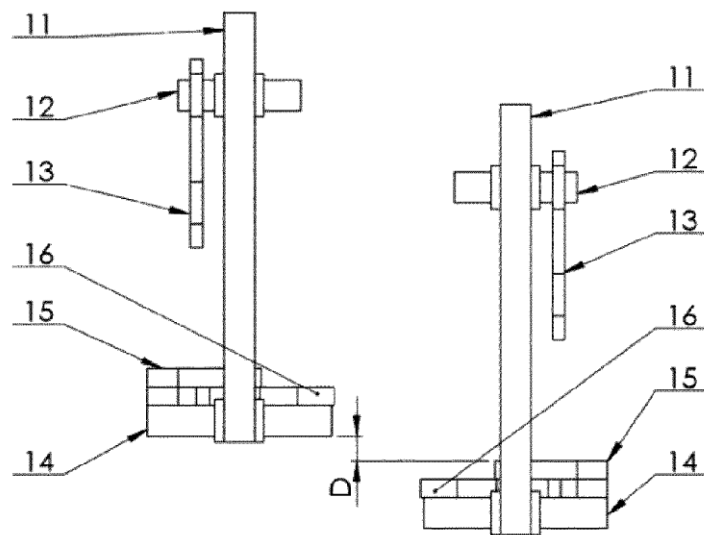


Fig. 5