

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Roman Rogacki

PRACA DOKTORSKA

**BADANIA NAD REDUKCJĄ WPLYWU
ZMIENNOŚCI CZYNNIKÓW
EKSPLOATACYJNYCH NA RÓWNOMIERNOŚĆ
WYSIEWU PRZY SIEWIE RZĘDOWYM**

Promotor:
dr hab. inż. Jan Szczepaniak

Poznań, 2020

*Pragnę podziękować wszystkim
bez których niniejsza praca nie mogła by powstać.*

*Dziękuję Dyrekcji Sieci Badawczej Łukasiewicz - Przemysłowego Instytutu
Maszyn Rolniczych za wszelką pomoc w realizacji niniejszej pracy doktorskiej.*

*Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi
dr. hab. inż. Janowi Szczepaniakowi za motywację, słowa otuchy,
nadhudzka cierpliwość i wyrozumiałość oraz poświęcony czas, zaangażowanie,
wnikliwie dyskusje i cenne sugestie, które były nieocenioną pomocą przy realizacji
niniejszej dysertacji.*

*Dziękuję moim współpracownikom i przyjaciołom z Instytutu
za inspirujące dyskusje i życzliwość. W szczególności pragnę podziękować
dr. Ryszardowi Grzechowiakowi za cenne uwagi i sugestie.*

*Szczególne podziękowania dla mojej Żony Izabeli za pomoc w opiece nad rodziną,
wyrozumiałość i wsparcie.*

Streszczenie

BADANIA NAD REDUKCJĄ WPŁYWU ZMIENNOŚCI CZYNNIKÓW EKSPLOATACYJNYCH NA RÓWNOMIERNOŚĆ WYSIEWU PRZY SIEWIE RZĘDOWYM

W pracy przedstawiono problematykę dotyczącą jakości wysiewu uniwersalnymi siewnikami rzędownymi z mechanicznym dozowaniem nasion i grawitacyjnym transportem nasion do redlic. Skupiono się nad zagadnieniami dotyczącymi pracy aparatu wysiewającego w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Celem pracy było opracowanie algorytmu korekcyjnego, sterującego napędem dozowników nasion, w sposób zmniejszający niekorzystne oddziaływanie zmienności wartości czynników eksploatacyjnych na równomierność wysiewu wyrażaną odchyłką ilości wysiewu.

W pierwszych rozdziałach pracy, na tle wymagań stawianych siewnikom, przedstawiono przykładowe konstrukcje uniwersalnych siewników rzędownych oraz omówiono wskaźniki oceny jakości ich pracy. Następnie przedstawiono budowę stanowiska badawczego umożliwiającego realizację badań w programowanych, powtarzalnych warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem trzech metod (klasycznej wagowej, optycznej i z zastosowaniem czujnika piezoelektrycznego).

Istotną częścią pracy jest opis badań eksperymentalnych wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydajności jednostkowej dozownika. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano modele matematyczne opisujące zależność wydajności jednostkowej badanych dozowników, dla wybranych rodzajów nasion, od wartości czynników eksploatacyjnych (pochylenie siewnika w kierunku jazdy, prędkość obrotowa wałka wysiewającego, poziom nasion w zbiorniku).

W końcowej części pracy, w oparciu o uzyskane modele regresyjne opisujące wysiew dozownika, opracowano algorytm korekcyjny oraz przeprowadzono badania skuteczności jego działania.

Opracowany algorytm może być wykorzystywany w nowoczesnych siewnikach wspierających idee rolnictwa precyzyjnego, posiadających już oprzyrządowanie umożliwiające zmienne dawkowanie nasion, jak i w klasycznych konstrukcjach, wymagających jednak pewnych zabiegów adaptacyjnych i ingerencji w układ napędowy siewnika.

Abstract

RESEARCH ON REDUCING THE IMPACT OF VARIABILITY OF OPERATING FACTORS ON THE UNIFORMITY OF SOWING WITHIN A DRILL SOWING

The paper presents the problem of sowing quality with universal seed row drills with mechanical seed dosing and gravity transport of seeds to coulters. The issues related to the operation of the sowing apparatus in variable operating conditions were focused. The aim of the work was to develop a correction algorithm that controls the drive of seed dispensers in a way that reduces the unfavorable impact of the variability of operating factors on the uniformity of sowing expressed by the sowing quantity deviation.

In the first chapters of the work, against the background of the requirements for seed drills, examples of designs of universal seed drills are presented and the indicators for assessing the quality of their work are discussed. Then, the construction of the test stand enabling the implementation of programmed tests in repeatable laboratory conditions with the use of three methods (classic weighing, optical and using a piezoelectric sensor) was presented.

An important part of the work is the description of the experimental research on the influence of the operational factors on the value of the unit performance of the dispenser. On the basis of the obtained results, mathematical models were developed describing the dependence of the unit performance of the tested feeders, for selected types of seeds, on the value of operating factors (the inclination of the seeder in the direction of travel, the rotational speed of the sowing shaft, the level of seeds in the tank).

In the final part of the work, based on the obtained regression models describing the sowing of the dispenser, a correction algorithm was developed and the effectiveness of its operation was tested.

The developed algorithm can be used in modern seed drills supporting the ideas of precision agriculture, already equipped with equipment enabling variable seed dosing, as well as in classic constructions, however, requiring some adaptation measures and interference in the drill drive system.

Spis treści

STRESZCZENIE	3
WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	9
2. MASZYNOWY SIEW NASION ROŚLIN UPRAWNYCH.....	9
2.1. <i>Wymagania stawiane uniwersalnym siewnikom rzędowym</i>	<i>10</i>
2.2. <i>Współczesne, uniwersalne siewniki rzędowe do siewu nasion roślin uprawnych</i>	<i>12</i>
3. ANALIZA PRAC DOTYCZĄCYCH BADAŃ UNIWERSALNYCH SIEWNIKÓW RZĘDOWYCH.....	18
3.1. <i>Wskaźniki oceny jakości pracy siewników rzędowych oraz przegląd metod realizacji badań eksperymentalnych</i>	<i>19</i>
3.2. <i>Studium prac badawczych wpływu poszczególnych czynników na równomierność wysiewu uniwersalnymi siewnikami rzędowymi.....</i>	<i>23</i>
3.3. <i>Podsumowanie.....</i>	<i>26</i>
4. PROBLEM BADAWCZY	31
5. PROGRAM I METODYKA BADAŃ	33
5.1. <i>Obiekty badań.....</i>	<i>33</i>
5.1.1. <i>Roweczkowy aparat wysiewający typu Hoosiera</i>	<i>33</i>
5.1.2. <i>Kołeczkowy aparat wysiewający typu Siederslebena</i>	<i>35</i>
5.2. <i>Budowa i zasada działania stanowiska badawczego</i>	<i>38</i>
5.2.1. <i>Budowa stanowiska badawczego</i>	<i>38</i>
5.2.2. <i>Zasada działania stanowiska badawczego</i>	<i>39</i>
5.2.3. <i>Możliwości nastawcze stanowiska</i>	<i>41</i>
5.2.4. <i>Oprogramowanie do sterowania stanowiskiem badawczym.....</i>	<i>44</i>
5.3. <i>Czynniki zależne, niezależne oraz nastawy regulacyjne dozowników nasion</i>	<i>46</i>
5.4. <i>Program badań rozpoznawczych</i>	<i>47</i>
5.5. <i>Program badań wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydatku jednostkowego dozownika.....</i>	<i>48</i>
5.6. <i>Program badań sprawdzających.....</i>	<i>50</i>
5.7. <i>Metodyka badań</i>	<i>50</i>
5.7.1. <i>Metodyka badań materiału doświadczalnego.....</i>	<i>51</i>
5.7.2. <i>Metodyka badania wydatku jednostkowego metodą wagową</i>	<i>52</i>
5.7.3. <i>Metodyka badania nierównomierności podłużnej za pomocą metody fotoptycznej.....</i>	<i>54</i>
5.7.4. <i>Metodyka badania nierównomierności podłużnej z zastosowaniem metody piezoelektrycznej</i>	<i>59</i>
5.8. <i>Analiza statystyczna - model matematyczny.....</i>	<i>63</i>
6. BADANIA ROZPOZNAWCZE	65
6.1. <i>Roweczkowy aparat wysiewający typu Hoosiera (Typ R).....</i>	<i>65</i>
6.1.1. <i>Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion pszenicy</i>	<i>65</i>
6.1.2. <i>Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion owsa.....</i>	<i>66</i>
6.1.3. <i>Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion jęczmienia</i>	<i>68</i>
6.1.4. <i>Wydajność jednostkowa dozownika dla siewu nasion rzepaku</i>	<i>69</i>
6.1.5. <i>Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od kąta pochylenia siewnika β dla siewu nasion pszenicy</i>	<i>70</i>
6.1.6. <i>Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla siewu pszenicy.....</i>	<i>70</i>

6.1.7. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od poziomu nasion w zbiorniku H dla siewu pszenicy.....	71
6.1.8. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od drgań siewnika dla siewu nasion pszenicy	72
6.2. Kołeczkowy aparat wysiewający typu <i>Siedersleben</i> (Typ <i>K</i>).....	73
6.2.1. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika kołeczkowego od kąta pochylenia siewnika β dla siewu nasion pszenicy	74
6.2.2. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika kołeczkowego od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla siewu nasion pszenicy	75
6.2.3. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika kołeczkowego od poziomu nasion w zbiorniku H dla siewu nasion pszenicy ..	77
7. WYNIKI BADAŃ WPŁYWU WARTOŚCI CZYNNIKÓW EKSPLOATACYJNYCH NA WARTOŚĆ WYDAJNOŚCI JEDNOSTKOWEJ DOZOWNIKA	79
7.1. Badanie wydajności jednostkowej dla roweczkowego aparatu wysiewającego ..	79
7.1.1. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu pszenicy	79
7.1.2. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu owsa	86
7.1.3. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu jęczmienia	91
7.1.4. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu rzepaku.....	95
7.2. Badanie wydatków jednostkowych dla kołeczkowego zespołu wysiewającego..	100
7.3. Dyskusja wyników	104
8. ALGORYTM KOREKCYJNY STERUJĄCY NAPĘDEM DOZOWNIKÓW NASION.....	108
8.1. Zasada działania algorytmu	108
8.2. Implementacja algorytmu korekcyjnego.....	111
8.3. Badania laboratoryjne skuteczności działania opracowanego algorytmu	114
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	122
LITERATURA	125
SPIS RYSUNKÓW.....	130
SPIS TABEL	132

Wykaz symboli i oznaczeń

a_i	– współczynnik wielomianu
b	– wskaźnik nierównomierności poprzecznej wysiewu, %
d_N	– wskaźnik nierównomierności podłużnej wysiewu, %
H	– poziom nasion w zbiorniku, cm
$h_1 \div h_4$	– czynniki wejściowe – zakłócające
hd	– wysokość szczeliny wysiewającej (ustawienie denka), mm
hz	– wysokość szczeliny zasypowej (otwarcie zastawki), mm
MTN	– masa 1000 nasion, g
k	– współczynnik rozszerzenia
L_n	– liczba obrotów wałka wysiewającego dla pojedynczego pomiaru, obr
m	– masa wysianych nasion, g
n	– liczba powtórzeń pomiarów lub odcinków pomiarowych
N	– nastawa czynnej długości wałka wysiewającego (dotyczy aparatu wysiewającego - Typ R)
N_i	– liczba nasion w i – tym odcinku pomiarowym
$N_{\bar{s}r}$	– średnia liczba nasion w odcinkach pomiarowych
n_w	– prędkość obrotowa wałka wysiewającego, obr/min
n_{wz}	– prędkość obrotowa wałka wysiewającego po korekcie, obr/min
p	– rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi), m
q	– wydajność jednostkowa dozownika nasion (masa wysiewanych nasion na 1 obrót wałka wysiewającego), g/obr
q_K	– skorygowana wydajność jednostkowa, g/obr
q_M	– wydajność jednostkowa z modelu, g/obr
q_{Mmax}	– wydajność jednostkowa z modelu – wartość maksymalna, g/obr
q_{Mmin}	– wydajność jednostkowa z modelu – wartość minimalna, g/obr
q_p	– wydajność jednostkowa wyznaczona na podstawie próby kręczonej, g/obr
Δq	– odchyłka dawkowania, %
Q_{ha}	– ilość wysiewu na jednostkę powierzchni (norma wysiewu), kg/ha
$Q_{ha,max}$	– maksymalna ilość wysiewu na jednostkę powierzchni, kg/ha
$Q_{ha,min}$	– minimalna ilość wysiewu na jednostkę powierzchni, kg/ha
$Q_{ha,rz}$	– rzeczywista ilość wysiewu na jednostkę powierzchni, kg/ha
\bar{Q}_{ha}	– średnia ilość wysiewu na jednostkę powierzchni, kg/ha
ΔQ_{ha}	– odchyłka ilości wysiewu, %
$\Delta Q_{ha,max}$	– odchyłka maksymalna ilości wysiewu, %
$\Delta Q_{ha,min}$	– odchyłka minimalna ilości wysiewu, %
s	– czynna długość wałka wygarniającego dla nasion średnich i grubych w roweczkowym aparacie wysiewającym, mm
Typ K	– dozownik kołeczkowy (typu Siederslebena)
Typ R	– dozownik roweczkowy (typu Hoosiera)

- u – niepewność standardowa, w jednostce badanej wielkości
- U – niepewność rozszerzona, w jednostce badanej wielkości
- v_s – prędkość robocza siewnika, m/s
- W_n – wilgotność nasion, %
- z – częstotliwość drgań zakłócających pracę dozownika, Hz
- α – poziomu ufności
- β – kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy, °
- γ – kąt pochylenia siewnika na bok, °

1. Wstęp

Ludzie od początku swoich dziejów starali się udoskonalać sposoby pozyskiwania pożywienia. Stopniowo odchodzili od zbieractwa i myślistwa na rzecz uprawy roli i hodowli zwierząt. Był to początek rolnictwa. Początkowo uprawiano glebę stosując technikę kopieniaczą lub na obszarach zalesionych - wypaleniskową. W epoce żelaza zaczęto stopniowo stosować i udoskonalać narzędzia do uprawy roli. Wprowadzono do użytku radło, następnie sochę udoskonalając technikę orną. Stosowano system przemiennie-odłogowy a następnie dwu i trójpolówkę [4, 3]. Osiadły tryb życia i zwiększające się zagęszczenie zaludnienia wiązało się z potrzebą ciągłego udoskonalania sposobów produkcji żywności i zwiększania areału upraw w celu zaspokojenia potrzeb rosnącej populacji ludzi.

Jednym z nieodzownych elementów procesu produkcji roślinnej jest siew lub sadzenie. Pomysł maszynowego siewu zrodził się już w czasach starożytnych. W Europie pierwsze siewniki powstały w XVI wieku [36]. Siewniki ewaluowały w zgodzie z możliwościami technicznymi i aktualnym stanem wiedzy na temat wymagań co do parametrów wysiewu.

Główna zasada działania oraz podstawowe elementy wchodzące w skład budowy siewnika ukształtowały się już w 1784 roku za sprawą Jamesa Cooke'a. Konstrukcja siewników współczesnych znacząco nie odbiega od pierwotnej koncepcji [98, 62].

W obecnych czasach gospodarka rolna, w tym produkcja roślinna, nadal stanowi znaczącą część gospodarki światowej. W Polsce wg danych GUS z 2019 r. gospodarstwa rolne zajmowały 52% obszaru kraju, 90% ich powierzchni stanowiły użytki rolne (14,7 mln ha). Udział obszarów przeznaczonych pod zasiewy stanowił 66,7% użytków rolnych [17].

Od jakości siewu oraz kosztu jego wykonania w dużej mierze zależy wielkość i jakość uzyskiwanych plonów i tym samym opłacalność przedsięwzięcia. Rozwój maszyn do siewu i sadzenia ma duże znaczenie dla gospodarki i bezpieczeństwa żywnościowego społeczeństwa.

2. Maszynowy siew nasion roślin uprawnych

Maszyny do siewu roślin uprawnych obejmują szeroką gamę urządzeń, o zróżnicowanej konstrukcji i różnym stopniu specjalizacji. Wśród nich największą grupę stanowią tzw. siewniki uniwersalne, przeznaczone do siewu rzędowego nasion zbóż, rzepaku, maku, roślin motylkowych drobno- i grubonasiennych oraz traw [10, 85, 50, 79, 73], których wielkość mieści się w kategorii nasion drobnych, średnich i grubych [62]. Zakres stosowania siewnika uniwersalnego definiują tzw. warunki normalne eksploatacji [85, 94]. Określają one zakres zmienności warunków eksploatacyjnych siewnika, dla których powinien on zapewnić wykonanie prawidłowego siewu.

Wykonanie siewu sprowadza się do umieszczenia materiału siewnego w łożu siewnym, w odpowiedniej ilości i lokalizacji (rozmqieszczenie w płaszczyźnie poziomej i pionowej), z jednoczesnym przykryciem nasion warstwą gleby [32, 43, 54].

Pomijając możliwości zabudowy siewników na różnych maszynach uprawowych (np. agregaty uprawowo siewne o różnym przeznaczeniu m.in. do uprawy i siewu po orce, w uprawie pasowej, w uprawie bezorkowej, do siewu poplonu w ściernisko) oraz dodatkowe wyposażenie w aplikatory nawozów stałych i ciekłych, zasadniczy podział siewników można przeprowadzić biorąc pod uwagę [10, 79, 61, 73]:

- a) sposób rozmieszczenia nasion:
 - rzutowy,
 - rzędowy (pasowy, krzyżowy, gniazdowy),
 - punktowy,
- b) sposób dozowania i transportu nasion:
 - mechaniczny z grawitacyjnym transportem nasion do redlic,
 - mechaniczno-pneumatyczny z mechanicznymi indywidualnymi dozownikami i pneumatycznym transportem nasion do redlic,
 - pneumatyczny z centralnymi zespołami dozującymi oraz pneumatycznym transportem i rozdziałem nasion do redlic,
 - precyzyjne sekcje wysiewające z mechanicznymi zespołami wysiewającymi: tarczowymi (o tarczach ustawionych poziomo lub pionowo), pierścieniowymi (komorowe), taśmowymi oraz łyżeczkowymi,
 - precyzyjne sekcje wysiewające z pneumatycznymi zespołami wysiewającymi podciśnieniowymi i nadciśnieniowymi,
- c) przeznaczenie siewnika:
 - siewniki uniwersalne,
 - siewniki precyzyjne,
 - siewniki ogrodnicze,
 - siewniki specjalne.

2.1. Wymagania stawiane uniwersalnym siewnikom rzędowym

Zgodnie z definicją zawartą w normie BN-81/9195-11 [79] siewnik połowy rzędowy uniwersalny to maszyna do wysiewania nasion lub nasion z nawozem mineralnym granulowanym do gleby na zadaną głębokość w rzędach, w sposób ciągły nieuporządkowany, bez kontrolowanej odległości między nasionami.

Szeroki zakres zastosowania uniwersalnych siewników rzędowych i związana z tym konieczność spełnienia specyficznych wymagań agrotechnicznych dla wysiewu poszczególnych rodzajów nasion, stawia przed tymi maszynami często trudne do pogodzenia wymagania [54, 43, 62, 71]:

- możliwość wysiewu rozmaitych rodzajów nasion,
- zachowanie wymaganej równomierności wysiewu (poprzecznej i podłużnej) dla rozmaitych rodzajów nasion i szerokiego zakresu ilości wysiewu,
- możliwość wysiewu zbóż w ilościach od 50 kg/ha do 300 kg/ha, a nasion drobnych od 6 kg/ha do 50 kg/ha,
- możliwość zmiany szerokości międzyrzędzi oraz zachowanie w trakcie pracy ich rozstawu,
- siewnik powinien zapewnić umieszczenie nasion w roli na stałej i odpowiednio ustalonej głębokości z jednoczesnym przykryciem ich warstwą gleby, przy czym głębokość siewu nie powinna zależeć od mikroreliefu powierzchni roli,
- aparaty wysiewające nie powinny powodować uszkodzenia wysiewanych nasion,
- jakość pracy siewnika nie powinna ulegać pogorszeniu podczas wysiewu na terenie pagórkowatym, jak również podczas zmian prędkości roboczej w zakresie od 6 km/h do 15 km/h.

Polska Norma PN-87/R-36540 [85] oraz System Maszyn Rolniczych (SMR część 7, 1988 r.) [94] określają ogólne wymagania i badania siewników, jednak nie są w pełni zgodne co do wartości poszczególnych wskaźników. Zestawienie podstawowych parametrów dotyczących nierównomierności siewu nasion przedstawiono w tab. 2.1. Można zauważyć, że wymagania w zakresie nierównomierności siewu wg PN-87/R-36540 [85] są mniej rygorystyczne, niż opracowane rok później przez IBMER.

Tab. 2.1. Wymagania dotyczące nierównomierności siewu nasion

Nazwa	Wskaźnik	
Akt normatywny	PN-87/R-36540	SMR, część 7, 1988 r.
Nierównomierność poprzeczna wysiewu nasion: zbóż; roślin strączkowych; nasion drobnych i traw	5%; 6%; 7%	3%; 4%; 5%
Nierównomierność podłużna	45%	30%
Odchyłka (od wysiewu średniego) ilości wysiewu nasion:	8% (zbóż i strączkowych); 12% (dla pozostałych)	8% (drobnych i średnich); 15% (grubych)

(źródło: opracowanie własne)

Oprócz oceny rozmieszczenia nasion na powierzchni pola wymienione akty normatywne precyzują wymagania dotyczące m.in.: głębokości siewu, przykrycia nasion glebą czy uszkodzenia nasion w trakcie siewu.

Ponadto, ww. normy definiują tzw. normalne warunki pracy, dla których stawiane wymagania powinny być spełnione. Według SMR [94] normalne warunki pracy obejmują zasiew na polach o płaskiej lub pofalowanej powierzchni, której kąt nachylenia nie przekracza 12° . Natomiast wg PN-87/R-36540 [85] normalne warunki pracy definiowane są oddzielnie dla siewników o szerokości roboczej do 6 m, gdzie kąt nachylenia pola nie powinien przekraczać 8° , a dla siewników o szerokości roboczej 12 m i większej – tylko pola płaskie.

2.2. Współczesne, uniwersalne siewniki rzędowe do siewu nasion roślin uprawnych

W ofercie zarówno krajowych jak i zagranicznych producentów uniwersalnych siewników rzędowych znajdują się maszyny dostosowane pod względem wydajności, wyposażenia, zapotrzebowania mocy itp. do różnych pod względem specyfiki produkcji i wielkości areалу gospodarstw.

W Polsce produkcją siewników zajmują się m.in. takie firmy jak: AGRO-MASZ, AGRO-TOM, AKPIL, BOMET, CZAJKOWSKI, EURO-MASZ, MEPROZET, POM Brodnica oraz UNIA. Do znanych zagranicznych producentów siewników należą m.in. firmy: AMAZONE, HORSCH, JUNKKARI, KONGSKILDE, KUHN, KVERNELAND, LEMKEN, MASCHINO-GASPARD, POTTINGER, SULKY, VEDERSTAD.

Poniżej kilka przykładów rozwiązań konstrukcyjnych układów wysiewających stosowanych w uniwersalnych siewnikach rzędowych.

Jedną z prostszych konstrukcji siewnika mechanicznego z grawitacyjnym transportem nasion do redlic ma w swojej ofercie firma MEPROZET.

Siewnik o symbolu S107 (rys. 2.1) jest maszyną zawieszoną, o szerokości roboczej 3 m, w której aparaty wysiewające otrzymują napęd od koła jezdnego za pośrednictwem przekładni łańcuchowej o dwóch przełożeniach. Dzięki zastosowaniu roweczkowych aparatów wysiewających, posiadających regulację czynnej długości wałeczka wysiewającego, możliwa jest płynna nastawa ilości wysiewu i dostosowanie aparatu do wysiewu nasion drobnych, średnich oraz grubych [93]. Siewnik występuje w wersji z redlicami stopkowymi lub talerzowymi.



Rys. 2.1 Siewnik S107 firmy MEPROZET [31]

Bardziej złożone układy napędowe muszą być stosowane w siewnikach z dozownikami o stałej wydajności jednostkowej. Wówczas nastawa ilości wysiewu odbywa się wyłącznie poprzez wybór odpowiedniego przełożenia w układzie napędowym aparatów wysiewających.

Siewniki tego typu posiada w swojej ofercie firma UNIA.



Rys. 2.2. Siewnik MAZUR 1100 firmy UNIA [35]

Siewniki serii Mazur mogą pracować jako maszyny zawieszane lub opcjonalnie półzawieszane. Za dozowanie nasion odpowiadają kołeczkowe aparaty wysiewające, otrzymujące napęd od koła podporowego poprzez szereg przekładni łańcuchowych i skrzynię przekładniową o 72 przełożeniach. Dla siewnika wyposażonego w redlice talerzowe, przykładowo do siewu pszenicy (wg tabeli wysiewu), zakres ilości wysiewu wynosi od 81 kg/ha do 402 kg/ha [41].

Najczęściej jednak w uniwersalnych siewnikach rzędowych do napędu aparatów wysiewających wykorzystywane są bezstopniowe przekładnie krzywkowe. Mogą one otrzymywać napęd od koła podporowego siewnika lub specjalnego koła ostrogowego (zwłaszcza w siewnikach nabudowanych na agregatach uprawowo-siewnych).

Przekładnie tego typu stosuje większość wymienionych wyżej producentów. Jednym z nich jest firma Amazone posiadająca w swojej ofercie agregat uprawowo siewny AD Super.



Rys. 2.3. Siewnik AD Super firmy AMAZONE [33]

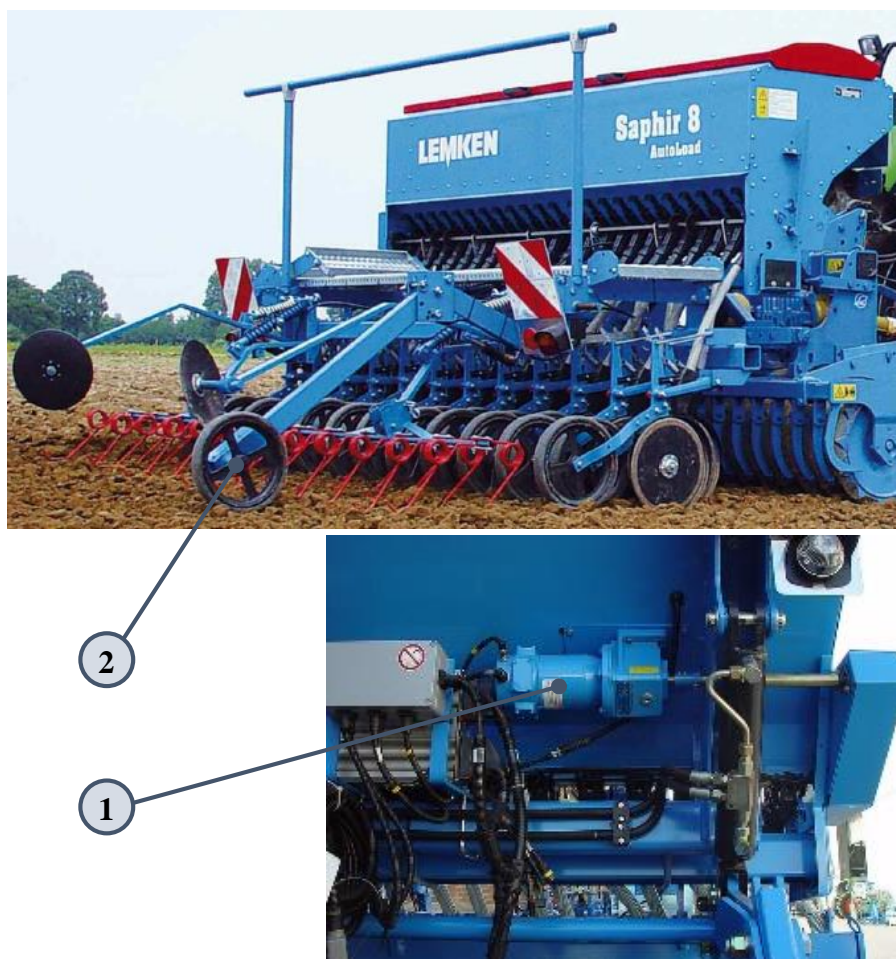
1- bezstopniowa przekładnia VARIO, 2- siłownik korekty wysiewu

Stanowi on połączenie siewnika z narzędziami uprawowymi. Siewnik AD montowany jest bezpośrednio na wale ugniatającym co sprawia, że cały agregat uprawowo siewny jest kompaktowy a jego środek ciężkości znajduje się blisko ciągnika. Aparaty wysiewające otrzymują napęd od koła ostrogowego poprzez bezstopniową przekładnię VARIO (1 rys. 2.3). Opcjonalnie, siewnik może być wyposażony w układ hydraulicznej zmiany normy wysiewu (2), co pozwala na dostosowanie ilości siewu do zmieniających się warunków glebowych [33].

Stosowany powszechnie w uniwersalnych siewnikach rzędowych napęd aparatów wysiewających od koła podporowego lub ostrogowego zapewnia bezpośrednie skorelowanie prędkości jazdy siewnika z prędkością obrotową wałeczków wysiewających. Rozwiązanie to nie jest jednak pozbawione wad. Problem dotyczy występowania poślizgu koła napędowego i

w efekcie niedokładności w dozowaniu nasion. Rozwiązaniem tej niedogodności może być zastosowanie do napędu aparatów wysiewających silników elektrycznych lub hydraulicznych.

Rozwiązanie takie wykorzystała w swoim siewniku Saphir 8 firma Lemken. Za napęd aparatów wysiewających odpowiada elektryczny silnik prądu stałego 12V (1 rys. 2.4). Zastosowany w siewniku elektroniczny układ sterowania „Solitronic” otrzymuje informację o prędkości jazdy agregatu od koła pomiarowego (2), który na podstawie przeprowadzonej wcześniej próby kręconej i zadanej normy wysiewu ustala wymaganą prędkość obrotową wałka napędowego aparatów wysiewających. Sterownik, po wykonaniu próby kręconej, informuje operatora o możliwym do uzyskania zakresie prędkości roboczych siewnika. Istnieje możliwość wybrania jednego z dwóch zakresów, poprzez zmianę przełożenia pośredniczącej w napędzie przekładni łańcuchowej [40].



Rys. 2.4. Siewnik Saphir 8 firmy LEMKEN [30]

1- silnik elektryczny napędu aparatów wysiewających, 2- koło pomiarowe

Wyżej omówione konstrukcje mają wspólną cechę, jaką jest zależność szerokości skrzyni nasiennej od szerokości roboczej siewnika, wynikająca z grawitacyjnego transportu nasion do redlic. Tego ograniczenia nie mają siewniki mechaniczno-pneumatyczne z mechanicznymi

indywidualnymi dozownikami i pneumatycznym transportem nasion do redlic (np. siewnik UNIA FS 2400/4 - rys. 2.5). Elementy robocze dozownika mają bezpośredni kontakt z nasionami i mają konstrukcję zbliżoną do rozwiązań stosowanych w klasycznych uniwersalnych siewnikach rzędowych z grawitacyjnym transportem nasion do redlic. Główną różnicą jest natomiast konieczność wyposażenia siewnika w układ pneumatycznego transportu nasion.



Rys. 2.5. Siewnik FS 2400/4 firmy UNIA

(źródło: opracowanie własne AGRO SHOW Bednary 2014 r.)

Oddzielną grupę wśród uniwersalnych siewników rzędowych stanowią siewniki pneumatyczne z centralnymi zespołami dozującymi oraz pneumatycznym transportem i rozdziałem nasion do redlic. Są to na ogół maszyny o dużych szerokościach roboczych, przeznaczone do większych gospodarstw rolnych. Przedstawicielem tej grupy jest siewnik Pronto DC firmy Horsch [39].



Rys. 2.6. Siewnik Pronto 3 - 6 DC firmy HORSCH [34]

Zastosowany w siewniku centralny dozownik nasion napędzany jest silnikiem elektrycznym. Pomiar prędkości roboczej dokonywany jest za pomocą czujnika radarowego, a sterowanie pracą siewnika odbywa się za pomocą jednej z trzech wersji terminala. Układ sterowania spełnia standard ISOBUS, co daje możliwość sterowania maszyną z dowolnego terminala spełniającego ten standard. Siewnik może posiadać bogate wyposażenie obejmujące np. jednoczesny wysiew nawozu startowego (mikrogranulat) i nasion, aplikator nawozu z dedykowaną redlicą nawozową PPF umożliwiającą wysiew nawozu w głębsze partie gleby (poniżej nasion), system pojedynkowania nasion z użyciem dozownika Funck montowanego na redlicy siewnej (maksymalne 130 nasion/s). Ponadto szereg opcji sterowania np. SectionControl (automatyczne wyłączanie sekcji na skraju pola, na uwrociach lub przy omijaniu przeszkód), VariableRate (zmiennie dawkowanie materiału siewnego i nawozów) [39, 42 86].

Analizując ofertę europejskich producentów siewników można stwierdzić, że znaczącą część rynku zajmują uniwersalne siewniki mechaniczne z zespołami wysiewającymi kołeczkowymi, bądź roweczkowymi, z grawitacyjnym transportem nasion do redlic. Rzadziej oferowane są siewniki mechaniczno-pneumatyczne. W segmencie dużych maszyn o szerokościach roboczych przekraczających 3 m wiodącą pozycję zajmują siewniki z pneumatycznym rozdziałem i transportem nasion do redlic. W większości rozwiązań napęd na zespoły wysiewające przekazywany jest z koła jezdnego lub ostrogowego poprzez przekładnię mechaniczną (bezstopniową). Coraz częściej stosowany jest również silnik elektryczny lub hydrauliczny, z układem sterowania, który na podstawie pomiaru prędkości roboczej siewnika i zadanej ilości wysiewu, reguluje obroty wałka wysiewającego [93].

Współczesne uniwersalne siewniki rzędowe stają się ważnym elementem systemu rolnictwa precyzyjnego umożliwiając zmiennie dawkowanie nasion i nawozów (uwzględniając np. zwięzłość i wilgotność gleby, zasobność w składniki pokarmowe [14, 25]) oraz zbierając informacje o zakładanej plantacji (np. mapa rozkładu nasion [9]).

3. Analiza prac dotyczących badań uniwersalnych siewników rzędowych

Zasadniczym celem prowadzenia upraw polowych jest uzyskanie wysokiego plonu dobrej jakości możliwie małym nakładem (środowiskowym, finansowym). W przypadku zbóż przeznaczonych na ziarno plon jest wypadkową liczby kłosów na jednostce powierzchni, liczby ziaren w kłosie i masy tysiąca ziaren. Osiągnięcie zadawalających efektów uwarunkowane jest wyborem odpowiedniego gatunku i odmiany (uwzględniając specyfikę siedliska) oraz zastosowaniem wymaganych zabiegów agrotechnicznych. Uzyskanie wysokiego plonu ziarna związane jest z budową łanu, a zwłaszcza jego wyrównaniem [83]. Kluczowy w tej kwestii jest prawidłowy zasiew zapewniający równe wschody i jednakowe warunki rozwoju roślin. Duże znaczenie w kształtowaniu plonu odgrywa również ilość wysiewu [26]. Już dwuprocentowe odstępstwa od wymaganej normy wysiewu mają niekorzystny wpływ na plon [50, 22]. Zwłaszcza zbyt gęsty siew zwiększa niebezpieczeństwo wylegania czy występowania chorób [18]. Ustalenie wymaganej normy i terminu wysiewu a następnie prawidłowe wykonanie siewu przy sprzyjających warunkach środowiskowych daje podstawę do oczekiwania zadawalających efektów gospodarczych.

Nasiona roślin uprawnych są mocno zróżnicowane pod względem własności fizyko-mechanicznych tak istotnych z punktu widzenia możliwości ich wysiewu. Niesie to za sobą pewne konsekwencje dla budowy uniwersalnych siewników rzędowych, przeznaczonych do ich wysiewu. Dozowanie nasion w tych siewnikach odbywa się najczęściej metodą objętościową a konstrukcja ich elementów roboczych jest kompromisem funkcjonalno-jakościowym.

Przegląd prac dotyczących badań uniwersalnych siewników rzędowych wskazuje na duże zainteresowanie zarówno krajowych jak i zagranicznych badaczy wpływem poszczególnych czynników konstrukcyjnych, regulacyjnych i eksploatacyjnych siewnika na jakość jego pracy. Kryterium oceny jest na ogół stałość dawkowania, równomierność poprzeczna i podłużna wysiewu, stopień uszkodzenia nasion oraz utrzymanie zadanej głębokości siewu i wskaźnik przykrycia nasion.

Do najważniejszych czynników konstrukcyjno-regulacyjnych można zaliczyć: budowę dozownika nasion, nastawę denka, wysokość szczeliny zasilającej, budowę przewodów nasiennych (długość, kąt pochylecia, zastosowany materiał i typ (spiralny, teleskopowy itp.)), budowę redlic, kształt zbiornika, konstrukcję mieszadła, konstrukcję napędu aparatów wysiewających (rodzaj przekładni, źródło napędu (koło ostrogowe, koło jezdne, napęd elektryczny, hydrauliczny)).

Do najczęściej analizowanych czynników eksploatacyjnych należą: prędkość robocza, ukształtowanie terenu (pochylenie siewnika w kierunku jazdy i poprzecznie do kierunku jazdy), rodzaj wysiewanych nasion oraz ich poziom w zbiorniku.

3.1. Wskaźniki oceny jakości pracy siewników rzędowych oraz przegląd metod realizacji badań eksperymentalnych

Do niedawna (17.08.2016) obowiązywała w Polsce norma PN-84/R-55050 [84] opisująca metody badań siewników polowych rzędowych uniwersalnych zbożowych i kombinowanych oraz siewników polowych rzutowych. Do dyspozycji badaczy jest również, zaakceptowana przez Polskę, norma ISO 7256/2-1984 [80], określająca metody badań siewników rzędowych. Wprowadzenie norm miało umożliwić ujednoczenie metod badawczych i w efekcie zapewnić stosowanie porównywalnych wskaźników jakości pracy siewników. Wymienione normy nie są jednak w pełni zgodne co do metodyki badań. Ponadto uzyskiwane wyniki, zwłaszcza nierównomierności podłużnej wysiewu, nie są dokładne i powtarzalne [71].

Z uwagi na brak metodyki oceny jakości pracy siewników, spełniającej wszystkie wymagania badaczy, powstało wiele prac, w których analizowane są stosowane metody badań [49, 91, 21, 50, 51, 52, 76] oraz proponowane nowe, mogące w większym stopniu pozwolić na rzetelną ocenę jakości pracy siewników [11, 73, 74, 19, 20, 76, 52, 65].

W pracy Koguta [52] uporządkowano i zestawiono wskaźniki jakości wysiewu nasion m.in. w oparciu o PN-84/R-55050 [84], ISO 7256/2-1984 [80] oraz zarys metodyki badań siewników Kanafojskiego [43]. Autor wyróżnił trzy grupy wskaźników jakości wysiewu charakteryzujące ilość, jakość i rozłożenie wysianych nasion. Wśród wskaźników charakteryzujących ilość wysianych nasion znalazły się m.in. wskaźniki jednostkowe, gdzie np. wydajność jednostkowa wg PN-84/R-55050 [84] określa masę wysianych nasion na jeden obrót wałka wysiewającego w g/obr a stałość ilości wysiewu - odchyłka ilości wysiewu od wartości średniej.

Według metodyki DLG [96] badania dokładności dozowania (utrzymania ilości wysiewu) prowadzone są punktowo dla kilku wariantów kombinacji wartości czynników eksploatacyjnych. Dla wysiewu pszenicy DLG stosuje dwie prędkości robocze, dwa poziomy nasion w zbiorniku i pięć pozycji nachylenia maszyny (płaska powierzchnia oraz pochylenie (20%) w prawo, lewo, do przodu i do tyłu). Dla wysiewu jęczmienia i rzepaku badania ograniczają się jedynie dla dwóch prędkości roboczych.

W ocenie Z. Koguta [52] najbardziej obiektywnym i dokładnym miernikiem zmienności ilości wysiewu przez poszczególne aparaty wysiewające na szerokości siewnika, jest wskaźnik nierównomierności poprzecznej wysiewu b [84], będący zgodnie z zasadami statystyki współczynnikiem zmienności (stosunkiem odchylenia standardowego do wartości średniej).

Do najczęściej określanych wskaźników jakości wysiewanych nasion należy wskaźnik uszkodzenia nasion, będący różnicą między udziałem procentowym nasion uszkodzonych przed i po wysiewie. Wśród wskaźników charakteryzujących rozłożenie wysiewanych nasion autor wymienia m.in. wskaźnik nierównomierności głębokości siewu i wskaźnik nierównomierności podłużnej określający procentowy rozrzut (współczynnik zmienności) liczby nasion w poszczególnych odcinakach dla pojedynczej redlicy [84, 80] lub wskaźnik nierównomierności rozmieszczenia określający w procentach rozrzut (współczynnik zmienności) odległości między nasionami [27].

Zgodnie z normą ISO 7256/2-1984 [80] pomiar równomierności podłużnej polega na wysianiu nasion na odcinku 30 m (ewentualnie na kilku odcinkach o łącznej długości 30 m) i zliczeniu liczby ziaren w przedziałach o długości 100 mm. Jako miarę wzdłużnej równomierności wysiewu stosuje się współczynnik zmienności. Wg PN-84/R-55050 [84] również nierównomierność podłużna określana jest współczynnikiem zmienności z tą różnicą, że pomiar odbywa się jednocześnie dla pięciu redlic na drodze zaledwie 2 m, co odpowiada 20 pomiarom dla każdej redlicy. Jeszcze inną metodykę badań nierównomierności podłużnej, będącą modyfikacją metodyki zawartej w normie ISO 7256/2-1984 [80], stosuje, akredytowane i notyfikowane w UE laboratorium badawcze DLG (Centrum Testowania Maszyn i Środków Produkcji w Groß-Umstadt). W raporcie z badań DLG [96] opisano metodykę oceny rozmieszczenia nasion w kierunku jazdy (rozkład wzdłużny) w warunkach polowych. Po wschodach dla wybranego rzędu wysiewu (podobnie jak w PN [84] i ISO [80]) zlicza się nasiona z poszczególnych przedziałów na odcinku pomiarowym. Jednak inaczej niż w wymienionych normach, stosuje się zróżnicowanie długości odcinków pomiarowych i przedziałów w zależności od wysiewanych nasion. Dla wysiewu pszenicy długość odcinka pomiarowego wynosi 15 m a przedziały mają długość 5 cm. W przypadku wysiewu rzepaku długość odcinka pomiarowego wynosi 30 m a przedziały mają długość 15 cm.

Według analiz Müllera wraz z zespołem [76, 77] stosowanie metodyki badań nierównomierności podłużnej wysiewu zgodnie z wytycznymi normy ISO 7256/2-1984 [80] jak i zmodyfikowanej metodyki stosowanej przez DLG (większa precyzja) nie gwarantuje uzyskania wystarczająco dokładnych wyników. Otrzymanie wyników z akceptowalnym poziomem ufności wymaga zwiększenia ilości pomiarów (nieakceptowalnej przy ręcznych metodach pomiaru) lub, jak proponują autorzy, zmiany metody pomiaru rozstawu nasion i użycie współczynnika zmienności rozstawu nasion jako miary równomierności.

Zastrzeżenia co do zasadności stosowania wskaźników do oceny wzdłużnego rozłożenia nasion przy siewie rzędownym, w postaci średniej arytmetycznej i wskaźnika nierównomierności (liczności nasion w poszczególnych przedziałach), przedstawił Kogut [51],

wskazując jako właściwsze stosowanie metodyki przyjętej do oceny siewu punktowego. Badania Koguta [51], prace Griepentroga [19, 20, 21] wskazują, że wzdłużne rozłożenie nasion wysiewanych techniką redlicową (oceniane rozkładem licznosci nasion w poszczególnych przedziałach) nie podlega rozkładowi normalnemu.

Rawa i Markowski w pracy [91] wykazali, że zastosowanie różnych formuł matematycznych do wyznaczania wartości wskaźnika nierównomierności dozowania (wg PN-84/R-55050 [84] oraz Kanafojskiego [43]) prowadzi do uzyskania odmiennych wniosków na temat wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na wartość wyznaczanego wskaźnika.

Postęp w dziedzinie elektroniki i mechatroniki niesie za sobą nowe możliwości, w zakresie oprzyrządowania stanowisk badawczych i opracowania nowych metod pomiarowych mogących wyeliminować szereg problemów i niedogodności w badaniach siewników.

Do oceny uszkodzeń nasion oraz wykrywania zanieczyszczeń zbóż mogą być wykorzystywane techniki wizyjne i sztuczne sieci neuronowe [95] pozwalające na skrócenie czasu niezbędnego do oceny jakości badanego materiału w porównaniu z metodami tradycyjnymi.

Markowski [71] przeprowadził szczegółowy przegląd i wszechstronne testy przydatności i skuteczności działania poszczególnych czujników przeznaczonych do wykrywania wysiewanych nasion. Zaproponował podział czujników na kontaktowe i bezkontaktowe. Czujniki kontaktowe (płytki piezoelektryczne, akustyczne) podczas pomiarów zakłócają strugę nasion i nie mogą być wykorzystane do kontroli jakości siewu w trakcie wykonywania zabiegu. Czujniki bezkontaktowe na ogół wykorzystują zjawiska fotoelektryczne lub systemy wizyjne. Na specjalnie zaprojektowanym stanowisku autor przeprowadził badania skuteczności funkcjonowania płytkowego czujnika piezoelektrycznego, czujnika fotoelektrycznego oraz równoległego i krzyżowego układu czujników fotoelektrycznych. Największą skuteczność rejestracji wysiewanych nasion kołeczkowym aparatem wysiewającym uzyskano dla krzyżowego układu czujników fotoelektrycznych (skuteczność na poziomie 76,0% - 84,8%). Przy siewie punktowym najlepsze wyniki uzyskał czujnik fotoelektryczny i krzyżowy układ czujników fotoelektrycznych (skuteczność ok. 95%). Skuteczność czujnika piezoelektrycznego wyniosła dla wysiewu kołeczkowym aparatem wysiewającym dla nasion pszenicy 79,2% a dla wyki 86,7% z zastrzeżeniem autora, że otrzymane wyniki są zawyżone z uwagi na zaobserwowane wykrywanie przez czujnik piezoelektryczny większej liczby nasion niż była faktycznie wysiewana.

Gierz [16] przeprowadził badania porównawcze trzech typów fotoelektrycznych czujników ziarna (dwóch własnej konstrukcji i jednego renomowanej firmy Dickey John). Badania miały na celu określenie błędów zliczania przy wysiewie ziaren pszenicy. Ziarna

podawano pojedynczo oraz po dwa lub trzy jednocześnie. Sprawdzano skuteczność zliczania (stosunek liczby nasion wykrytych do liczby nasion wysianych). Dla ziaren dozowanych pojedynczo najlepszy wynik uzyskał czujnik firmy Dickey John (99% skuteczności). Dla ziaren dozowanych potrójnie najlepszy wynik uzyskał jeden z opracowanych czujników (79,2% skuteczności).

Większą skuteczność uzyskał czujnik piezoelektryczny, który pracował wg specjalnej procedury opracowanej przez zespół Gierz i Paszkiewicz [15]. Testom poddano czujnik piezoelektryczny wykonany z folii PVDF. Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów nasion (jęczmienia i pszenżyta), na stanowisku badawczym symulującym wysiew siewnikiem rzędowym z pneumatycznym transportem nasion do redlic. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów opracowano i przetestowano algorytm liczenia wysiewanych nasion. Opracowany algorytm opiera się na porównaniu statystyk sygnałów (odchylenia standardowego) w sąsiednich oknach pomiarowych. Skuteczność zliczania, w większości przypadków pomiarów, wyniosła od 78% do 113% (fałszywe sygnały) wysianych nasion.

W badaniach laboratoryjnych uniwersalnych siewników rzędowych stosowane są często stanowiska badawcze wykorzystujące szybkie kamery do rejestracji procesu wysiewu i następnie oceny jakości wysiewu w oparciu o analizy komputerowe. Przykład takiego stanowiska przedstawił Karayel i inni [45] gdzie kamera została ustawiona pod redlicą prostopadle do kierunku jazdy siewnika lub zgodnie z kierunkiem jazdy jak zaproponował Navid [78]. W obu przypadkach badania wykazały poprawne działanie systemu do pomiaru odległości między nasionami. Weryfikacja uzyskanych wyników odbywała się z zastosowaniem klasycznej metody wysiewu na lepką taśmę.

Taśmę bez końca pokrytą lepką substancją zastosowali również Zarajczyk i Sobczak [100] w badaniach dotyczących jakości siewu nasion buraka ćwikłowego siewnikiem S071 Kruk.

Taśma z lepką powierzchnią znalazła również zastosowanie w badaniach jednorodności rozmieszczenia drobnych nasion (traw, kończyny, lucerny) [7], jednak w tym przypadku kamera rejestrowała położenie nasion na taśmie. W ten sposób zachowując klasyczne podejście do badań równomierności uzyskano możliwość zautomatyzowania zbierania danych i obróbki wyników.

Karimi i inni [46, 47] testowali przydatność czujnika akustycznego do wyznaczania odstępów między nasionami oraz wykrywania uszkodzeń nasion. System pomiarowy wykorzystywał mikrofon i kartę dźwiękową do wykrywania uderzeń nasion w płytkę pomiarową. Do akwizycji i obróbki danych zastosowano oprogramowanie Matlab. Dla obydwu

zastosowań wyniki były obiecujące, jednak autorzy zwracają uwagę na ograniczoną czułość czujnika i gorsze wyniki dla lżejszych nasion.

W ocenie jakości pracy siewników stosowane są również badania polowe powschodowe, dające pełen obraz efektów przeprowadzonych zabiegów agrotechnicznych – w tym siewu. To najskuteczniejsza metoda oceny utrzymania zadanej głębokości siewu ale również stosowana przy określaniu nierównomierność podłużnej wysiewu. Należy pamiętać, że nie ze wszystkich nasion skiełkują rośliny i błąd z tym związany należy zminimalizować uwzględniając w wynikach, siłę kiełkowania materiału siewnego [43, 45, 58]. Badania te w klasycznym podejściu są czaso- i pracochłonne. W celu zautomatyzowania tego procesu wykorzystywane są systemy wizyjne wspierane sztuczną inteligencją.

Do określenia indywidualnej lokalizacji rośliny na polu np. w celu określenia liczby roślin na jednostce powierzchni i ich rozmieszczenia Karimi i inni [48] opracowali system lokalizowania punktów wschodów roślin. Na podstawie uzyskanych wyników, stwierdzono, że opracowany system może dać wiarygodne wyniki dotyczące jakości dystrybucji i obsady roślin na polu (ok. 87% skuteczność w wykrywaniu wschodów).

Sposób na ocenę ogólnej jednorodności wschodów pszenicy i określenie obszarów bez wschodów zarówno dla siewu rzędowego jak i rozproszonego (rzutowego) przedstawił Liu wraz z zespołem [64]. W badaniach wykorzystano zdjęcia RGB powierzchni pola pozyskane za pomocą bezzałogowych statków powietrznych. Opracowana metoda oparta na analizie obrazu zapewniła nową i znacznie ulepszoną metodę efektywnego pomiaru jednorodności wschodów nasion pszenicy.

Również ze zdjęć RGB korzystał Zhao wraz z zespołem [101] do oceny plantacji rzepaku. Badania wykazały przydatność opracowanej metody m.in. do oceny powschodowej jakości siewu.

3.2. Studium prac badawczych wpływu poszczególnych czynników na równomierność wysiewu uniwersalnymi siewnikami rzędownymi

Prace dotyczące oceny jakości działania uniwersalnych siewników rzędownych zawierają liczne opisy badań polowych i laboratoryjnych ukierunkowanych na wyznaczenie wskaźników rozkładu położenia nasion w roli.

Lipiński [63] przeprowadził badania wysiewu nasion pszenicy w warunkach polowych siewnikiem mechanicznym z redlicami talerzowymi. Eksperyment przeprowadzono na terenie płaskim oraz pochyłym – „pod górę” i „z góry” dla trzech prędkości roboczych i trzech dawek wysiewu. Ocenę równomierności podłużnej przeprowadzono po wschodach roślin, według PN-84/R-55050 [84]. Według autora analizowane zmienne niezależne nie mają istotnego wpływu na kształtowanie się wartości wskaźnika nierównomierności podłużnej.

Markowski i współautorzy [67] przeprowadzili badania dotyczące wpływu typu i kąta odchylenia od pionu przewodu nasiennego oraz prędkości siewu na równomierność wysiewu nasion pszenżyta siewnikiem rzędowym z grawitacyjnym transportem nasion, wyposażonym w zespoły wysiewające typu kołeczkowego. Analizowano trzy typy przewodów nasiennych: spiralne, teleskopowe i elastyczne gładkie dla dwóch kątów odchylenia (5° i 48°), przy stałej ilości wysiewu i stałym rozstawie rzędów. Badania prowadzono dla pięciu prędkości w zakresie od 4 – 12 km/h. Analiza uzyskanych wyników nie wykazała istotnego wpływu ($\alpha = 0,05$) zmiennych niezależnych na wartość wskaźnika podłużnej nierównomierności wysiewu nasion.

W pracy [69] Markowski, Rawa, i Warych badali wpływ przewodu nasiennego, redlicy oraz prędkości siewu na nierównomierność podłużną wysiewu kołeczkowym zespołem wysiewającym nasion pszenicy. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów: wysiew bezpośrednio z aparatu wysiewającego, wysiew z aparatu za pośrednictwem przewodu nasiennego ustawionego pod kątem 23° oraz wysiew łącznie z przewodem nasiennym i redlicą. Stwierdzono, że przewód nasienny istotnie wpływa na poprawę równomierności wysiewu nasion; wpływ redlicy był nieistotny. Do podobnych wniosków doszli Markowski, Rawa, i Lipiński w pracy [68] gdzie dodatkowo analizowano wpływ szerokości międzyrzędzi, potwierdzając istotność wpływu tej wielkości na wartość wskaźnika nierównomierności.

Na podstawie przywołanych prac badawczych można wnioskować, że przewód nasienny, w przypadku objętościowych dozowników nasion (charakteryzujących się pulsacyjnym dozowaniem), poprawia równomierność podłużną wysiewu [60, 59] niezależnie od typu przewodu, jego kąta pochylenia (w zakresie analizowanej zmienności) i współpracy z redlicą.

Oddzielną kwestią jest ocena wpływu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych aparatu wysiewającego na jakość pracy siewnika.

Rawa, Markowski i Lipiński [88] badali wpływ prędkości obrotowej wałeczka wysiewającego i szerokości szczeliny roboczej w kołeczkowym zespole wysiewającym oraz szerokości międzyrzędzi i prędkości siewu na równomierność dozowania nasion pszenicy. Wykazano, że istotny wpływ (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) na równomierność dozowania nasion, ma tylko szerokość międzyrzędzi i prędkość obrotowa wałeczka wysiewającego. Do podobnych wniosków doszli Bondyra, Markowski i Rawa [5] badając wpływ szerokości międzyrzędzi, prędkości siewu oraz szerokości szczeliny wysiewającej na nierównomierność dozowania kołeczkowym zespołem wysiewającym nasiona pszenżyta.

Markowski [72] przeprowadził badania wpływu ilości wysiewu i prędkości siewu na równomierność podłużną wysiewu nasion żyta siewnikami rzędowymi z grawitacyjnym transportem nasion posiadającymi różne typy aparatów wysiewających (roweczkowy i kołeczkowy). Analiza wyników wykazała, że istotny wpływ ($\alpha = 0,05$) na nierównomierność

wysiewu nasion żyta ma tylko ilość wysiewu nasion roweczkowym zespołem wysiewającym. Dla dozownika kołeczkowego, żadna z przyjętych zmiennych niezależnych nie ma istotnego wpływu na nierównomierność podłużną wysiewu. Jednocześnie odnotowano istotną statystycznie różnicę w jakości wysiewu pomiędzy dozownikiem roweczkowym a kołeczkowym. Średnia nierównomierność wysiewu nasion wyniosła odpowiednio 0,47 i 0,52.

Mniej znaleziono wyników badań dotyczących oceny ilości wysiewu nasion w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

Zagadnieniem tym zajął się Kogut [50], przeprowadzając badania ilości wysiewu i nierównomierności poprzecznej w warunkach laboratoryjnych siewnika wyposażonego w kołeczkowy (dwusegmentowy) aparat wysiewający. Jako zmienne warunki eksploatacyjne przyjęto: trzy rodzaje nasion (drobne, średnie, grube), normę wysiewu, prędkość roboczą siewnika, pochylenie terenu w kierunku ruchu oraz w kierunku bocznym, a także stopień wypełnienia zbiornika materiałem siewnym. Stwierdzono istotne ($\alpha = 0,05$) zróżnicowanie w ilości wysiewanych nasion w stosunku do oczekiwanych norm wysiewu. Największe zmiany stwierdzono podczas pochylenia siewnika w kierunku jazdy. W odniesieniu do pracy na poziomym terenie pochylenie siewnika odpowiadające wjeździe na wzniesienie powoduje dla nasion drobnych wzrost ilości wysiewu o ok. 11%, natomiast przy pracy w dół stoku zmniejszenie ilości wysiewu o ok. 20%. Dla nasion średnich w obu przypadkach zmiany wynoszą po ok. 5%. Wpływ pozostałych czynników eksploatacyjnych na ilość wysiewu jest znacznie mniejszy. W zgodzie z powyższymi wnioskami pozostaje Grudnik w artykułach dla czasopisma Farmer [22, 23] oraz Correia wraz z zespołem w artykule [6].

Na jakość pracy siewnika ma również wpływ sposób napędu aparatów wysiewających. Kogut [51] przeprowadził badania wpływu parametrów przekładni krzywkowej (trzy warianty) na jakość wysiewu nasion drobnych, średnich i grubych kołeczkowym (dwusegmentowym) aparatem wysiewającym, rzędową techniką redlicową. Bezstopniowe przekładnie krzywkowe stosowane są w większości produkowanych obecnie uniwersalnych siewnikach rzędowych. Charakteryzują się one szerokim zakresem oraz łatwą regulacją przełożenia. Posiadają jednak wadę objawiającą się drganiami na wałku wyjściowym, spowodowanymi skokowym charakterem pracy przekładni [55]. W efekcie występuje pulsacyjny wysiew nasion. Producenci przekładni krzywkowych stosują różne rozwiązania konstrukcyjne (kształt krzywek, liczba biegni) w celu ograniczenia tego zjawiska. Kogut [51], na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdził m.in., że wysiew rzędowy z wykorzystaniem przekładni krzywkowych cechuje się dużą nierównomiernością wzdłużną rozłożenia nasion.

Oprócz badań empirycznych podejmowane są próby wykorzystania metod symulacyjnych do oceny pracy dozowników nasion. W artykule [66] Marcinkiewicz wraz z

zespołem przedstawili wyniki badań symulacyjnych czterech wersji aparatów wysiewających przeznaczonych dla uniwersalnych siewników rzędowych. Badania przeprowadzono przy użyciu komputerowego systemu symulacyjnego opartego na metodzie elementów dyskretnych (DEM). Badania miały na celu ocenę analizowanych rozwiązań pod kątem uzyskiwanej wydajności i równomierności wysiewu. Otrzymane wyniki dla jednej wersji aparatu wysiewającego zostały skonfrontowane z badaniami eksperymentalnymi. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przeprowadzonej symulacji komputerowej. Również z powodzeniem zastosowano metodę DEM do badań symulacyjnych podobnego konstrukcyjnie dozownika, przeznaczonego jednak do dozowania nawozów [2]. Otrzymane wyniki z symulacji i badań eksperymentalnych wykazały dużą zgodność i potwierdziły, że opracowany model DEM może być użyty do oceny wydajności i równomierności dozowania nawozów.

3.3. Podsumowanie

Podstawowym elementem roboczym siewnika, decydującym o jakości siewu jest aparat wysiewający [62, 70].

Na równomierność podłużną wysiewu największy wpływ mają cechy konstrukcyjno-technologiczne dozownika [70, 89] takie jak: wymiary geometryczne wałeczków, liczba kołeczków czy roweczków, ich kształt, wzajemne usytuowanie kołeczków, kąt pochylenia roweczków, kształt dna nastawnego itp. [8, 24, 44, 81]. Ponadto na równomierność podłużną wysiewu ma wpływ przewód nasienny (zwłaszcza jego długość) [60, 59] oraz sposób napędu aparatów wysiewających [51].

Wskaźnik nierównomierności poprzecznej, w przypadku uniwersalnych siewników rzędowych z indywidualnymi aparatami wysiewającymi do poszczególnych redlic, zależy głównie od dokładności wykonania i montażu elementów dozowników i ich rozmieszczenia na zbiorniku nasion. W przypadku dozowników roweczkowych dochodzi problem ich synchronizacji, czyli jednakowej nastawy czynnej długości wałka wysiewającego dla każdego aparatu. Jest to parametr istotny ale zależy tylko od dokładności wykonania siewnika.

Poza wpływem dokładności wykonania siewnika, na nierównomierność poprzeczną wysiewu wpływ mają również zmiany warunków jego eksploatacji. Należą do nich zmiany pochylenia siewnika, prędkości roboczej i poziomu nasion w zbiorniku [50].

Kolejnym wskaźnikiem jakości pracy siewnika jest dokładność dozowania (utrzymanie zadanej ilości wysiewu). Może być on określany dla ustalonych warunków pracy siewnika (stałość dawkowania) lub dla zmiennych warunków pracy siewnika przy niezmiennych nastawach regulacyjnych (odchyłka dawkowania).

Podobnie jak w przypadku wskaźnika nierównomierności poprzecznej wysiewu, na ilość wysiewu, przy niezmiennych nastawach regulacyjnych, mają wpływ zmiany kąta pochylenia siewnika, zmiany prędkości roboczej (skutkujące zmianą prędkości obrotowej wałka wysiewającego) oraz zmiany poziomu nasion w zbiorniku [50].

Kogut [52] zwrócił uwagę, że w wyniku realizacji badań siewników często wyznaczane są wskaźniki jakości ich pracy dla różnych warunków eksploatacji, celem oceny wpływu tych warunków na wartość badanego wskaźnika i stwierdził: *Znając (wartościowo) taki wpływ można, poprzez zmianę wartości parametrów eksploatacyjnych, minimalizować niekorzystne ich oddziaływanie na jakość wysiewu.* Zaproponował, że takim miernikiem może być wskaźnik przyrostu bezwzględnego i przyrostu względnego oraz pochodna funkcji przedstawiającej zależność wskaźnika jakości od np. zmian parametrów eksploatacyjnych.

Spośród analizowanych wskaźników równomierności wysiewu największą wrażliwością na zmienność czynników eksploatacyjnych charakteryzuje się wskaźnik stałości ilości wysiewu (odchyłka dozowania) oraz wskaźnik nierównomierności poprzecznej.

Ilość wysiewu Q_{ha} (norma wysiewu) powiązana jest bezpośrednio z wydajnością jednostkową dozownika q , jego prędkością obrotową n_w , szerokością międzyrzędzi p i prędkością roboczą siewnika v_s zgodnie z zależnością (3.1).

$$Q_{ha} = \frac{n_w \cdot q}{p \cdot v_s \cdot 6}, \text{ kg/ha} \quad (3.1)$$

gdzie: n_w - prędkość obrotowa wałka wysiewającego w obr/min,
 q - wydajność jednostkowa w g/obr,
 p - rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi) w m,
 v_s - prędkość robocza siewnika w m/s.

Uwzględniając powyższe, w przypadku zmiany wartości wydajności jednostkowej q na skutek zmieniających się czynników eksploatacyjnych, możliwe jest zmniejszenie tego wpływu na uzyskiwaną normę wysiewu, poprzez dostosowanie prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w .

W przypadku wskaźnika nierównomierności poprzecznej wysiewu, przy stosowanym powszechnie wspólnym napędzie wszystkich aparatów wysiewających, nie ma możliwości korekty błędów dozowania poszczególnych aparatów wysiewających.

Podjęmowane są próby poprawy jakości siewu poprzez zastosowanie w siewnikach układów sterowania, korzystających z czujników monitorujących dozowanie nasion i

pracujących w pętli sprzężenia zwrotnego, dążących do wysiania zadanej ilości nasion na jednostkę powierzchni.

Próbie taką podjęli Heege i Feldhaus [28] analizując możliwość zastosowania czujnika optycznego (równoległy układ czujników fotoelektrycznych) do zliczania nasion w uniwersalnym siewniku rzędowym. Autorzy wskazują na niekorzystny rozkład odległości między spadającymi nasionami, który odpowiada rozkładowi wykładniczemu. Najwyższa częstotliwość odległości między nasionami występuje dla odległości mniejszych od średniej, co daje wyraźne skupiska nasion, trudne do zliczenia przez czujniki optyczne (przy częstotliwości wysiewu 90 Hz czujnik nie wykrywał 17% nasion). Autorzy rozwiązali ten problem wprowadzając poprawkę ilości zliczanych nasion w obszarze, w którym czujnik generuje błędy. Wykazano, że możliwe jest uzyskanie odchylenia liczby zliczanych nasion poniżej 2,5% co pozwala na zastosowanie czujnika do sterowania wysiewem w trybie sprzężenia zwrotnego. Podobny czujnik opracowali i przetestowali w warunkach polowych Al-Mallahi i Kataoka [1] uzyskując, po niezbędnych korektach algorytmu, średni wskaźnik oszacowania liczby nasion na poziomie 95%.

Marquering i Scheufler [75] zwracają uwagę (w zgodzie z [28]) na błędy działania czujników opartych na bramkach optycznych i konieczności uwzględniania korekt na podstawie modeli regresyjnych. Autorzy zaproponowali zastosowanie dwóch matryc CCD (ustawionych prostopadle do siebie) i oświetlacza laserowego oraz opracowali system kompensacji zabrudzenia czujnika. Zastosowanie matryc CCD zdaniem autorów pozwala na znaczną poprawę precyzji i wykrywanie jednocześnie przechodzących przez czujnik nasion.

Niewątpliwą zaletą stosowania elektronicznych układów sterowania napędem aparatów wysiewających, pracujących w pętli sprzężenia zwrotnego, w oparciu o czujniki ilości wysiewu, jest wyeliminowanie potrzeby wykonywania tzw. próby kręconej oraz wysiew nasion w ilości (zgodnie z zaleceniami agrotechnicznymi) wyrażanej w liczbie nasion na jednostkę powierzchni.

Można jednak zauważyć, że zgodnie z przeprowadzoną analizą, proponowane do zastosowania optyczne czujniki wysiewu (bezkontaktowe) są wrażliwe na zabrudzenia (pył, zaprawa nasienna itp.) oraz wymagają okresowej kontroli i czyszczenia. Ponadto ich wskazania są pewnym przybliżeniem, bazującym na modelach regresyjnych, a osiągnięta skuteczność zliczania nasion najczęściej mieści się w przedziale 76%÷95%. Z kolei zastosowanie czujników kontaktowych (mniej wrażliwych na zabrudzenia) wiąże się z zakłóceniem przepływu strugi nasion, co w przypadku uniwersalnych mechanicznych siewników rzędowych z grawitacyjnym transportem nasion do redlic jest nie do przyjęcia.

Porównując spodziewany błąd ilości wysiewu przy zastosowaniu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym a naturalną zmiennością dawkowania siewnika (regulacja siewnika na bazie próby kręconej) można założyć, że tylko w przypadku pracy siewnika w dużym zakresie zmienności warunków eksploatacyjnych, korzyści z zastosowania sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, pozwolą uzyskać poprawę wskaźnika stałości dawkowania.

Możliwe jest również inne, pozbawione wyżej opisanych niedogodności, podejście do redukcji wpływu zmienności czynników eksploatacyjnych na równomierność wysiewu. Takim rozwiązaniem może być również wykorzystanie elektronicznego układu sterowania napędem aparatów wysiewających jednak z tą różnicą, że zamiast sterowania w układzie zamkniętym (z ujemnym sprzężeniem zwrotnym) może być zastosowany układ otwarty, bazujący na modelu matematycznym, który dla znanych wartości czynników zakłócających (np. pochylenie siewnika, prędkość obrotowa wałka wysiewającego oraz poziom nasion w zbiorniku) może być użyty do ich kompensacji.

Nie natrafiono na prace, w których podano powszechnie przyjęty model matematyczny, opisujący łączny wpływ czynników eksploatacyjnych siewnika, na dozowanie nasion przez aparaty wysiewające.

Zgodnie z wcześniejszymi badaniami Autora [82] taki model można wykorzystać do sterowania napędem aparatów wysiewających w celu poprawy jakości ich pracy.

Stosowane obecnie napędy elektryczne, hydrauliczne lub układy pozwalające na zdalną i bezstopniową korektę przełożenia w układach napędowych siewników, umożliwiają wdrożenie proponowanego układu sterowania. Ponadto wyeliminowanie przekładni krzywkowych charakteryzujących się nierównomierną pracą, kół napędowych narażonych na poślizg czy innych elementów przeniesienia napędu, może poprawić równomierność podłużną wysiewu.

Ciągły rozwój elektronicznych układów pomiarowych i oprogramowania daje nowe możliwości prowadzenia badań, które mogą być realizowane zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i polowych, w sposób ciągły, zwiększając dokładność badań oraz umożliwiając ocenę wrażliwości poszczególnych parametrów pracy siewnika na zmienne warunki eksploatacyjne.

Wskaźnik nierównomierności podłużnej wysiewu wyrażany procentowo jako iloraz odchylenia standardowego (liczności nasion w poszczególnych przedziałach PN-84/R-55050 [84], ISO 7256/2-1984 [80] lub odległości pomiędzy nasionami [27]) i wartości oczekiwanej (średniej liczności nasion w przedziale lub średniej odległości pomiędzy nasionami) nie

opisuje, występującej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, zmienności dawkowania typowych dozowników nasion. Jest to istotne, gdyż badania wskazują, że odchyłka od normy wysiewu o więcej niż 2% [50, 22] ma istotnie niekorzystny wpływ na uzyskiwane plony. Dlatego proponuje się uwzględnienie w ocenie jakości pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, wskaźnika uwzględniającego zmienność ilości wysiewu. Wskaźnikiem takim może być współczynnik zmienności ilości wysiewu na odcinku np. 5 m w odniesieniu do wartości oczekiwanej (zadanej dawki wysiewu). Badania powinny być przeprowadzone na odcinku pomiarowym obejmującym zmienność czynników eksploatacyjnych w zakresie zgodnym z przeznaczeniem siewnika (normalne warunki pracy). Innym rozwiązaniem może być modyfikacja wskaźnika nierównomierności podłużnej wysiewu wg PN-84/R-55050 [84] czy ISO 7256/2-1984 [80], poprzez zastąpienie wartości średniej z pomiaru wartością wynikającą z zadanej ilości wysiewu oraz wydłużenie przedziału zliczania nasion. Wybór odpowiedniego wskaźnika wymaga dalszych badań i analiz.

Kontrola stałości dawkowania będzie szczególnie istotna w trakcie badań siewników wyposażonych w układy sterujące ilością wysiewu na podstawie czujników wysiewu i sterowania ze sprzężeniem zwrotnym oraz w rozwiązaniach stosujących napęd aparatów wysiewających nie sprzęgnięty mechanicznie z podłożem (np. elektryczny, hydrauliczny).

4. Problem badawczy

Zmienne warunki eksploatacyjne występujące podczas wykonywania siewu siewnikami rzędowymi mają bardzo niekorzystny wpływ na parametry pracy siewnika wyrażane wskaźnikami jakości jego pracy. Konstruktorzy tych maszyn dążą do zniwelowania tych problemów, ale bez dobrego poznania ich istoty, charakteru i kierujących nimi wzajemnych zależności jest bardzo trudne do zrealizowania. Przeprowadzony przegląd literatury potwierdził, że są to zagadnienia naukowe stosunkowo słabo poznane. Wiedza naukowa na temat możliwości praktycznego zastosowania układów mechatronicznych do sterowania pracą zespołów wysiewających siewnika rzędowego w celu wyeliminowania błędów jego działania wymaga zatem uzupełnienia.

Zasadniczym celem pracy było **zmniejszenie niekorzystnego wpływu zmiennych warunków eksploatacyjnych na pracę siewnika**, co objawia się zmiennym dawkowaniem nasion, odbiegającym od zadanego. Za tą niedogodność w konstrukcji uniwersalnych siewników rzędowych odpowiada aparat wysiewający.

W związku z tym sformułowano następującą hipotezę:

Zastosowanie odpowiedniego algorytmu korygującego pracę aparatów wysiewających umożliwi poprawę jakości pracy siewnika (zmniejszenie odchyłeń ilości wysiewu) w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

W celu weryfikacji postawionej hipotezy należało osiągnąć następujące cele cząstkowe:

- opracowanie procedury badawczej, której przeprowadzenie pozwoli na badania wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na wartość wydatku jednostkowego,
- opracowanie modelu matematycznego opisującego wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na wartość wydajności jednostkowej dla dwóch konstrukcji aparatów wysiewających w celu porównania ich wrażliwości na zmienne warunki eksploatacyjne,
- opracowanie algorytmu korekcyjnego,
- implementacja algorytmu korekcyjnego w układzie sterowania stanowiska badawczego,
- przeprowadzenie badań weryfikacyjnych skuteczności działania algorytmu korekcyjnego.

Opracowane w ramach pracy założenia do budowy elektronicznego układu sterowania napędem dozowników nasion są uniwersalne i mogą zostać zastosowane w różnych siewnikach, po wcześniejszej identyfikacji wrażliwości zastosowanych aparatów wysiewających na zmienne warunki eksploatacyjne i zastosowaniu układu napędowego umożliwiającego dostosowanie prędkości obrotowej wałka wysiewającego (wyznaczonej na podstawie algorytmu korekcyjnego). Możliwości takie dają zastosowanie do napędu aparatów wysiewających silnika elektrycznego czy hydraulicznego lub, w przypadku napędu mechanicznego z zastosowaniem przekładni bezstopniowej, zdalna korekta przełożenia.

Występowanie zależności pomiędzy zmiennymi warunkami eksploatacji siewnika a wydatkiem jednostkowym dozowników nasion potwierdzają liczne badania publikowane w literaturze fachowej (patrz rozdział 3). Brak jest natomiast informacji na temat łącznego wpływu zmiennych warunków eksploatacji siewnika na wydajność jednostkową dozownika nasion. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami Autora [82] taką zależność można wykorzystać do sterowania napędem aparatów wysiewających w celu poprawy jakości ich pracy.

Założenia badawcze szczegółowe:

1. Łączny wpływ wybranych (istotnych) parametrów opisujących warunki eksploatacji siewnika (dla danego materiału siewnego) na wydajność jednostkową dozownika nasion można opisać za pomocą modelu matematycznego typu "czarna skrzynka".
2. Opracowany model matematyczny opisujący zależność wydatku jednostkowego dozownika dla danego materiału siewnego może zostać wykorzystany do opracowania algorytmu korekcyjnego poprawiającego jakość pracy dozownika.
3. Zastosowanie algorytmu korekcyjnego umożliwi poszerzenie zakresu "normalnych warunków pracy siewnika" (większy zakres prędkości roboczych, dopuszczalne większe pochylenie pola) przy zachowaniu wymaganej jakości jego pracy.
4. Zastosowanie algorytmu korekcyjnego umożliwi wykorzystanie prostszych (mniej wyrafinowanych, tańszych) konstrukcji aparatów wysiewających przy zachowaniu wymaganej jakości ich pracy.

5. Program i metodyka badań

5.1. Obiekty badań

W uniwersalnych rzędowych siewnikach polowych z mechanicznym rozdziałem nasion do poszczególnych redlic (patrz rozdział 2.2) stosowane są najczęściej dwa typy dozowników nasion: kołeczkowe (typu Siederslebena) lub roweczkowe (typu Hoosiera). W obu rozwiązaniach możemy wyodrębnić dwa podstawowe elementy robocze, wałek wysiewający i denko. Wałek wykonuje ruch obrotowy i przemieszcza nasiona napływające ze skrzyni nasiennej do szczeliny utworzonej pomiędzy denkiem a powierzchnią zewnętrzną wałka. W ten sposób nasiona w postaci strugi trafiają do przewodu nasiennego i osiadają w glebie w uformowanym przez redlicę rowku nasiennym [43, 92].

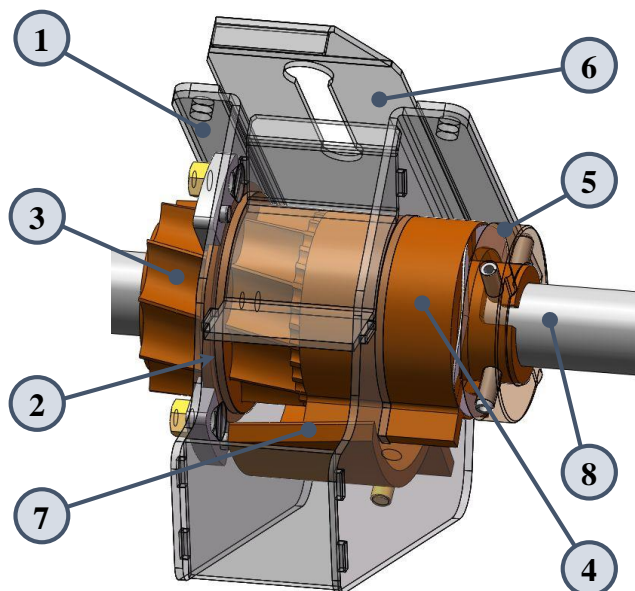
Do badań w ramach niniejszej pracy wytypowano dwa aparaty wysiewające. Po jednym z wyżej wymienionych typów. Dozowniki kołeczkowe jak i roweczkowe umożliwiają wysiew różnych gatunków nasion mieszczących się w kategoriach nasion drobnych, średnich i grubych. W przypadku dozowników kołeczkowych odbywa się to najczęściej poprzez zastosowanie oddzielnych segmentów (załączanych w zależności od potrzeb) przeznaczonych do wysiewu nasion grubych i średnich oraz oddzielnych do nasion drobnych [90]. Cechą charakterystyczną dozowników roweczkowych jest możliwość zmiany czynnej długości wałka wysiewającego. W efekcie uzyskiwana jest zmiana wydajności jednostkowej dozowania i dostosowanie organu roboczego do wymagań wysiewanych nasion. Wałki wysiewające stosowane w dozownikach roweczkowych występują w wersjach o stałym przekroju na całej długości roboczej jak również w wykonaniu kombinowanym dwusegmentowym, gdzie segment z głębokimi rowkami służy do wysiewu nasion grubych i średnich, a krótki segment z płytkimi rowkami lub kołeczkami do wysiewu nasion drobnych [92].

5.1.1. Roweczkowy aparat wysiewający typu Hoosiera

Roweczkowy aparat wysiewający, przedstawiony na rys. 5.1, został opracowany i przebadany na stanowisku badawczym w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych (obecnie Ł-PIMR) w ramach realizacji projektu INNOTECH-K2/IN2/64/182979/NCBR/12. Przeznaczony jest do wysiewu nasion drobnych, średnich i grubych. Posiada metalową obudowę (1), w której osadzony jest pierścień ślizgowy (2). Za dozowanie nasion odpowiada element wysiewający, składający się m.in. z dwusekcyjnego wałka wygarniającego (3) wraz z wypełniaczem gniazda (4) i pierścieniem zamykającym (5). Nad wałkiem wysiewającym

umieszczona jest zastawka (6), której otwarcie dostosowuje się do rodzaju wysiewanych nasion. Pod wałkiem wysiewającym umieszczone jest denko (7).

Kompletny wałek wysiewający może przesuwać się (razem z wałkiem napędowym (8)) wzdłuż swojej osi w pierścieniu ślizgowym (2), dzięki czemu zmienia się jego czynna długość a tym samym wydajność jednostkowa dozownika.

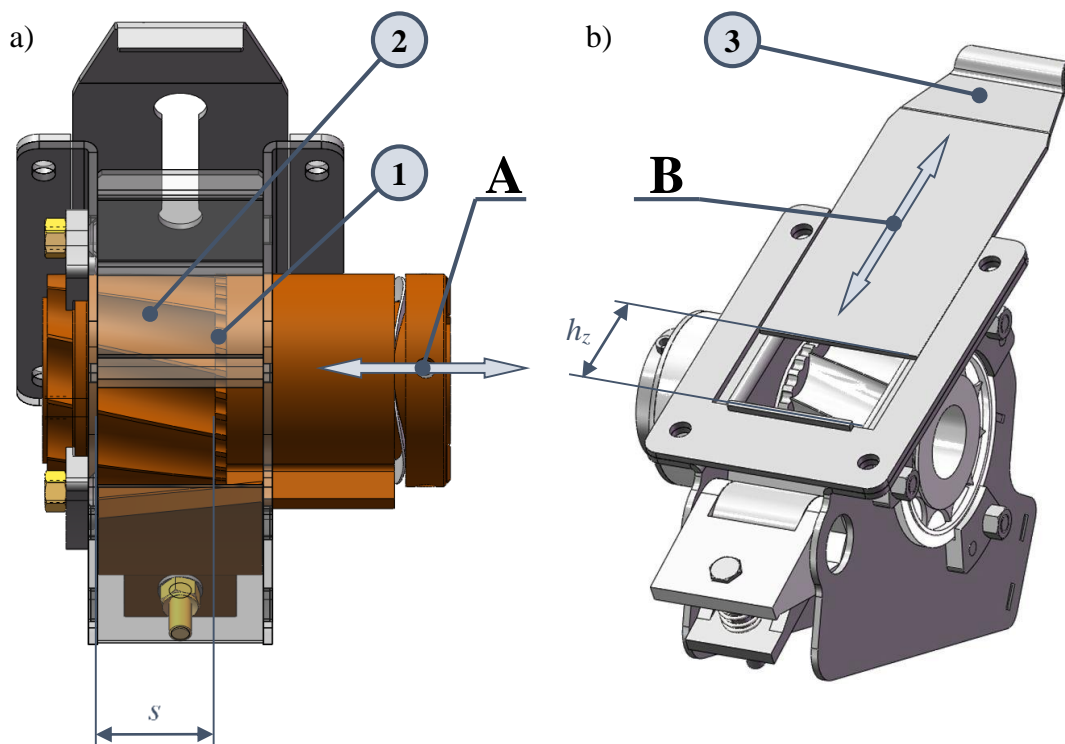


Rys. 5.1. Budowa roweczkowego aparatu wysiewającego

1- obudowa, 2- pierścień ślizgowy, 3- dwusekcyjny wałek wygarniający, 4- wypełniacz gniazda, 5- pierścień zamykający, 6- zastawka, 7- denko, 8- wałek napędowy (źródło: opracowanie własne)

W skrajnej pozycji dla ustawienia $s = 0$ (rys. 5.2 a) kontakt z nasionami ma tylko segment wałka z drobnymi roweczkami (1) - wysiew nasion drobnych. Przesunięcie wałka wysiewającego dla większych wartości parametru s powoduje zwiększenie czynnej długości wałka (2). Dla odpowiednich nastaw parametru s aparat wysiewający może wysiewać nasiona średnie lub grube przy regulowanym w pewnym zakresie wydatku jednostkowym.

Dopływ nasion ze zbiornika do wałka wygarniającego odbywa się w sposób grawitacyjny, poprzez okno w dnie zbiornika (rys. 5.2 b) o regulowanej wysokości. Wysokość szczeliny h_z uzależniona jest od rodzaju wysiewanych nasion i regulowana odpowiednim ustawieniem zastawki (3) zgodnie z zaleceniami producenta siewnika.



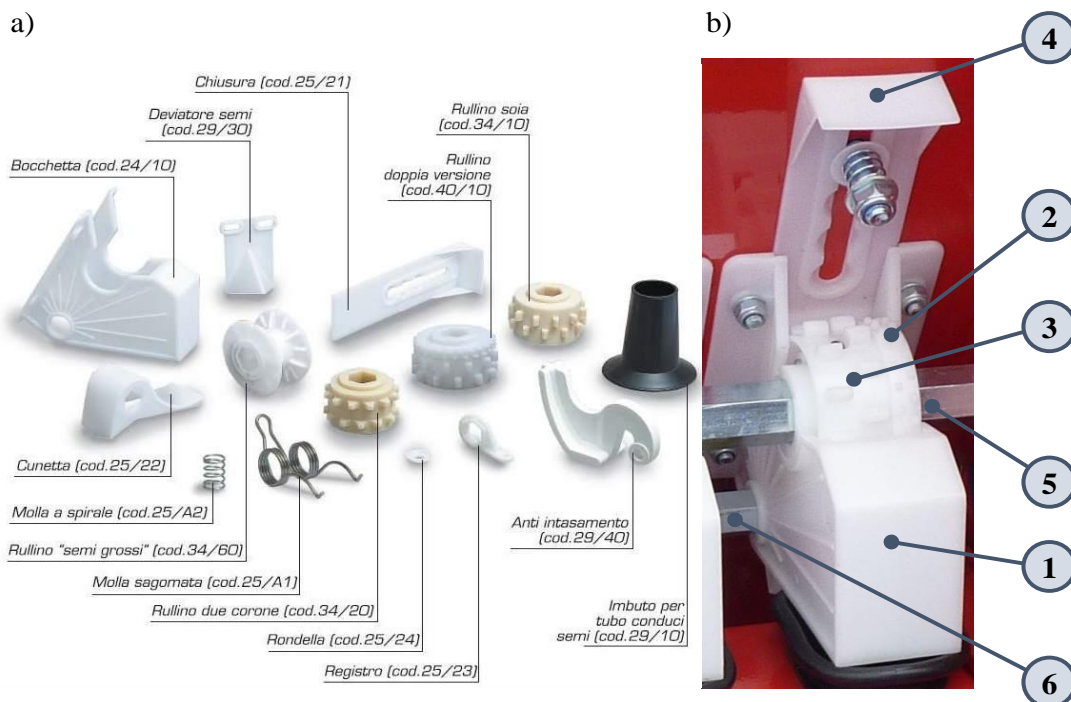
Rys. 5.2. Parametry nastawcze roweczkowego aparatu wysiewającego

a) nastawa wałka wysiewającego, b) nastawa wielkości szczeliny zasypowej
A- regulacja czynnej długości wałka wysiewającego, B- regulacja wysokości szczeliny zasypowej,
1- segment wałka wygarniającego do nasion drobnych, 2- segment wałka wygarniającego do nasion
średnich i grubych, 3- zastawka (źródło: opracowanie własne)

5.1.2. Kołeczkowy aparat wysiewający typu Siederslebena

Przy wyborze do celów badawczych konkretnego aparatu wysiewającego z kołeczkowym wałkiem wygarniającym brano pod uwagę powszechność jego występowania w siewnikach różnych producentów. Po przeanalizowaniu kilku propozycji, do badań wytypowano aparat wysiewający, produkowany przez włoską firmę Meccanoplast z dwusegmentowym wałkiem wygarniającym 40/10 (rys. 5.3).

Dozownik ten przeznaczony jest do wysiewu nasion drobnych i średnich. Wysiew nasion drobnych zapewnia sekcja wąska wałka wygarniającego (2) (rys. 5.3 b), która otrzymuje napęd bezpośrednio od wałka napędowego (5). Druga sekcja (szeroka) (3) osadzona jest na wałku napędowym (5) obrotowo. W trakcie wysiewu nasion drobnych sekcja ta nie otrzymuje napędu i nie bierze udziału w wysiewie. W celu umożliwienia wysiewu nasion średnich sekcja szeroka (3) sprzęgana jest z sekcją wąską (2) tak, aby obie sekcje otrzymywały napęd od wałka napędowego (5). W zależności od rodzaju wysiewanych nasion regulowana jest wielkość szczeliny zasypowej (za pomocą zastawki (4)) oraz pozycja denka zamocowanego na osi denek (6).



Rys. 5.3. Koleczkowy aparat wysiewający typu Siederslebena firmy Meccanoplast

- a) karta katalogowa aparatu wysiewającego [87], b) aparat wysiewający zamontowany na siewniku Cami Z2 firmy POM Brodnica (źródło: opracowanie własne AGRO SHOW Bednary 2013 r.)
1- obudowa, 2- sekcja wąska wałka wygarniającego, 3- sekcja szeroka wałka wygarniającego, 4- zastawka, 5- wałek napędowy, 6- oś denek

Aparaty wysiewające firmy Meccanoplast można spotkać m.in. w siewniku firmy Bomet (rys. 5.4), Agromaster (rys. 5.5) czy firmy POM Brodnica (JOTA Z, Cami Z2).



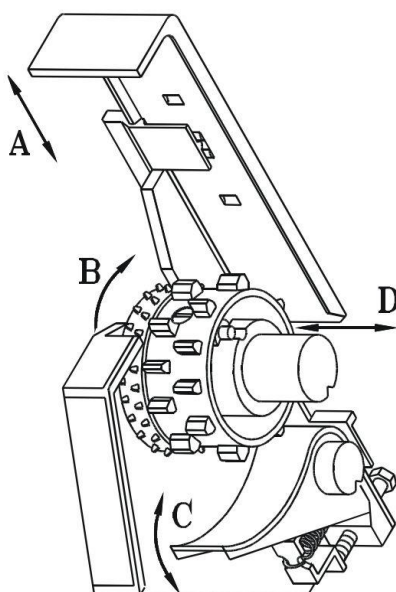
Rys. 5.4. Siewnik rzędowy uniwersalny Scorpius firmy Bomet [29]



Rys. 5.5. Siewnik rzędowy uniwersalny firmy Agromaster

(źródło: opracowanie własne AGRO SHOW Bednary 2014 r.)

Aparat wysiewający o podobnej konstrukcji i identycznej zasadzie działania stosuje w swoich siewnikach firma UNIA. Na rys. 5.6 przedstawiono sposób regulacji poszczególnych elementów regulacyjnych.



Rys. 5.6. Regulacja kołeczkowego aparatu wysiewającego na przykładzie siewnika POLONEZ firmy UNIA [38]

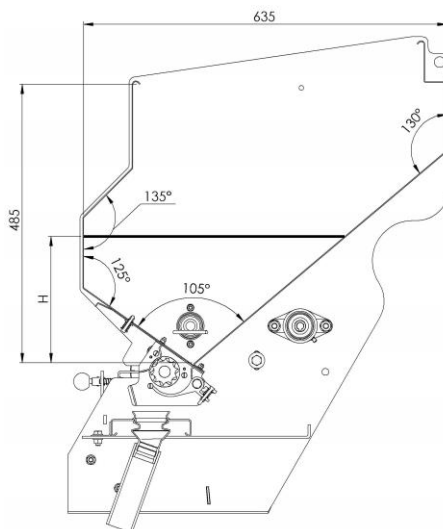
A- otwarcie zastawki, B- napęd wałka wygarniającego, C- ustawienie dna, D- sterowanie sprzężeniem sekcji wałków wygarniających

5.2. Budowa i zasada działania stanowiska badawczego

Przeprowadzenie badań aparatu wysiewającego, w celu identyfikacji wpływu zmiennych warunków eksploatacji siewnika na pracę dozownika nasion, w warunkach polowych było by bardzo pracochłonne i z uwagi na potrzebę realizacji szerokiego programu badań, praktycznie niemożliwe do przeprowadzenia (wymagane odcinki pola o stałym nachyleniu w zakresie od 0° ÷ 14° co np. 7° pozwalające na prowadzenie badań dla różnych kombinacji parametrów eksploatacyjnych). Z uwagi na powyższe opracowano i zbudowano stanowisko badawcze, pozwalające na symulowanie zmiennych warunków eksploatacji modelu siewnika z jednoczesną kontrolą istotnych parametrów jego pracy. Elektroniczny układ sterowania zarządzający pracą poszczególnych organów wykonawczych stanowiska badawczego umożliwił na przeprowadzenie w sposób automatyczny określonego scenariusza badań oraz implementację algorytmu korekcyjnego wpływającego na parametry napędu aparatu wysiewającego. W efekcie uzyskano możliwość przeprowadzenia badań identyfikacyjnych dozownika nasion z uwzględnieniem zmiennych warunków eksploatacyjnych oraz oceny poprawności działania algorytmu korekcyjnego.

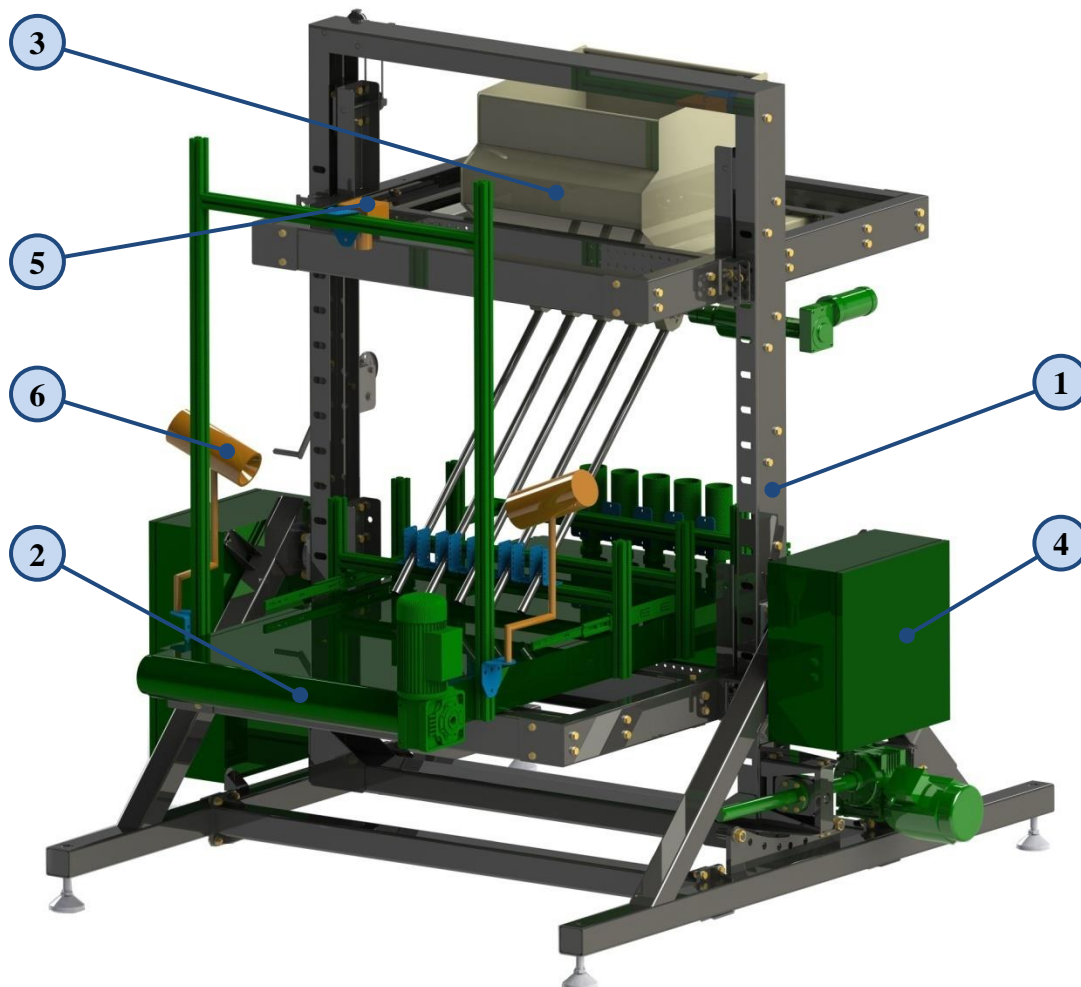
5.2.1. Budowa stanowiska badawczego

Na rysunku 5.8 pokazano budowę stanowiska badawczego. W jego skład wchodzi konstrukcja nośna (1), na której zamocowano model siewnika (3) wraz z napędem elektrycznym. Umieszczony przy stanowisku układ sterowania (4) kontroluje pracę stanowiska. Przenośnik taśmowy (2) pozwala na symulowanie przemieszczania maszyny względem podłoża. Nad taśmą przenośnika umieszczono szybko-klatkową kamerę (5). Stanowisko badawcze wyposażono również w oświetlenie (6) wspomagające pracę kamery. Kształt skrzyni nasiennej przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Kształt skrzyni nasiennej

H - poziom nasion w zbiorniku, (źródło: opracowanie własne)



Rys. 5.8. Budowa stanowiska badawczego

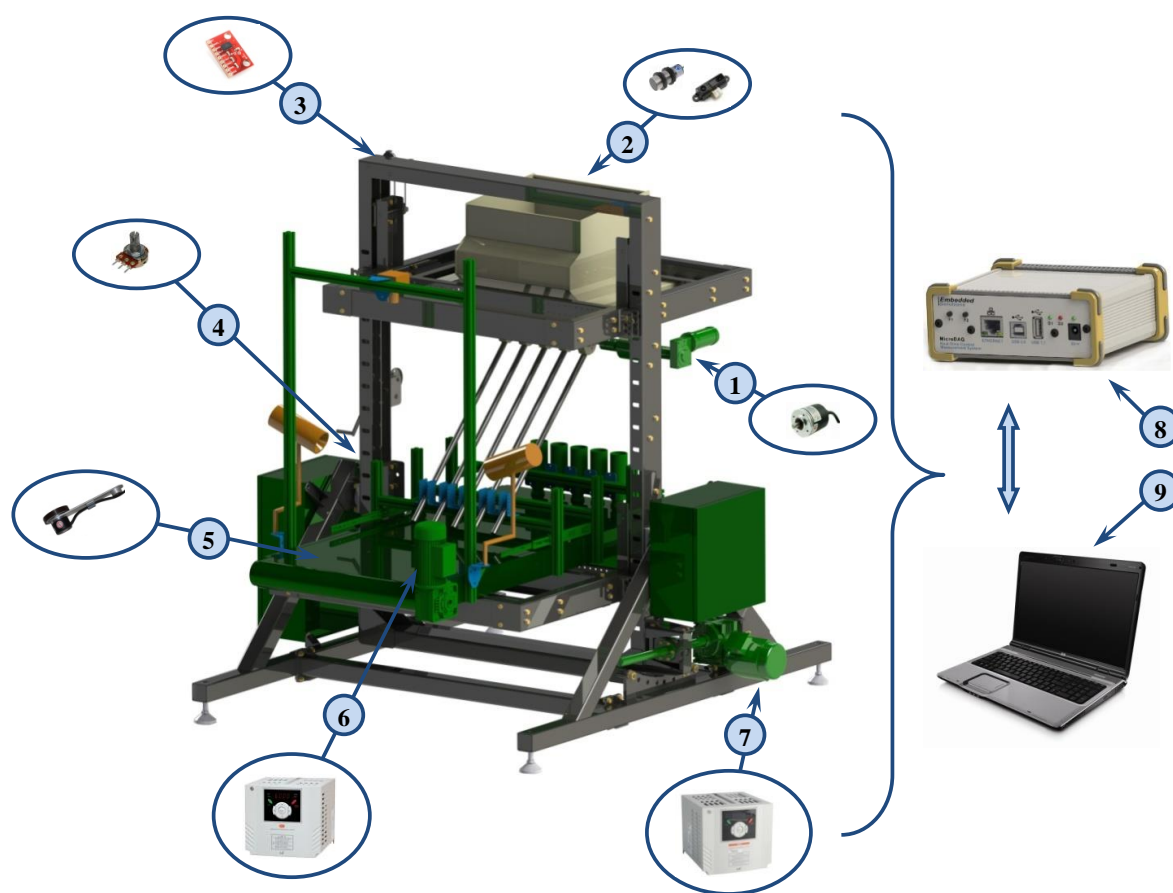
1- konstrukcja nośna, 2- przenośnik taśmowy, 3- model siewnika, 4- układ sterowania i kontroli,
5- rejestrator optyczny, 6- oświetlenie
(źródło: opracowanie własne)

5.2.2. Zasada działania stanowiska badawczego

Model siewnika pozwala na zamontowanie do pięciu aparatów wysiewających, które osadzone są na wspólnym wałku, otrzymującym napęd od silnika elektrycznego poprzez przekładnię łańcuchową. Oddzielny silnik i przekładnia łańcuchowa zapewniają niezależny napęd mieszadła znajdującego się w skrzyni nasiennej. Nasiana wygarniane przez aparaty wysiewające, w zależności od wariantu badań zbierane są od każdego dozownika do indywidualnych pojemników lub wysiewane na lepłą taśmę przenośnika (bezpośrednio z dozowników lub poprzez przewody nasienne). Istnieje również możliwość użycia innego typu czujników wpiętych w tor wysiewanych nasion. W przypadku badań z użyciem przenośnika taśmowego, jego taśma pokrywana jest lepłą substancją bezpośrednio przed strefą opadania nasion w celu zapobiegania przemieszczaniu się nasion po taśmie. Po zarejestrowaniu przez

kamerę wysianych nasion, taśma oczyszczana jest z nasion i nadmiaru lepkiej substancji za pomocą zgarniacza znajdującego się w dolnej części przenośnika.

Prędkość przesuwania taśmy jest kontrolowana za pomocą enkodera impulsowego, którego zadaniem jest również wyzwalanie szybkoobrotowej kamery rejestrującej kolejne fragmenty taśmy z wysianymi nasionami. Rysunek 5.9 przedstawia stanowisko badawcze z układem sterowania i kontroli pozwalającym na realizację założonego programu badań w tym: sterowanie prędkością przesuwu taśmy, regulowanie prędkości obrotowej wałka napędowego dozowników, ustawianie kąтового położenia siewnika. Sercem układu jest moduł rozwojowy MicroDAQ, który łączy w sobie właściwości karty kontrolno-pomiarowej z możliwością przetwarzania danych w czasie rzeczywistym, przy użyciu procesora DSP.



Rys. 5.9. Układ sterowania i kontroli

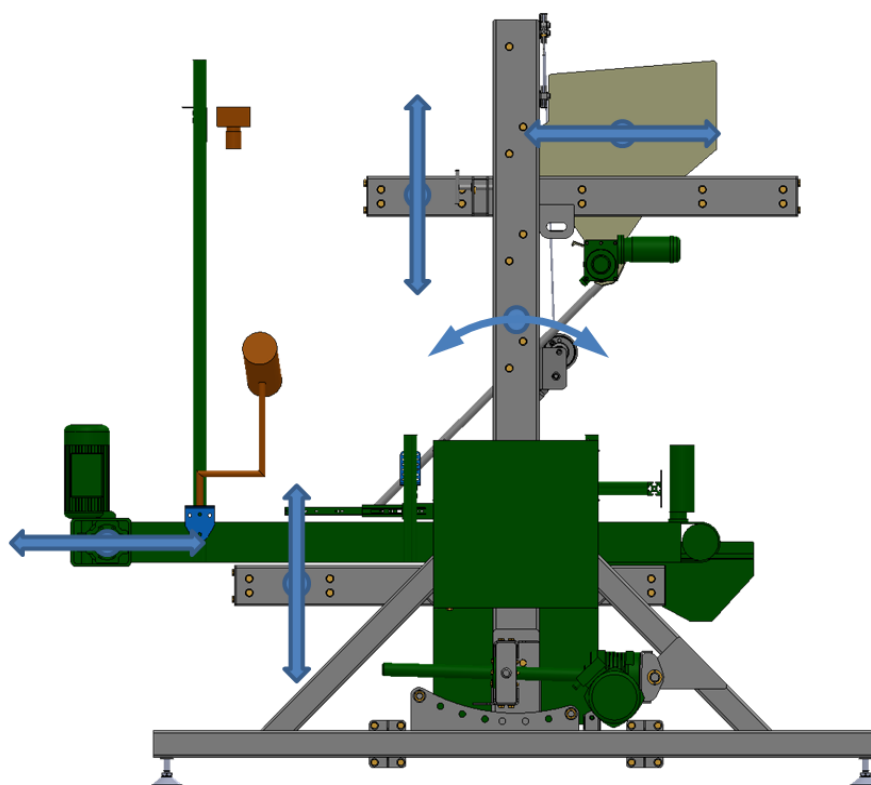
1 – czujnik kontroli wałka napędowego dozowników; 2 – czujnik poziomu nasion w skrzyni nasiennej modelu siewnika; 3 – czujnik pochylenia siewnika; 4 – czujnik kąta pochylenia ramy stanowiska; 5 – czujnik prędkości taśmy przenośnika; 6 – falownik sterujący silnikiem przenośnika taśmowego; 7 – falownik sterujący silnikiem dźwignika śrubowego (zmiana kąta pochylenia ramy stanowiska); 8 – otwarty system kontrolno-pomiarowy MicroDAQ; 9 – komputer wraz z oprogramowaniem narzędziowym
(źródło: opracowanie własne)

Moduł obsługiwany jest z poziomu oprogramowania narzędziowego Matlab-Simulink. Wejścia oraz wyjścia modułu reprezentowane są w Simulinku poprzez tzw. instrumenty wirtualne. Do wejść pomiarowych modułu dołączone są zastosowane na stanowisku czujniki.

Układ prowadzi na bieżąco odczyt z tych wejść, przetwarza odczytane dane, prezentuje wyniki na wirtualnym panelu oraz wpływa w określony sposób na przebieg samego procesu wysyłając odpowiednie sygnały sterujące do urządzeń wykonawczych.

5.2.3. Możliwości nastawcze stanowiska

Stanowisko badawcze posiada szereg regulacji wzajemnego położenia poszczególnych zespołów i tym samym umożliwia prowadzenie badań dla wielu konfiguracji stanowiska i z użyciem kilku metod badawczych. Rysunek 5.10 przedstawia możliwe ruchy nastawne stanowiska.

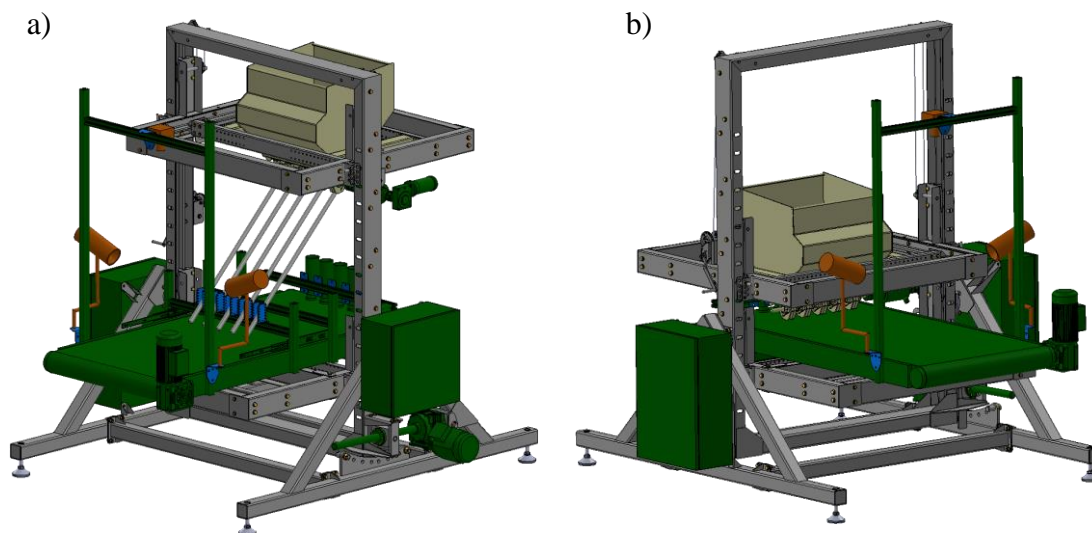


Rys. 5.10. Możliwości nastawcze stanowiska

(źródło: opracowanie własne)

Możliwa jest ręczna (przy użyciu wciągarki linowej) regulacja pionowej pozycji modelu siewnika oraz przenośnika taśmowego. Ponadto zarówno model siewnika jak i przenośnik mogą być wzajemnie przemieszczane w kierunku poziomym. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie badań wysiewu bezpośrednio z dozowników nasion lub z użyciem przewodów nasiennych (ustawionych pod różnym kątem) (rys. 5.11).

Regulacja kąta pochylecia modelu siewnika wraz z przenośnikiem taśmowym (symulacja pracy siewnika na stoku) odbywa się za pomocą dźwignika śrubowego, napędzanego silnikiem elektrycznym prądu przemiennego.



Rys. 5.11. Stanowisko badawcze – warianty badań z wysiewem na taśmę

a) wysiew poprzez przewody nasienne, b) wysiew bezpośrednio z dozownika
(źródło: opracowanie własne)

Poniżej przedstawiono przykładowe konfiguracje stanowiska badawczego wykorzystywane w trakcie badań eksperymentalnych modelu siewnika.



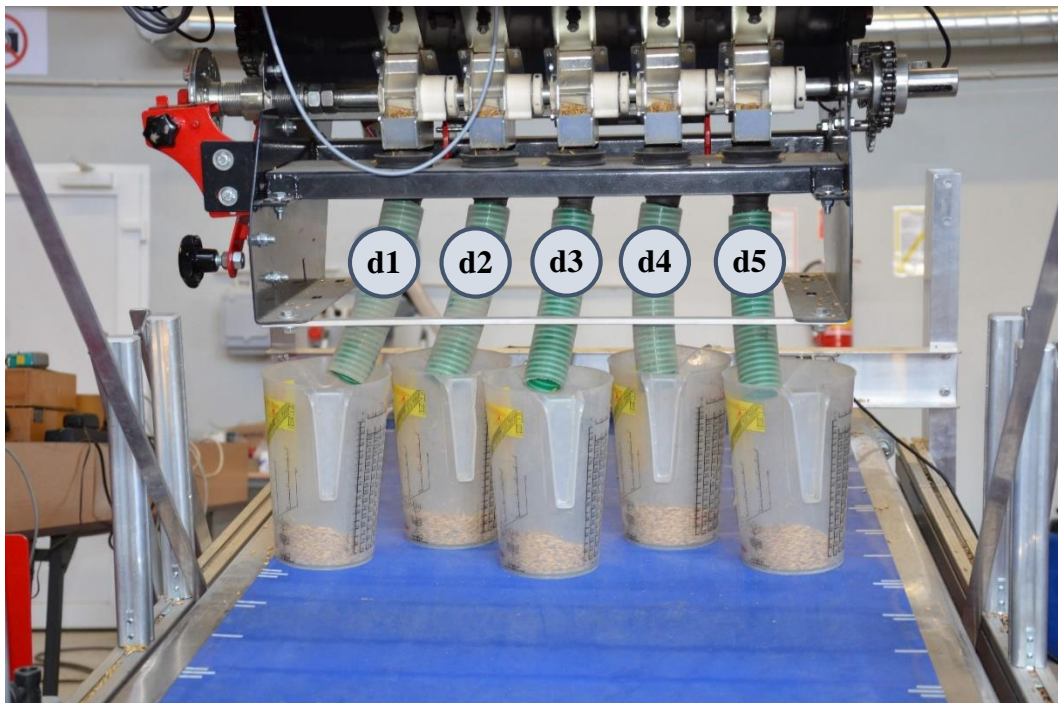
Rys. 5.12 Stanowisko badawcze w konfiguracji do optycznej rejestracji wysianych nasion

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 5.13 Stanowisko badawcze w konfiguracji do rejestracji wysianych nasion czujnikiem piezoelektrycznym

(źródło: opracowanie własne)



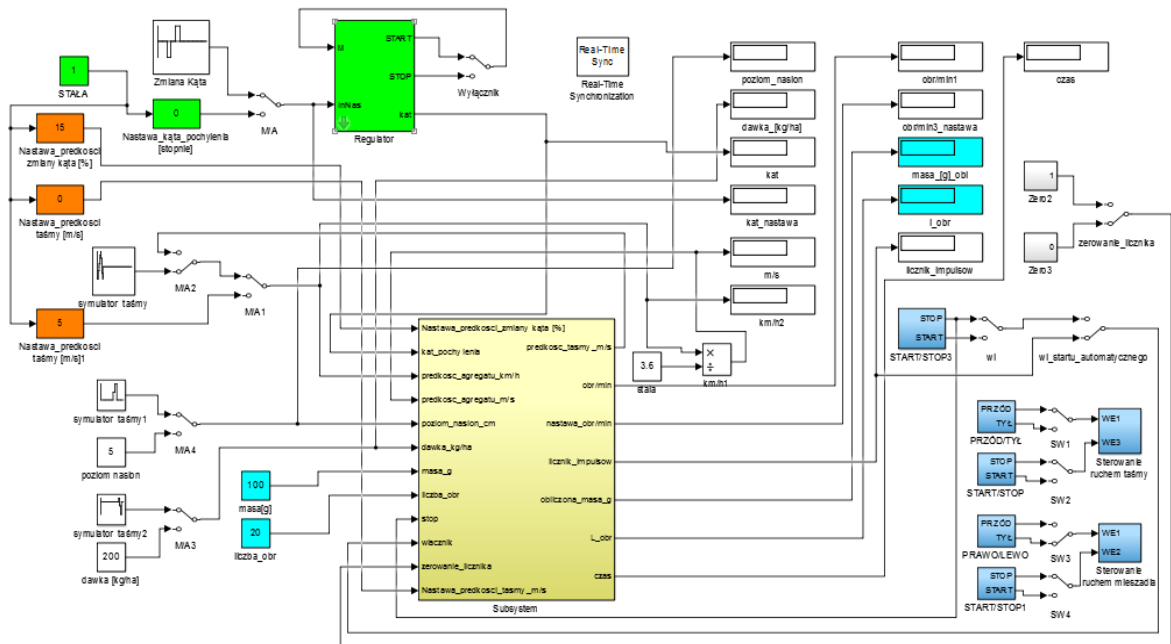
Rys. 5.14 Stanowisko badawcze w konfiguracji do klasycznych pomiarów wagowych

d1 ÷ d5 – oznaczenie dozowników nasion

(źródło: opracowanie własne)

5.2.4. Oprogramowanie do sterowania stanowiskiem badawczym

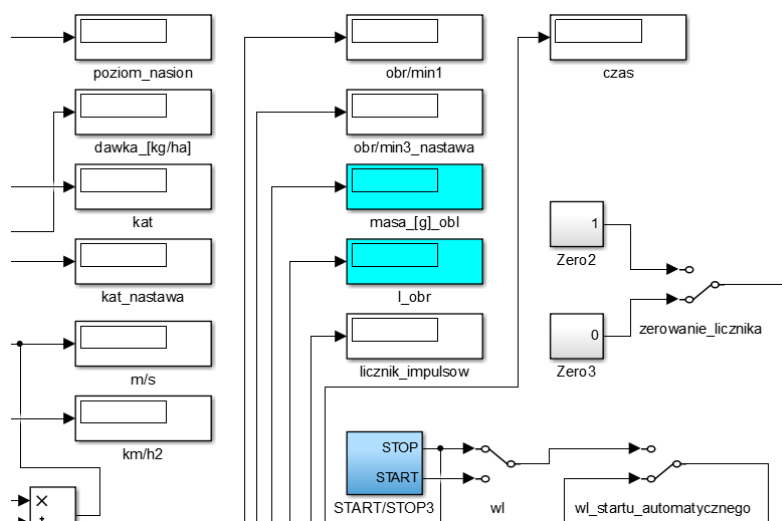
Sterowanie laboratoryjnym stanowiskiem badania siewników odbywa się za pomocą programu MATLAB z modułem SIMULINK. Na rysunku 5.15 pokazano okno aplikacji sterującej stanowiskiem badawczym z widocznym schematem struktury programu. Okno służy do wprowadzania wartości nastaw eksperymentu, jak również umożliwia odczyt bieżących parametrów pracy stanowiska.



Rys. 5.15. Schemat aplikacji sterującej stanowiskiem badawczym

(źródło: opracowanie własne)

Rysunek 5.16 przedstawia blok monitorujący parametry pracy stanowiska badawczego.

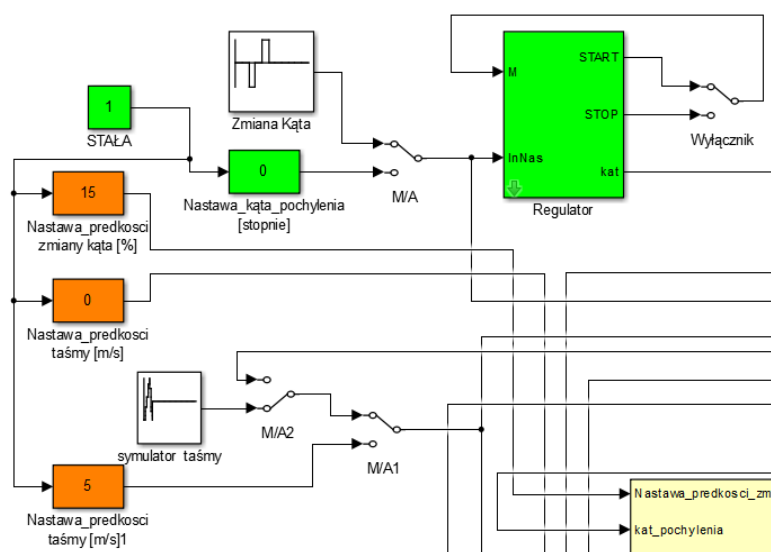


Rys. 5.16. Fragment interfejsu z polami wyświetlającymi informacje o nastawach i parametrach pracy

(źródło: opracowanie własne)

Zawiera on informacje między innymi o poziomie nasion w zbiorniku, ustawionej dawce wysiewu, kącie pochylenia skrzyni nasiennej, prędkości obrotowej wałka wysiewającego. Umożliwia również włączanie procesu badawczego, ręczne lub automatyczne, poprzez generowane impulsy.

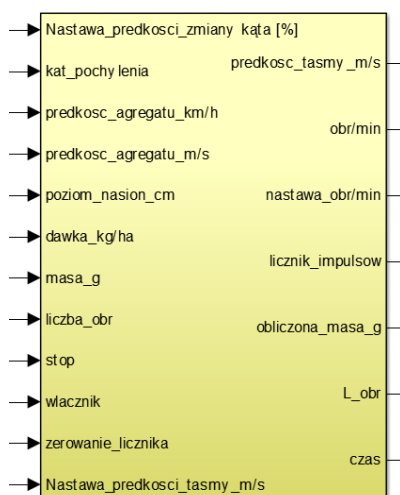
Oprócz stałej wartości nastawy danego parametru możliwe są również wartości zmienne w czasie, tworzące tzw. rampę, którą ustawia operator określając czas oraz zadaną wartość. Na rysunku 5.17 przedstawiono sposób ustawienia prędkości taśmy oraz zmiany kąta pochylenia modelu siewnika.



Rys. 5.17. Widok nastaw prędkości taśmy oraz prędkości kątowej i wartości zmian kąta pochylenia skrzyni nasiennej

(źródło: opracowanie własne)

Na rysunku 5.18 pokazano główny blok sterujący wraz z jego wyprowadzeniami. Jest to centralna jednostka realizująca szereg operacji związanych ze sterowaniem pracą stanowiska.



Rys. 5.18. Widok wyprowadzeń wejściowych oraz wyjściowych głównego bloku sterującego

(źródło: opracowanie własne)

5.3. Czynniki zależne, niezależne oraz nastawy regulacyjne dozowników nasion

Obiektem badań jest naturalny układ fizyczny odpowiedzialny w siewniku za dozowanie nasion. Jest to układ rzeczywisty, którego zachowanie opisuje zbiór czynników przedstawiony w tab. 5.1. Kombinacje czynników wejściowych stałych definiują warianty obiektów badań.

Tab. 5.1. Czynniki doświadczenia

Czynniki wyjściowe - zmienne zależne		
Nazwa czynnika	Symbol	Uwagi
Wydajność jednostkowa dozownika nasion	q	Masa wysiewanych nasion na 1 obrót wałka wysiewającego, g/obr
Czynniki wejściowe - stałe		
Nazwa czynnika	Symbol	Uwagi
Typ dozownika	$Typ R$	Dozownik roweczkowy (typu Hoosiera)
	$Typ K$	Dozownik kołeczkowy (typu Siederslebena)
Rodzaj nasion	$Pszemca$	Badania z dozownikiem: $Typ R$ i $Typ K$
	$Jęczmień$	Badania z dozownikiem: $Typ R$
	$Owies$	Badania z dozownikiem: $Typ R$
	$Rzepak$	Badania z dozownikiem: $Typ R$
Kształt skrzyni nasiennej	-	1 wariant (opis w rozdziale 5.2)
Wysokość szczeliny zasypowej (otwarcie zastawki)	h_z	Wysokość szczeliny ustalana zgodnie z wymaganiami dla danego dozownika i rodzaju wysiewanych nasion
Wysokość szczeliny wysiewającej (ustawienie denka)	h_d	Wysokość szczeliny ustalana zgodnie z wymaganiami dla danego rodzaju nasion
Rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi)	p	Rozstaw rzędów redlic zgodny z wymaganiami agrotechnicznymi dla danego rodzaju uprawy
Ilość wysiewu (norma wysiewu)	Q_{ha}	Zalecana ilość wysiewu dla danego rodzaju nasion na podstawie wymagań agrotechnicznych
Kąt pochylenia siewnika na bok	γ	Dla wszystkich wariantów badań $\gamma = 0^\circ$
Czynna długość wałka wygarniającego	s	Czynna długość wałka wygarniającego dla nasion średnich i grubych (tylko dozownik Typ R)
Czynniki wejściowe - zmienne		
Nazwa czynnika	Symbol	Uwagi
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego	n_w	
Kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy	β	Wartość dodatnia przy wjeździe na wzniesienie
Poziom nasion w zbiorniku	H	Wysokość słupa nasion (patrz rys. 5.7)
Czynniki wejściowe - zakłócające		
Nazwa czynnika	Symbol	Uwagi
Drgania siewnika	h_1	Związane z przemieszczaniem się agregatu ciągnik – siewnik po nierównościach terenu
Zużycie elementów mechanicznych	h_2	
Niejednorodność materiału siewnego	h_3	
Losowe fluktuacje parametrów nastawczych	h_4	

(źródło: opracowanie własne)

Wyboru czynników wejściowych niezależnych dokonano w oparciu o przedstawioną w rozdziale 3.2 analizę wyników prac badawczych oraz na podstawie wniosków zawartych w rozdziale 3.3.

Do badań wytypowano nasiona czterech rodzajów roślin (tab. 5.1). Przy wyborze brano pod uwagę udział poszczególnych upraw w strukturze zasiewów i różnorodność ich nasion pod względem cech fizyko-mechanicznych. Zgodnie z danymi GUS [17] w 2019 roku uprawy pszenicy, jęczmienia, owsa, i rzepaku stanowiły odpowiednio 23%, 8,9%, 4,6% i 8% procent zasiewów ogółem.

Wartości poszczególnych czynników niezależnych zarówno stałych jak i zmiennych oraz ewentualnie zakresy ich zmienności wyznaczono w oparciu o zalecenia agrotechniczne, zalecane nastawy poszczególnych elementów regulacyjnych siewnika, możliwości nastawcze stanowiska badawczego oraz wyniki uzyskane z badań rozpoznawczych.

Nastawy dozowników nasion takie jak wysokość szczeliny zasypowej (otwarcie zastawki) i wysokość szczeliny wysiewającej (ustawienie denka) uzależnione są od rodzaju wysiewanych nasion.

Dla roweczkowego aparatu wysiewającego przyjęto wysokość szczeliny zasypowej odpowiednio $h_z = 35$ mm dla wysiewu nasion średnich (pszenica, owies i jęczmień) lub $h_z = 28$ mm dla wysiewu nasion drobnych (rzepaku). Wysokość szczeliny wysiewającej zarówno dla nasion średnich jak i drobnych wynosi $h_d = 0$ mm (denko oparte o wypełniacz gniazda (4) rys. 5.1).

Dla kołeczkowego aparatu wysiewającego (wysiew pszenicy) przyjęto wysokość szczeliny zasypowej $h_z = 35$ mm a wysokość szczeliny wysiewającej $h_d = 1$ mm (odległość denka od czoła kołeczków).

Pozostałe wartości czynników zdefiniowano w programach poszczególnych serii badań.

5.4. Program badań rozpoznawczych

Badaniom poddano model siewnika, stanowiący wycinek (obejmujący 5 aparatów wysiewających) prototypowej konstrukcji siewnika, opracowanej w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych. Przeznaczone do badań, roweczkowe aparaty wysiewające, są również rozwiązaniami prototypowymi, wykonanymi w technologii druku 3D. Z uwagi na brak danych dotyczących parametrów pracy modelu siewnika z badanymi aparatami wysiewającymi, konieczne było przeprowadzenie wstępnych badań rozpoznawczych.

W tym celu przeprowadzono, dla roweczkowych aparatów wysiewających, badania wydatku jednostkowego w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego ($s = 6$ mm ÷ 33 mm). Badania dla nasion pszenicy, owsa i jęczmienia przeprowadzono przy stałej prędkości

obrotowej wałka wysiewającego ($n_w = 35$ obr/min) i ustawieniu modelu siewnika odpowiadającemu pracy na płaskim poziomym polu ($\beta = \gamma = 0^\circ$). Poziom nasion w zbiorniku wynosił $H = 25$ cm z wyjątkiem badań dla rzepaku gdzie, poziom nasion wynosił 19 cm a prędkość obrotowa wałka wysiewającego 26 obr/min.

W kolejnym kroku przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę zależności wydajności jednostkowej dozownika od zmian wartości poszczególnych czynników eksploatacyjnych (przy niezmiennych wartościach pozostałych czynników) dla siewu pszenicy.

W przypadku roweczkowego aparatu wysiewającego badania przeprowadzono dla 3 poziomów wartości poszczególnych czynników eksploatacyjnych:

- kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy $\beta = -10^\circ; 0^\circ; 10^\circ$,
- prędkość obrotowa wałka wysiewającego $n_w = 10$ obr/min; 30 obr/min; 50 obr/min,
- poziom nasion w zbiorniku $H = 10$ cm; 25 cm; 40 cm.

Dla kołeczkowego aparatu wysiewającego badania przeprowadzono również dla wysiewu nasion pszenicy, a zakres zmienności poszczególnych czynników eksploatacyjnych wynosił:

- kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy $\beta = -12^\circ \div 18^\circ$,
- prędkość obrotowa wałka wysiewającego $n_w = 5$ obr/min \div 60 obr/min,
- poziom nasion w zbiorniku $H = 6$ cm \div 46 cm.

Dodatkowo dla roweczkowego aparatu wysiewającego przeprowadzono badania zależności wydajności jednostkowej dozownika od drgań siewnika dla siewu pszenicy – zakres generowanych drgań konstrukcji wynosił od 0 Hz do 100 Hz.

Wyniki badań wydajności jednostkowej roweczkowych aparatów wysiewających stanowią średnią arytmetyczną z pięciu dozowników. Dla kołeczkowego aparatu wysiewającego badania wykonywano na jednym dozowniku, gdzie wynik stanowiła średnia arytmetyczna z trzech powtórzeń eksperymentu.

5.5. Program badań wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydatku jednostkowego dozownika

Badania eksperymentalne wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydatku jednostkowego dozownika przeprowadzono dwufazowo. W pierwszej fazie sprawdzono istotność wpływu wartości analizowanych czynników niezależnych na wartość wydatku jednostkowego dozownika nasion. W drugiej fazie, po uzyskaniu wyników istotności wpływu badanych czynników, przeprowadzono właściwe badania, mające na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej aparatu wysiewającego.

Badania dla roweczkowego aparatu wysiewającego przeprowadzono dla pięciu kombinacji stałych czynników wejściowych.

Na podstawie wymagań agrotechnicznych dotyczących siewu poszczególnych rodzajów nasion [62, 43, 99] (ilość wysiewu, szerokość międzyrzędzi) oraz przeprowadzonych badań rozpoznawczych, przyjmując zakres prędkości roboczych siewnika $v_s = 4 \text{ km/h} \div 16 \text{ km/h}$ oraz zakres prędkości obrotowych wałka wysiewającego $n_w = 10 \text{ obr/min} \div 50 \text{ obr/min}$, wyznaczono czynną długość wałka wysiewającego, dla której wydajność jednostkowa dozownika zapewni wysiew zadanej ilości wysiewu dla przyjętych warunków pracy siewnika. W trakcie badań poziom nasion w zbiorniku przyjmował wartości z przedziału $H = 10 \text{ cm} \div 40 \text{ cm}$ (z wyjątkiem wysiewu rzepaku, gdzie $H = 10 \text{ cm} \div 17 \text{ cm}$) a kąt pochylenia siewnika ustawiano w przedziale $\beta = -14^\circ \div 14^\circ$. Zestawienie parametrów wysiewu dla poszczególnych wariantów badań roweczkowego aparatu wysiewającego, wraz z wyznaczoną dla nich, czynną długością wałka wysiewającego, przedstawiono w tab. 5.2.

Tab. 5.2. Warianty badań roweczkowego aparatu wysiewającego

Lp.	Rodzaj nasion	Ilość wysiewu (norma wysiewu)	Rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi)	Czynna długość wałka wygarniającego
		$Q_{ha}, \text{ kg/ha}$	$p, \text{ cm}$	$s, \text{ mm}$
1	Pszenica	260	11	27
2	Pszenica*	180	11	18
3	Owies	170	11	27
4	Jęczmień	140	11	22**
5	Rzepak	3,5	20	0

(źródło: opracowanie własne)

* Badania wysiewu pszenicy zostały przeprowadzone dla dwóch poziomów normy wysiewu z uwagi na szeroki zakres stosowanych ilości wysiewu dla tego rodzaju nasion.

** Wstępne badania dla nasion jęczmienia wykonano dla nastawy $s = 15 \text{ mm}$, jednak z uwagi na uzyskaną wartość wydatku jednostkowego poniżej wymaganej, w docelowych badaniach zastosowano nastawę $s = 22 \text{ mm}$.

Badania dla kołeczkowego aparatu wysiewającego przeprowadzono jedynie dla wysiewu nasion pszenicy. Przyjęto następujący zakres zmienności czynników eksploatacyjnych: prędkość obrotowa wałka wysiewającego $n_w = 5 \text{ obr/min} \div 50 \text{ obr/min}$, poziom nasion w zbiorniku $H = 7 \text{ cm} \div 46 \text{ cm}$, kąt pochylenia siewnika $\beta = -12 \div 18^\circ$.

Badania dla roweczkowych aparatów wysiewających prowadzone były jednocześnie na pięciu dozownikach. W przypadku kołeczkowego aparatu wysiewającego na pojedynczym egzemplarzu. Wszystkie pomiary wykonywano w trzech powtórzeniach.

Szczegółowy plan eksperymentów dla przyjętych zakresów zmienności czynników eksploatacyjnych został opracowany za pomocą programu Experiment Planner (patrz rozdział 5.8) oraz zamieszczony wraz z wynikami eksperymentów w rozdziale 7.

5.6. Program badań sprawdzających

Po opracowaniu algorytmu korekcyjnego oraz jego implementacji w układzie sterowania stanowiska badawczego, przeprowadzono badania sprawdzające skuteczność jego działania. W pierwszej fazie przeprowadzono badania stacjonarne (w trakcie pomiaru warunki eksploatacyjne były stałe, lecz różne od tych, dla których przeprowadzono próbę kręconą). Następnie przeprowadzono badania symulujące scenariusz pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, gdzie badano nierównomierność podłużną wysiewu oraz stałość dawkowania nasion. Badania przeprowadzono dla nasion pszenicy.

5.7. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na modelu siewnika zawierającym zbiornik nasion z mieszadłem i aparatami wysiewającymi wraz z ich napędem. Wysiew nasion badano na wylocie z dozownika nasion z zastosowaniem (z przyczyn technicznych) krótkiego przewodu (o długości 200 mm) o dużej średnicy (40 mm), z pominięciem przewodów nasiennych i redlic. Oddziaływanie przewodów nasiennych opisane w rozdziale 3.2 może poprawiać wskaźnik nierównomierności podłużnej wysiewu siewnika, maskując błędy dozowania aparatu wysiewającego.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury (patrz rozdział 3) w zakresie wpływu zmiennych parametrów eksploatacyjnych siewników na jakość ich pracy oraz uwzględniając ograniczenie obszaru zainteresowań do zagadnień związanych z pracą aparatu wysiewającego, wytypowano 3 parametry eksploatacyjne, których zmiany powinny być symulowane podczas badań laboratoryjnych dozownika nasion:

- kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy β ,
- prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w ,
- poziom nasion w zbiorniku H .

Wymienione wyżej parametry są czynnikami niezależnymi, brany pod uwagę przy wyznaczaniu czynnika zależnego, jakim jest wydatek jednostkowy dozownika nasion (masa nasion wygarniana przez aparat wysiewający w trakcie jednego pełnego obrotu wałka wysiewającego).

Identyfikacja wpływu zmiennych warunków eksploatacji siewnika na wydanie jednostkowy dozownika nasion i tym samym ocena odchyłki dawkowania oraz ocena skuteczności działania algorytmu korekcyjnego wymaga przeprowadzenia żmudnych badań, w

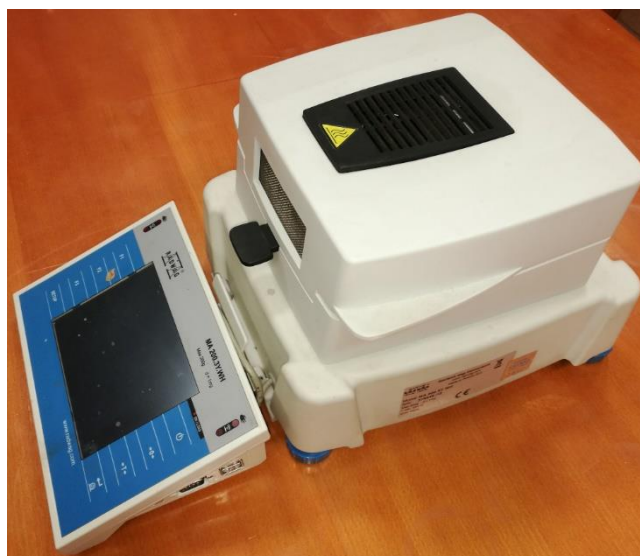
tym zliczania ziaren, co przy większej liczbie prób, szczególnie podczas testowania nowych rozwiązań, może istotnie ograniczać liczbę wykonywanych testów. Dlatego też przed przystąpieniem do badań należało opracować skuteczną metodę automatycznego lub półautomatycznego zliczania ziaren podczas badań stanowiskowych.

Sprawdzono dwie metody. Pierwsza – optyczna, polegała na zastosowaniu cyfrowego aparatu fotograficznego do rejestracji pozycji nasion na taśmie, będącej częścią stanowiska pomiarowego oraz cyfrowej analizy uzyskanych zdjęć. W drugiej do rejestracji wysianych nasion zastosowano czujnik piezoelektryczny.

5.7.1. Metodyka badań materiału doświadczalnego

Do badań, ze względów bezpieczeństwa i higieny pracy w trakcie długotrwałych prac laboratoryjnych, użyto nasion niezaprawionych. Badania prowadzono w kilku etapach w ciągu czterech lat. Z uwagi na konieczność wymiany materiału siewnego i ryzyko zmian jego parametrów w trakcie przechowywania, dla każdej serii badań określone były podstawowe parametry materiału siewnego (wilgotność i masa 1000 nasion).

Pomiar wilgotności nasion W_n używanych w trakcie badań przeprowadzono za pomocą wago-suszarki MA200 3Y WM firmy Radwag (rys. 5.19).



Rys. 5.19. Wago-suszarka MA200 3Y WM firmy Radwag

(źródło: opracowanie własne)

Badania wykonywano bezpośrednio przed pomiarem masy 1000 nasion i realizacją eksperymentów stanowiskowych. Pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach a wynikiem była wartość średnia z uzyskanych wartości (oznaczenie wilgotności odbywało się z dokładnością do 0,05%). Próbki bezpośrednio przed badaniem rozdrabniano w moździerzu. Proces pomiaru odbywał się automatycznie z zastosowaniem standardowego profilu suszenia.

Zakończenie suszenia następowało automatycznie jeśli nie występował ubytek masy próbki (mniejszy niż 1 mg) w czasie 60 s. Suszenie odbywało się w temperaturze 135°C dla nasion pszenicy i jęczmienia oraz 120°C dla nasion owsa i rzepaku. Parametry procesu oznaczania wilgotności dobrano w oparciu o karty dla poszczególnych produktów, dostępne na stronach www.radwag.pl.

Pomiar masy 1000 nasion wykonywano na wadze elektronicznej PS 4500/C/2 firmy Radwag (rys. 5.20 a)) o zakresie pomiarowym do 4500 g i dokładnością odczytu 0,01 g.

Ważono trzy próbki (dla każdego rodzaju nasion) zawierające, 1000 ziaren odliczonych za pomocą licznika LN-3 z losowo popranej próbki nasion. Przyjęta do badań masa 1000 nasion (MTN) jest średnią arytmetyczną z trzech pomiarów.

a)



b)



Rys. 5.20. Stanowisko badawcze masy 1000 nasion

a) waga elektroniczna PS 4500/C/2 firmy Radwag, b) licznik nasion LN-3 firmy POLON Warszawa
(źródło: opracowanie własne)

5.7.2. Metodyka badania wydatku jednostkowego metodą wagową

Badania wydatku jednostkowego dozownika, prowadzone w trakcie pojedynczego pomiaru w ustalonych (niezmiennych) warunkach eksploatacyjnych, były realizowane klasyczną metodą wagową.

Badania polegały na skonfigurowaniu i wyregulowaniu stanowiska pomiarowego zgodnie z planem eksperymentu i następnie wykonaniu wysiewu nasion, w ustalonych warunkach, do pojemników ustawionych pod aparatami wysiewającymi. W trakcie wysiewu wałek wykonywał zaprogramowaną liczbę obrotów. Po zakończeniu wysiewu nasiona z poszczególnych pojemników przesypywano do naczynia i ważono. Masę nasion dzielono przez znaną liczbę obrotów wałka wysiewającego, uzyskując wydajność jednostkową aparatu

wysiewającego. Badania prowadzono dla różnych wartości parametrów opisujących warunki wysiewu, zgodnie z przyjętym programem badań.

Do pomiaru masy, podobnie jak w badaniach MTN, wykorzystano wagę elektroniczną PS 4500/C/2 firmy Radwag (rys. 5.20 a)).

Pomiar obrotów wałka wysiewającego odbywał się za pomocą enkodera impulsowego 360dz MOK30-360-1224-BZ-K P o rozdzielczości 360 impulsów na obrót. Za akwizycję danych pomiarowych odpowiadał system kontrolno-pomiarowy MicroDAQ, umożliwiający zliczanie liczby obrotów wykonywanych przez wałek wysiewający z dokładnością $\Delta L_n = 0,01$ obrotu. Pomiar prędkości obrotowej wałka wysiewającego odbywał się z dokładnością $\Delta n_w = 0,002$ obr/min.

Podczas badań roweczkowego aparatu wysiewającego, model siewnika wyposażony był w pięć dozowników. Wartość wydajności jednostkowej dozownika wyznaczano wg zależności (5.1).

$$q = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{L_n \cdot 5}, \quad \text{g/obr} \quad (5.1)$$

gdzie: m_i - masa wysianych nasion z pojedynczego aparatu wysiewającego w g,
 L_n - liczba obrotów wałka wysiewającego w obr.

Niepewność złożona [53] uwzględniająca niepewność pomiaru masy i liczby obrotów dla q wyznaczonego jako średnia arytmetyczna z pięciu ($n = 5$) aparatów wysiewających wynosi:

$$u_C(q) = \sqrt{\left(\frac{u_B(L_n)^2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)^2}{25 \cdot L_n^4} + \frac{u(m)^2}{5 \cdot L_n^2} \right)} \quad (5.2)$$

gdzie:

$$u(m) = \sqrt{(u_A(m))^2 + (u_B(m))^2} \quad (5.3)$$

$$u_A(m) = t_{\alpha, n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} \quad (5.4)$$

gdzie: $t_{\alpha, n-1}$ – współczynnik krytyczny rozkładu t-Studenta dla poziomu ufności $\alpha = 0,32$ i liczby stopni swobody dla $n = 5$ wynosi $t_{0,32,4} = 1,14$

$$u_B(m) = \sqrt{\frac{(\Delta m)^2 + (\Delta m_e)^2}{3}} \approx 0,05 \text{ g} \quad (5.5)$$

gdzie:

w budżecie niepewności uwzględniono niepewność związaną z dokładnością wagi $\Delta m = 0,01$ g (działka elementarna) oraz niepewność związaną z przygotowaniem pomiaru (dokładność oczyszczenia pojemnika, „zgubienie” nasion w trakcie przesypywania itp.) $\Delta m_e = 0,08$ g

Niepewność pomiaru liczby obrotów wałka wysiewającego oszacowano na podstawie niepewności standardowej typu B [53].

$$u_B(L_n) = \frac{\Delta L_n}{\sqrt{3}} \approx 0,006 \text{ obr} \quad (5.6)$$

W badaniach kołeczkowego aparatu wysiewającego uwzględniono tylko jeden dozownik. Wartość wydajności jednostkowej dla pojedynczego dozownika wyznaczano (na podstawie trzech powtórzeń eksperymentu) wg zależności (5.7)

$$q = \frac{\frac{m_{11}}{L_{n1}} + \frac{m_{12}}{L_{n2}} + \frac{m_{13}}{L_{n3}}}{3}, \quad \text{g/obr} \quad (5.7)$$

gdzie: m_{1i} - masa wysianych nasion z pojedynczego aparatu wysiewającego i-tego pomiaru w g,
 L_{ni} - liczba obrotów wałka wysiewającego i-tego pomiaru w obr.

Niepewność złożona [53] uwzględniająca niepewność pomiaru masy i liczby obrotów dla q wyznaczonego jako średnia arytmetyczna z trzech ($n = 3$) powtórzeń pomiarów wynosi:

$$u_c(q) = \left(\left(\frac{u(m)}{3 \cdot L_{n1}} \right)^2 + \left(\frac{u(m)}{3 \cdot L_{n2}} \right)^2 + \left(\frac{u(m)}{3 \cdot L_{n3}} \right)^2 + \left(\frac{m_{11} \cdot u_B(L_n)}{3 \cdot L_{n1}^2} \right)^2 + \left(\frac{m_{12} \cdot u_B(L_n)}{3 \cdot L_{n2}^2} \right)^2 + \left(\frac{m_{13} \cdot u_B(L_n)}{3 \cdot L_{n3}^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.8)$$

gdzie:

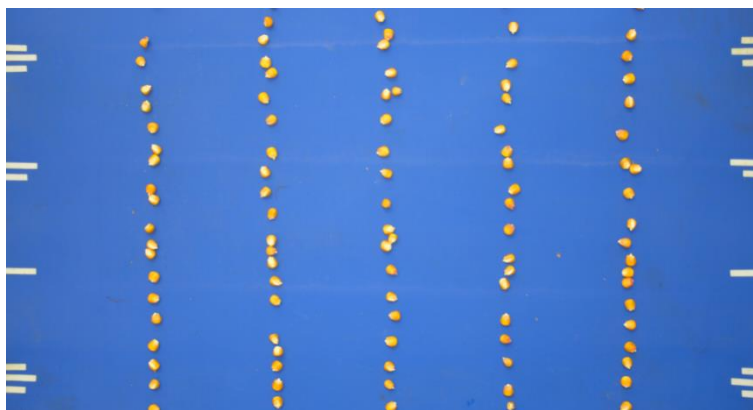
$u(m)$ obliczona zgodnie z zależnością (5.3) uwzględniając, że dla $u_A(m)$ wyznaczanego dla trzech pomiarów współczynnik krytyczny rozkładu t-Studenta dla poziomu istotności $\alpha = 0,32$ i liczby stopni swobody dla $n = 3$ wynosi $t_{0,32,2} = 1,32$.

$u_B(L_n)$ wyznaczone jak w zależności (5.6).

W arkuszach wyników, niepewność pomiarów podano jako niepewność rozszerzoną U dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$.

5.7.3. Metodyka badania nierównomierności podłużnej za pomocą metody fotooptycznej

Zgodnie z opisem z rozdziału 5.2 stanowisko jest wyposażone w cyfrowy aparat fotograficzny (o wysokich parametrach) oraz odpowiednie oświetlenie (rys. 5.8). Do analizy zdjęć opracowano procedurę automatycznej obróbki obrazów, co w założeniu miało pozwolić na prowadzenie badań nierównomierności podłużnej dozowania w dłuższym czasie obejmującym pracę siewnika w stanach nieustalonych. Na rysunkach 5.21 ÷ 5.23 przedstawiono przykłady nasion o trzech wielkościach wysianych na przenośniku taśmowym. Po bokach zdjęć znajdują się markery służące do orientacji kolejnych zdjęć.



Rys. 5.21. Ziarna grube - badania z wykorzystaniem nasion kukurydzy
(źródło: opracowanie własne)



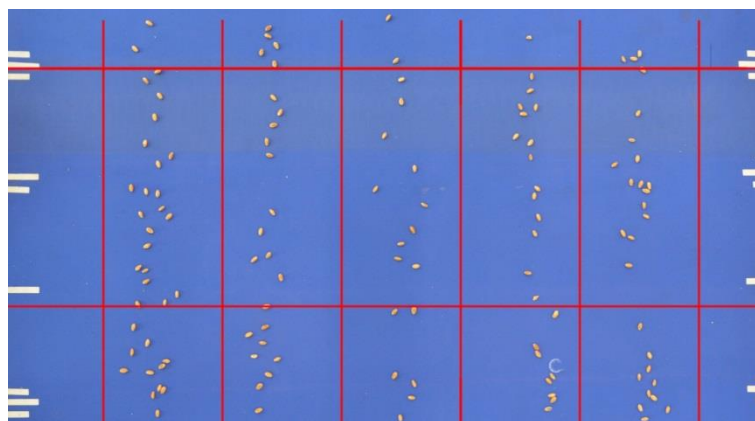
Rys. 5.22. Ziarna średniej wielkości - badania z wykorzystaniem nasion pszenicy
(źródło: opracowanie własne)



Rys. 5.23. Ziarna drobne - badania z wykorzystaniem nasion gorczycy
(źródło: opracowanie własne)

Analiza obrazu, mającą na celu zliczenie nasion znajdujących się na taśmie przenośnika, odbywała się za pomocą skryptu środowiska Matlab [37]. Podczas analizy obrazu wysianych nasion dokonywany jest podział na poszczególne obszary (ich długość odpowiada długości elementarnych odcinków pomiarowych z norm opisujących obliczanie współczynnika nierównomierności podłużnej), w których przeprowadzono procedurę wykrywania obiektu (rys. 5.24). Za pomocą markerów znajdujących się na krawędziach taśmy transportowej

możliwe jest sumowanie oraz przyporządkowanie zlokalizowanych nasion do danego badania na stanowisku.



Rys. 5.24. Nasiona na przenośniku z widocznymi obszarami zliczania ziarna

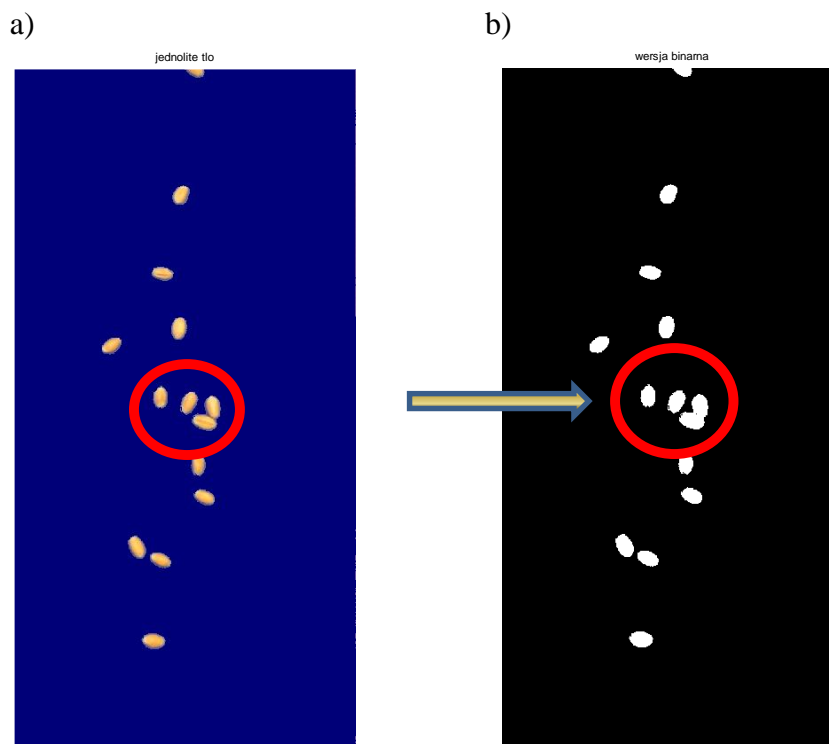
(źródło: opracowanie własne)

Po wyodrębnieniu obszaru pomiarowego oraz odpowiednim przekształceniu obrazu w celu ujednoczenia tła, przeprowadza się binaryzację, czyli przekształcenie aktualnego rysunku na obraz czarno-biały. Służy do tego funkcja *im2bw*, która przekształca obraz intensywnościowy, indeksowy lub RGB na obraz binarny. W pierwszym kroku obraz wejściowy przekształcany jest na typ intensywnościowy (o ile nie jest już obrazem tego typu). Wynikowy obraz binarny BW zawiera elementy 0 (czarny) dla wszystkich pikseli, których wartość w macierzy wejściowej była mniejsza niż „level” i elementy 1 (biały) dla pozostałych pikseli. Wynikowy obraz BW można wyświetlić za pomocą funkcji *imshow*.

- BW = *im2bw*(X, map, level) - przekształca obraz indeksowy „X” z mapą kolorów „map” na obraz czarno-biały (binarny),
- BW = *im2bw*(I, level) - przekształca obraz intensywnościowy „I” na obraz czarno-biały (binarny),
- BW = *im2bw*(RGB, level) - przekształca obraz „RGB” na obraz czarno-biały (binarny).

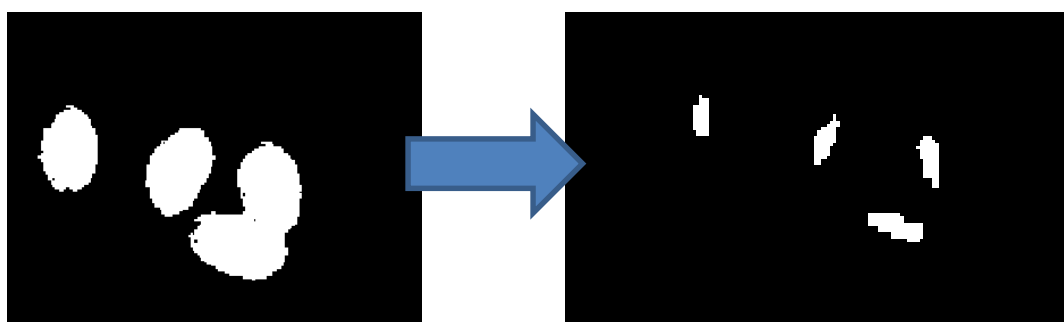
Rysunek 5.25 przedstawia wyodrębniony obszar zliczania nasion po wykonaniu operacji ujednoczenia tła (a). Dzięki tej operacji zamiana kolorowego obrazu typu RGB, na obraz intensywnościowy w odcieniach szarości daje lepsze wyniki, z mniejszym prawdopodobieństwem powstania niepożądanych artefaktów. Obraz w postaci czarno-białej (po binaryzacji), na którym wykonywana jest operacja wyodrębnienie obiektów przedstawiono na rys. 5.25 (b). Czerwonym okręgiem zaznaczono ziarna położone blisko siebie na taśmie transportowej (rys. 5.26 – widok w powiększeniu). Mogą być one uznane przez program zliczający ziarna za jeden obiekt. W celu uniknięcia tego błędu za pomocą funkcji *imerode* przeprowadzana jest operacja „erozji”, dzięki której izolowane obszary, o rozmiarze mniejszym niż rozmiar zadanego elementu strukturalnego, zostają usunięte. W wyniku tej operacji obszary połączone wąskim przesmykiem mogą zostać rozdzielone (rys. 5.26).

Następnie, za pomocą funkcji *bwconncomp*, następuje wyodrębnienie obiektów znajdujących się na przetworzonym obrazie. W wyniku jej działania powstaje zmienna (strukturalna) zawierająca m.in. opis wykrytych obiektów w postaci wektorów zawierających współrzędne pikseli należących do poszczególnych obiektów. Dodatkowe własności wykrytych obiektów można uzyskać za pomocą np. funkcji *regionprops* (m. in. liczba pikseli należących do poszczególnych obiektów (powierzchnia obiektów), współrzędne środka „ciężkości” obiektów, średnice okręgów o powierzchniach równych powierzchni poszczególnych obiektów, współrzędne prostokątów opisujących wykryte obiekty).



Rys. 5.25. Przygotowanie obrazu do operacji zliczania nasion; (zaznaczono nasiona leżące blisko siebie, które mogą być uznane przez program zliczający za jeden obiekt)

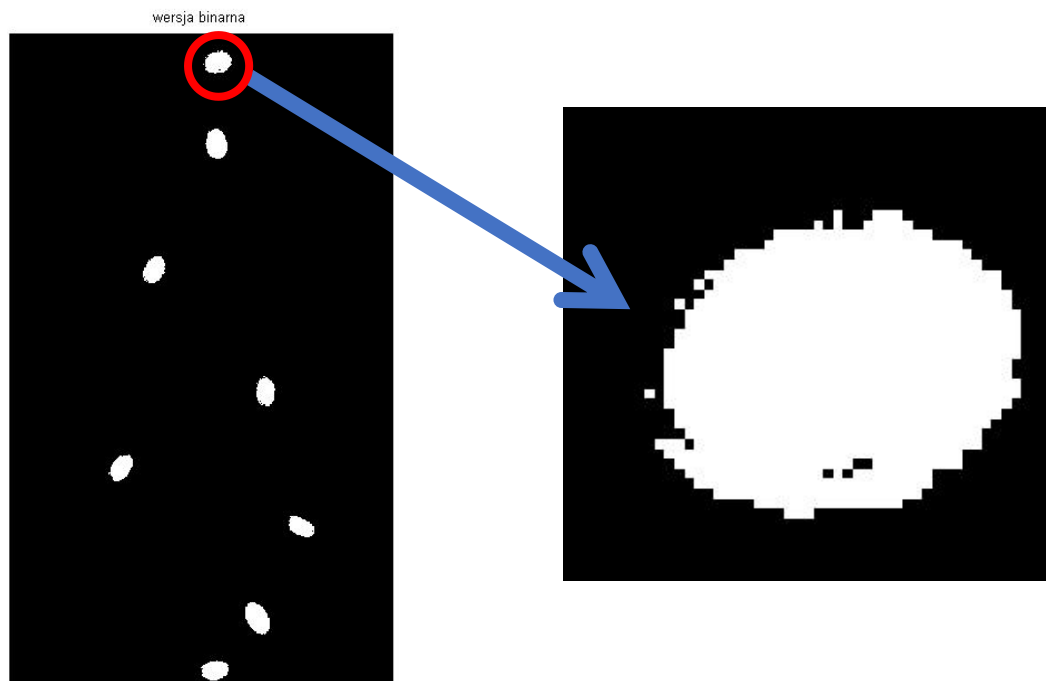
a) jednolite tło, b) postać binarna obrazu, (źródło: opracowanie własne)



Rys. 5.26. W wyniku działania funkcji *imerode* obraz leżących blisko siebie ziaren został rozdzielony

(źródło: opracowanie własne)

Okazuje się, że bezpośrednio po wykonaniu tej operacji program za pośrednictwem funkcji *bwconncomp*, oprócz ziarna, wykrywa dodatkowe obiekty. Jest to spowodowane powstawaniem w pobliżu brzegu nasiona małych oderwanych obiektów, znacznie mniejszych od właściwych nasion, których przykład przedstawiono po prawej stronie rys. 5.27. Do ich eliminacji przyczynia się wykonanie operacji erozji oraz eliminacja małych obiektów.

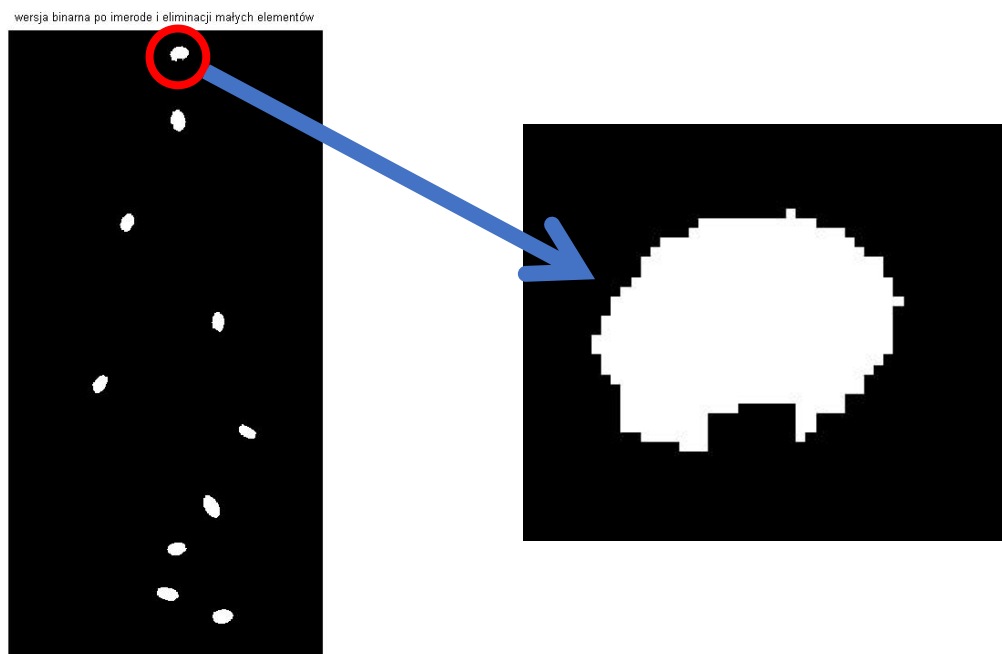


Rys. 5.27. Postać binarna analizowanego obrazu (z lewej) oraz powiększenie widoku pojedynczego nasiona (z prawej)

(źródło: opracowanie własne)

Po zakończeniu działań mających na celu przetworzenie obrazu nasion i likwidację zakłóceń, otrzymano obraz przedstawiony na prawej części rys. 5.28. Zastosowana do niego funkcja *bwconncomp* wykrywa właściwą liczbę obiektów. W zależności od potrzeb można prowadzić dalszą analizę rozmieszczenia lub własności ziaren, korzystając z własności podawanych przez funkcje *bwconncomp* i *regionprops*.

Przedstawiona metoda, obok licznych zalet, ma także niedogodności w postaci dużej wrażliwości na warunki oświetlenia. Jest to szczególnie dokuczliwe w przypadku badania wysiewu ziaren o małych rozmiarach, jak nasiona rzepaku. Trudności te można opanować przez odpowiednio silne doświetlenie taśmy i takie ustawienie źródeł światła, by na powierzchni taśmy nie pojawiały się odbłaski światła „wyzerające” zdjęcia. Problem ten pogłębia konieczność pokrycia taśmy przenośnika klejem, który zapobiega odbijaniu się ziaren od jej powierzchni.



Rys. 5.28. Postać końcowa analizowanego obrazu (z lewej) oraz powiększenie widoku pojedynczego nasiona (z prawej)

(źródło: opracowanie własne)

Z zastosowanym klejem związana jest też podstawowa trudność stosowania przedstawionej metody optycznej, która zmusiła do poszukania innego sposobu automatyzacji zliczania nasion. Jak widać na rysunkach stanowiska (patrz np. rys. 5.8) taśma transportowa, na którą padają nasiona tworzy pętlę. W każdym jej obiegu przyklejone nasiona należy wraz z nadmiarem kleju usunąć z powierzchni taśmy. W tym celu zainstalowano specjalną listwę. Niestety silne doświetlenie taśmy powodowało nagrzewanie powierzchni taśmy i przyspieszone twardnienie kleju, co utrudniało jego usuwanie. Po kilku minutach uniemożliwiało to poprawną pracę stanowiska badawczego. Należało wówczas przerwać badania i umyć taśmę. Bardzo to utrudniało prowadzenie niezbędnego, szerokiego planu badań.

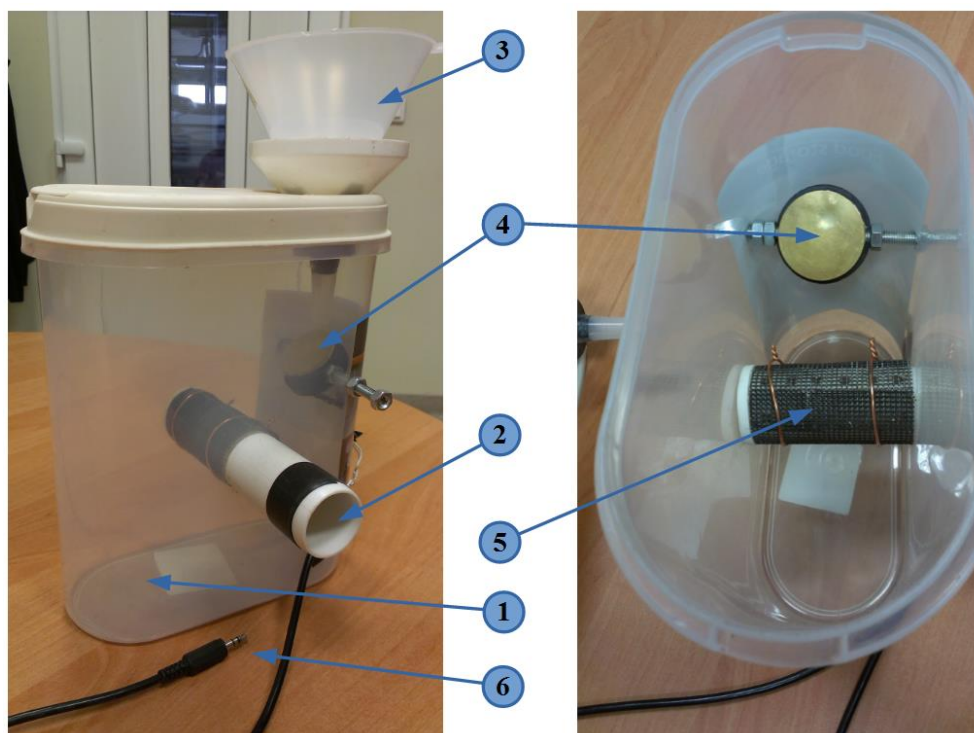
Powyższe problemy spowodowały, że przystąpiono do opracowania innej, prostszej w praktyce, metody zliczania wysianych nasion.

5.7.4. Metodyka badania nierównomierności podłużnej z zastosowaniem metody piezoelektrycznej

Metodami alternatywnymi wobec metod optycznych są metody polegające na zliczaniu nasion na stanowisku pomiarowym za pomocą sygnałów generowanych przez spadające nasiono. Polegają one na zapisie uderzeń wysiewanych nasion przez odpowiedni czujnik, a następnie na analizie powstałego w ten sposób sygnału.

Postawą opracowanego układu do zliczania nasion (rys. 5.29) jest czujnik piezoelektryczny wzbudzany przez spadające nasiona. Sygnał z czujnika rejestrowany jest przez system akwizycji danych SCADAS Recorder firmy LMS z oprogramowaniem LMS

Test.Xpress. W wyniku jego działania otrzymujemy pliki z wygenerowanym sygnałem, który jest wykorzystywany przez skrypt napisany dla środowiska Matlab.

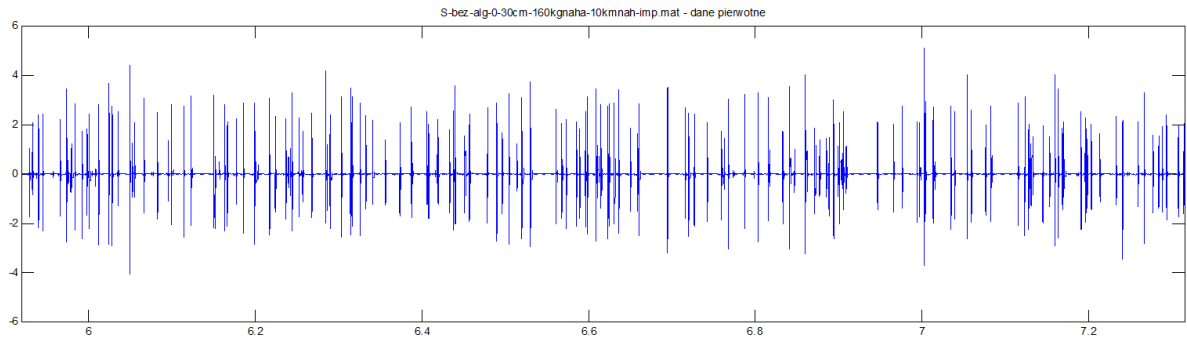


Rys. 5.29. Układ pomiarowy do zliczania nasion wysianych na stanowisku pomiarowym.

1- pojemnik nasion, 2- przyłącze podciśnienia, 3- lejek zasypowy, 4- czujnik piezoelektryczny, 5- filtr siatkowy, 6- przewód sygnałowy, (źródło: opracowanie własne)

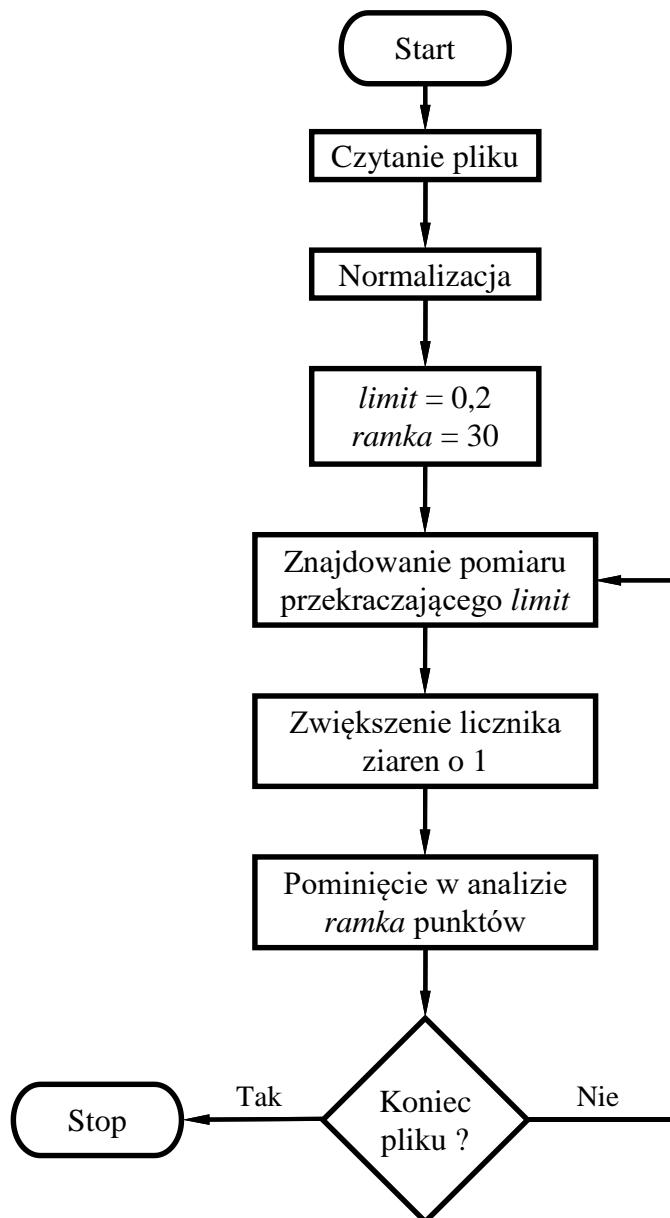
W skład układu pomiarowego wchodzi pojemnik nasion (1). W jego górnej części zamocowany jest lejek (3), przez który nasiona z przewodu nasiennego przedostają się do środka pojemnika i padają na powierzchnię czujnika piezoelektrycznego (4). Czujnik umieszczony jest bezpośrednio pod wylotem lejka, a jego powierzchnia jest pochylona w celu uniknięcia powtórznego opadania nasion na czujnik po pierwszym odbiciu. We wnętrzu pojemnika (1) panuje podciśnienie wytwarzane np. przez odkurzacz, którego przewód ssący podłączony jest do przyłącza (2) układu pomiarowego. W efekcie nasiona trafiające do lejka (3) pobierane są z niego w sposób zapobiegający tworzeniu zatorów, oraz w pewnym stopniu kolejkujący ich podanie na płytkę czujnika (4). Zmiana wartości podciśnienia w pojemniku (1) wpływa na prędkość zasysanych nasion, i tym samym na energię ich uderzenia w membranę pomiarową. Pozwala to na odpowiednie dobranie parametrów pracy stanowiska do masy i geometrii wysiewanych nasion. Ponadto strumień powietrza zasysany przez lejek tworzy swego rodzaju barierę, zabezpieczającą już odbite od czujnika nasiona przed ponownym trafieniem w jego strefę.

Na rys. 5.30 przedstawiony jest wykres fragmentu sygnału otrzymanego z systemu akwizycji danych SCADAS Recorder.



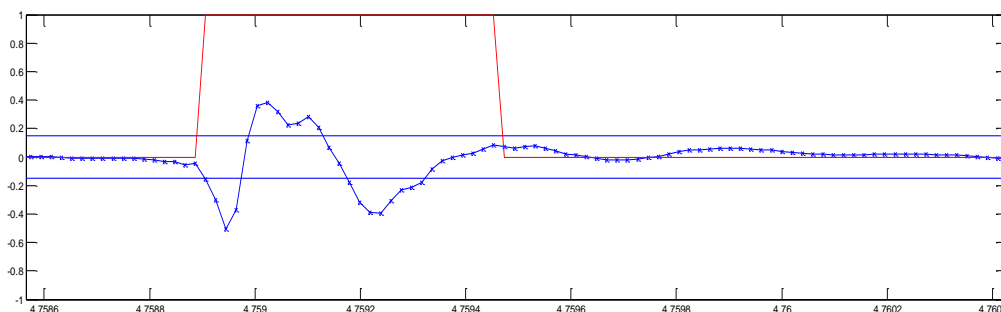
Rys. 5.30. Pierwotny przebieg otrzymany z układu pomiarowego do zliczania nasion (fragment)
(źródło: opracowanie własne)

W celu uzyskania informacji o liczbie nasion uderzających o powierzchnię czujnika piezoelektrycznego opracowano skrypt działający w środowisku Matlab. Schemat działania algorytmu przedstawiono na rys. 5.31.



Rys. 5.31. Schemat blokowy algorytmu
(źródło: opracowanie własne)

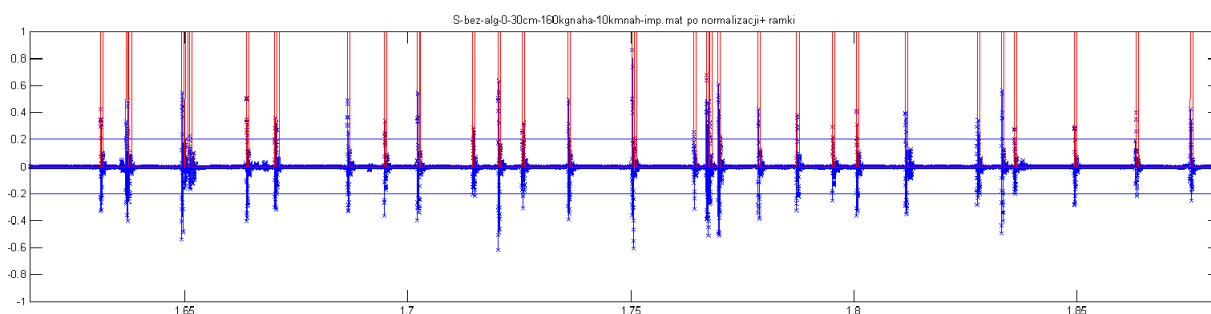
Po wczytaniu pliku z zarejestrowanym sygnałem przeprowadzana jest normalizacja sygnału polegająca na podzieleniu wszystkich wartości sygnału przez wartość bezwzględną największej amplitudy sygnału. Ma to umożliwić standaryzację dalszej jego analizy, niezależnie od amplitudy dostarczonego sygnału. Następnie nadawane są wartości stałym *limit* i *ramka* decydującym o skuteczności algorytmu. Właściwa analiza znormalizowanego sygnału odbywa się w ten sposób, że przeszukiwane są kolejne jego wartości aż do napotkania wartości, których wartość bezwzględna przekracza wartość zadanej stałej *limit*. Oznacza to, że piezoelektryczny czujnik zarejestrował uderzenie ziarna. Licznik ziaren zostaje zwiększony o 1. Następne *ramka* punktów pomiaru jest pominiętych w analizie (rys. 5.32). Jest to obszar, w którym następuje wytlumienie zaburzenia spowodowanego przez uderzenie pojedynczego nasiona.



Rys. 5.32. Fragmentu wykresu sygnału z widocznymi wartościami stałej limit (dwie poziome niebieskie linie) oraz zakresem działania parametru ramka – punkty pomiarowe, dla których wysokość czerwonej linii wynosi 1 zostały pominięte w analizie

(źródło: opracowanie własne)

Na rys. 5.33 przedstawiono większy fragment wykresu sygnału. Na czerwono zaznaczono na nim zakres działania parametru *ramka*. Każdy taki obszar oznacza zliczone nasiono.



Rys. 5.33. Wykres fragmentu sygnału z widocznymi, zaznaczonymi czerwoną linią, „ramkami”; każdy taki słupek oznacza zliczone nasiono

(źródło: opracowanie własne)

Odpowiedni dobór powierzchni czujnika piezoelektrycznego oraz jej kąta pochylenia pozwolił uzyskać sygnał o krótkim czasie tłumienia, co umożliwiło separację uderzeń ziaren spadających w małych odstępach czasu. Przeprowadzone testy wykazały dużą dokładność

zliczania nasion przez opracowany układ. Jest on prosty w eksploatacji i nie wymaga żadnych specjalnych warunków do poprawnego działania. Zdecydowano zatem o jego wykorzystaniu do badań skuteczności działania algorytmu korygującego.

5.8. Analiza statystyczna - model matematyczny

W celu opracowania algorytmu sterującego prędkością wałka wysiewającego niezbędna jest znajomość modelu opisującego związki między wartościami zmiennych niezależnych charakteryzujących warunki pracy siewnika (kąta pochylenia siewnika w kierunku jazdy - β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego - n_w oraz poziomu nasion w zbiorniku - H) a jego wydajnością jednostkową będącą elementem zależności (5.9). Przyjęto, że będzie to model oparty na funkcji regresji.

Do opracowania programu eksperymentu oraz wykonania obliczeń wykorzystano program Experiment Planner [57]. Umożliwia on obliczenie funkcji regresji następujących typów: wielomian, funkcja logarymiczna, wykładnicza, potęgowa i ułamkowa.

Zależność między wartościami zmiennych niezależnych a wartością wydajności jednostkowej występującej w zależności (5.9) opisano jako funkcję wielomianową trzeciego stopnia z interakcjami:

$$q_M = a_0 + a_1\beta + a_2n_w + a_3H + a_{12}\beta n_w + a_{13}\beta H + a_{23}n_w H + a_{111}\beta^2 + a_{22}n_w^2 + a_{33}H^2 + a_{123}\beta n_w H + a_{111}\beta^3 + a_{222}n_w^3 + a_{333}H^3 \quad (5.9)$$

gdzie: q_M - wydajność jednostkowa na podstawie modelu dla aktualnych warunków eksploatacji (β , n_w , H) w g/obr,
 a_i - współczynnik wielomianu,
 β - kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy w °,
 n_w - prędkość obrotowa wałka wysiewającego w obr/min,
 H - poziom nasion w zbiorniku w cm.

Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów zmienności, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Zakres zmienności czynników β , n_w i H został określony dla poszczególnych wariantów badań w rozdziale 5.5, przy czym czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości ze swoich przedziałów, natomiast czynnik H z powodów technicznych mógł przyjmować wybrane wartości przyjęte jako ustalone.

Ponieważ badano wpływ trzech czynników wejściowych, do badań zastosowano prostokąt Youdena [56]. Jest to niepełny statyczny randomizowany kwadrat łaciński. W programie tym, w przeciwieństwie do np. pełnego kwadratu łacińskiego, nie wymaga się, by wszystkie analizowane czynniki miały taką samą liczbę poziomów czynników w wierszach i kolumnach. Jego zaletą jest także to, że ocenę istotności wpływu badanych czynników można uzyskać przy mniejszej liczbie pomiarów. Jego zastosowanie umożliwia także ocenę wpływu interakcji między poszczególnymi czynnikami.

W pierwszej fazie przeprowadzono serię doświadczeń zgodnie z opracowanym planem eksperymentu, a uzyskane wyniki wprowadzono do programu Experiment Planner. Program pozwala na wykrywanie błędów grubych w seriach pomiarowych z wykorzystaniem testów B (B-Grubbsa, B4, B6, B7, B8). Przeprowadzone testy nie wykazały błędów grubych.

Następnie sprawdzano istotność wpływu wartości czynników β , n_w , H na wartość wydajności jednostkowej dozownika (masa wysiewanych nasion na 1 obrót wałka wysiewającego).

Dla każdego układu wartości czynników wejściowych przeprowadzono trzy powtórzenia eksperymentu. Wynikiem eksperymentu dla roweczkowego aparatu wysiewającego była średnia wartość wydajności jednostkowej uzyskana z pięciu aparatów wysiewających zamontowanych na stanowisku badawczym. W przypadku kołeczkowego aparatu wysiewającego, badania realizowano na jednym egzemplarzu dozownika.

Po uzyskaniu wyników świadczących o istotności wpływu badanych czynników (przykładowe wyniki dla zespołu roweczkowego i siewu pszenicy przedstawiono w tab. 7.3), przystępowano do drugiej fazy obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej. Badania przeprowadzono zgodnie z pięciopoziomowym planem rotatabilnym [56, 57], który dla trzech zmiennych niezależnych wymaga przeprowadzenia dwudziestu eksperymentów. Przykładowy zestaw danych wygenerowany przez program Experiment Planner przedstawiono w tab. 7.4.

Podobnie, jak dla badań istotności wpływu czynników wejściowych, przeprowadzono trzykrotne powtórzenia każdego eksperymentu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla każdego z badanych rodzajów nasion uzyskano współczynniki wielomianu trzeciego stopnia z interakcjami, opisującego zależność między wartościami β , n_w , H a wydajnością jednostkową q dozownika. Wielomiany te oraz wyniki dotyczące adekwatności modelu, w tym wartości współczynnika korelacji dla poszczególnych rodzajów nasion i aparatów wysiewających przedstawiono w rozdziale 7.

6. Badania rozpoznawcze

6.1. Rowczkowy aparat wysiewający typu Hoosiera (Typ R)

W pierwszym kroku przeprowadzono badania zależności wydajności jednostkowej dozownika od czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion średnich (pszenicy, owsa i jęczmienia) oraz nasion drobnych (rzepaku). Wyniki badań zamieszczono poniżej w postaci zestawień tabelarycznych i wykresów.

W kolejnym kroku przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę zależności wydajności jednostkowej q dozownika od kąta pochylenia siewnika β , poziomu nasion w zbiorniku H , drgań siewnika oraz prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w .

6.1.1. Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion pszenicy

Tab. 6.1. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion pszenicy

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność nasion	12,2	%
Masa 1000 nasion	39,9	g
Poziom nasion w zbiorniku	25	cm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	35	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.2. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy

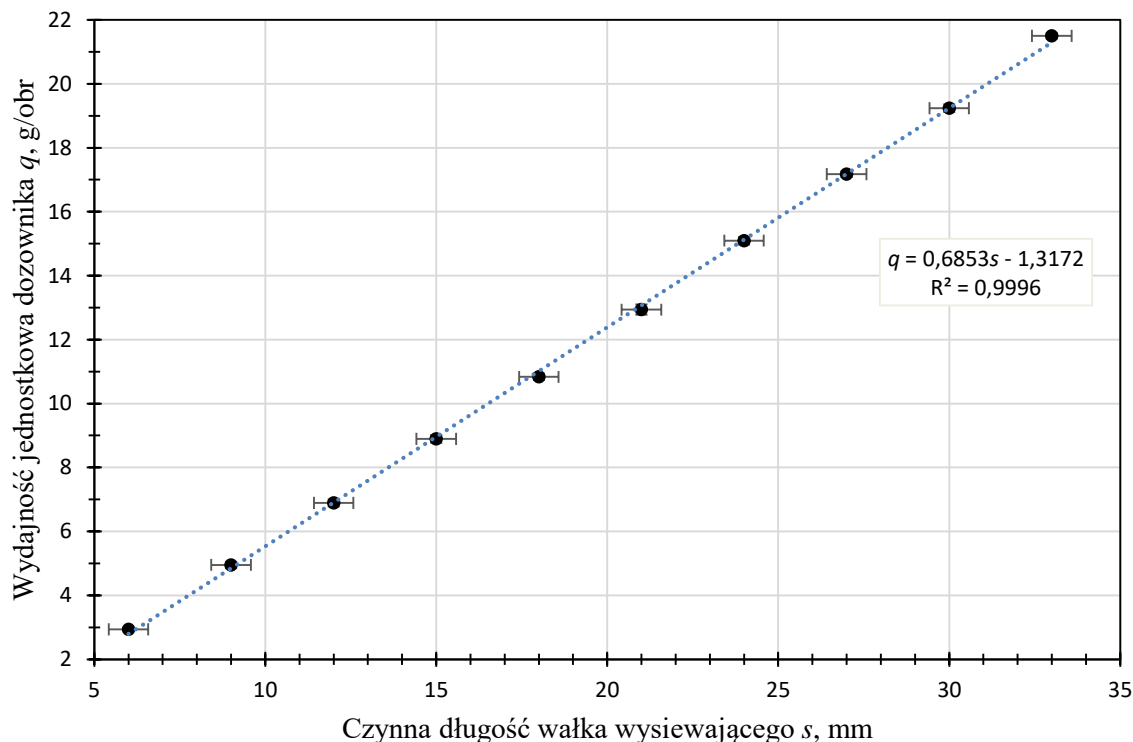
s	$U(s)^*$	q	$U(q)^*$
mm	mm	g	g
6	0,6	2,94	0,06
9	0,6	4,95	0,10
12	0,6	6,89	0,11
15	0,6	8,90	0,12
18	0,6	10,83	0,10
21	0,6	12,94	0,16
24	0,6	15,10	0,12
27	0,6	17,18	0,09
30	0,6	19,24	0,12
33	0,6	21,50	0,08

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.2 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.1. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia punktowa to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = 0,6853s - 1,3172 \quad (6.1)$$

gdzie s oznacza czynną długość wałka wysiewającego. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,9996.



Rys. 6.1. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu pszenicy

(źródło: opracowanie własne)

6.1.2. Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion owsa

Tab. 6.3. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion owsa

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	owies	
Wilgotność nasion	9,1	%
Masa 1000 nasion	36,8	g
Poziom nasion w zbiorniku	25	cm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	35	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.4. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu owsa

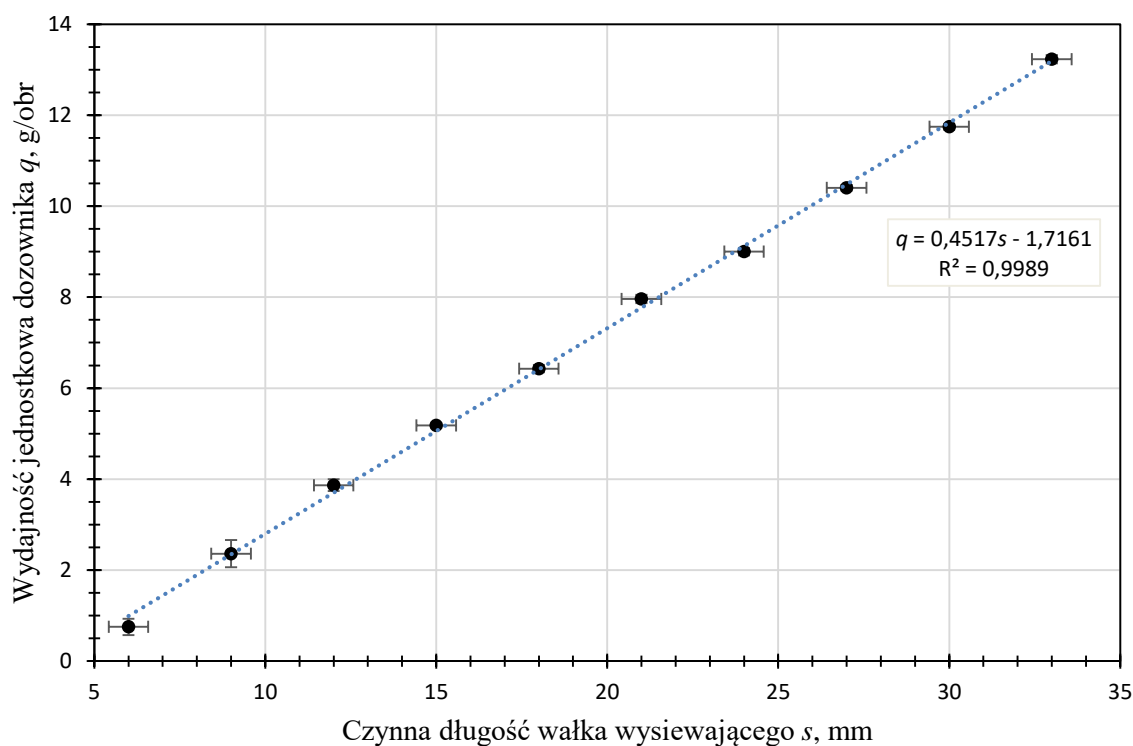
s mm	$U(s)^*$ mm	q g	$U(q)^*$ g
6	0,6	0,76	0,18
9	0,6	2,36	0,30
12	0,6	3,87	0,13
15	0,6	5,18	0,05
18	0,6	6,43	0,08
21	0,6	7,96	0,09
24	0,6	9,00	0,08
27	0,6	10,40	0,06
30	0,6	11,74	0,06
33	0,6	13,23	0,09

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.4 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.2. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia punktowa to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = 0,4517s - 1,7161 \quad (6.2)$$

gdzie s oznacza czynną długość wałka wysiewającego. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,9989.



Rys. 6.2. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu owsa

(źródło: opracowanie własne)

6.1.3. Wydajność jednostkowa w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion jęczmienia

Tab. 6.5. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion jęczmienia

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	jęczmień	
Wilgotność nasion	12,7	%
Masa 1000 nasion	41,0	g
Poziom nasion w zbiorniku	25	cm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	35	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.6. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu jęczmienia

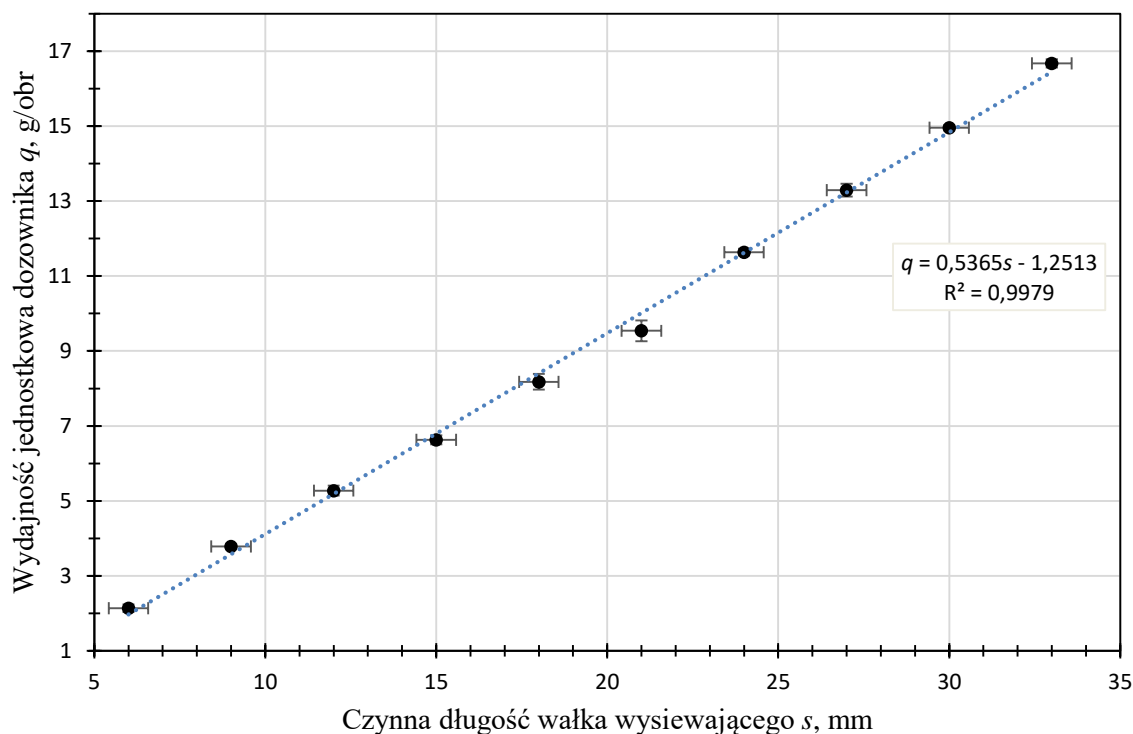
s	$U(s)^*$	q	$U(q)^*$
mm	mm	g	g
6	0,6	2,14	0,10
9	0,6	3,78	0,06
12	0,6	5,27	0,13
15	0,6	6,63	0,12
18	0,6	8,18	0,21
21	0,6	9,54	0,28
24	0,6	11,64	0,09
27	0,6	13,29	0,17
30	0,6	14,96	0,07
33	0,6	16,68	0,11

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.6 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.3. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia punktowa to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = 0,5365s - 1,2513 \quad (6.3)$$

gdzie s oznacza czynną długość wałka wysiewającego. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,9979.



Rys. 6.3. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu jęczmienia

(źródło: opracowanie własne)

6.1.4. Wydajność jednostkowa dozownika dla siewu nasion rzepaku

Tab. 6.7. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla nasion rzepaku

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	rzepak	
Wilgotność	6,5	%
Masa 1000 nasion	4,5	g
Poziom nasion w zbiorniku	19	cm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	26	obr/min
Kąt pochyleń siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Roweczkowy aparat dozujący posiada na wałku wysiewającym wąski pierścień z drobnymi roweczkami, który stanowi element wygarniający dla wysiewu nasion drobnych. Przystawienie aparatu wysiewającego do wysiewu nasion drobnych polega na wsunięciu części wałka z głębokimi rowkami (przeznaczoną do wysiewu nasion średnich i grubych) w ruchomą przegrodę do skrajnej pozycji ($s = 0$ mm).

Dla wysiewu nasion drobnych przewidziana jest tylko jedna nastawa wydajności dozownika $N = 1$ dla której uzyskano wartość wydajności jednostkowej:

$$q = 0,39 \pm 0,03 \text{ g/obr}$$

6.1.5. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od kąta pochylenia siewnika β dla siewu nasion pszenicy

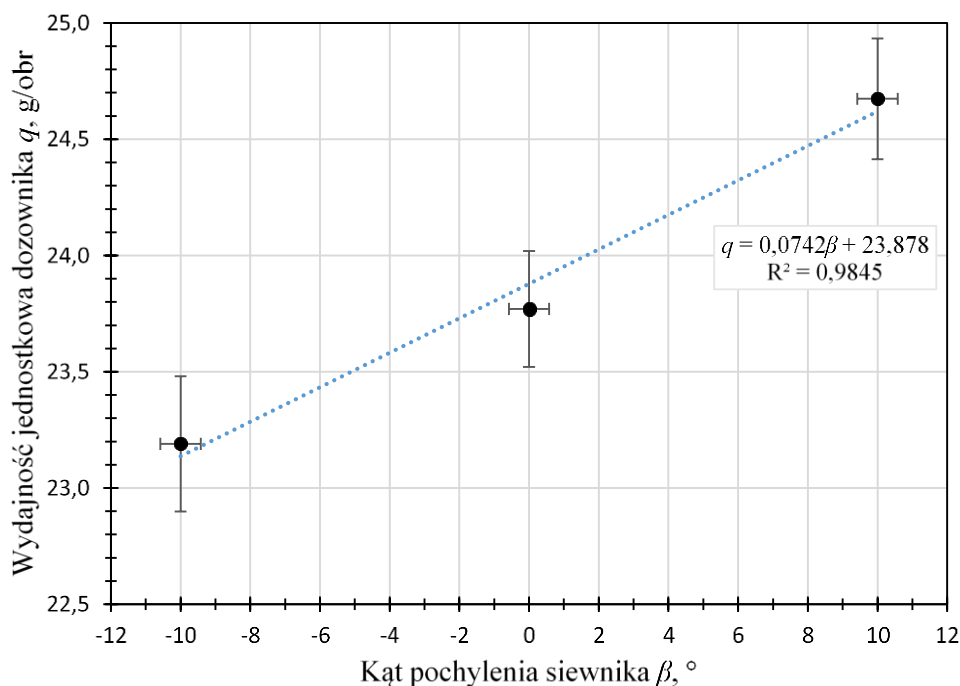
Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę wpływu kąta pochylenia siewnika β na wydajnością jednostkową dozownika q .

Warunki badania zamieszczono w tab. 6.8 a wyniki przedstawiono w postaci wykresu na rys. 6.4.

Tab. 6.8. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji kąta pochylenia siewnika

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	13,8	%
Masa 1000 nasion	45,5	g
Poziom nasion w zbiorniku	30	cm
Czynna długość wałka wysiewającego	33	mm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	25,5	obr/min

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 6.4. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od kąta pochylenia siewnika przy wysiewie pszenicy

(źródło: opracowanie własne)

6.1.6. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla siewu pszenicy

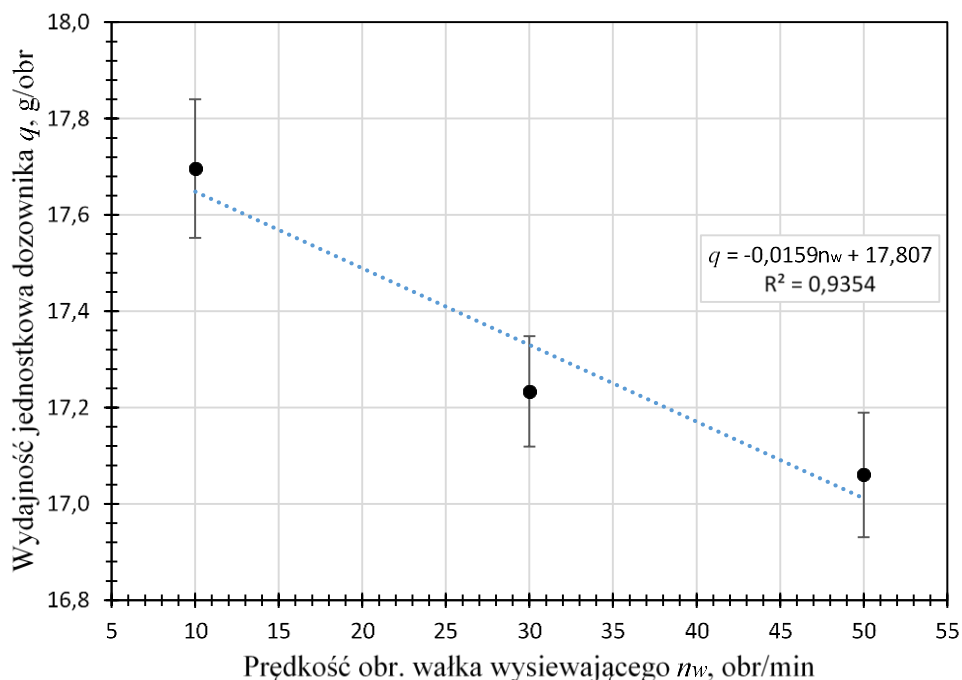
Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę wpływu prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w na wydajność jednostkową dozownika q .

Warunki badania zamieszczono w tab. 6.9 a wyniki przedstawiono w postaci wykresu na rys. 6.5.

Tab. 6.9. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji prędkości obrotowej wałka wysiewającego

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,2	%
Masa 1000 nasion	39,9	g
Poziom nasion w zbiorniku	25	cm
Czynna długość wałka wysiewającego	27	mm
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 6.5. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego (źródło: opracowanie własne)

6.1.7. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od poziomu nasion w zbiorniku H dla siewu pszenicy

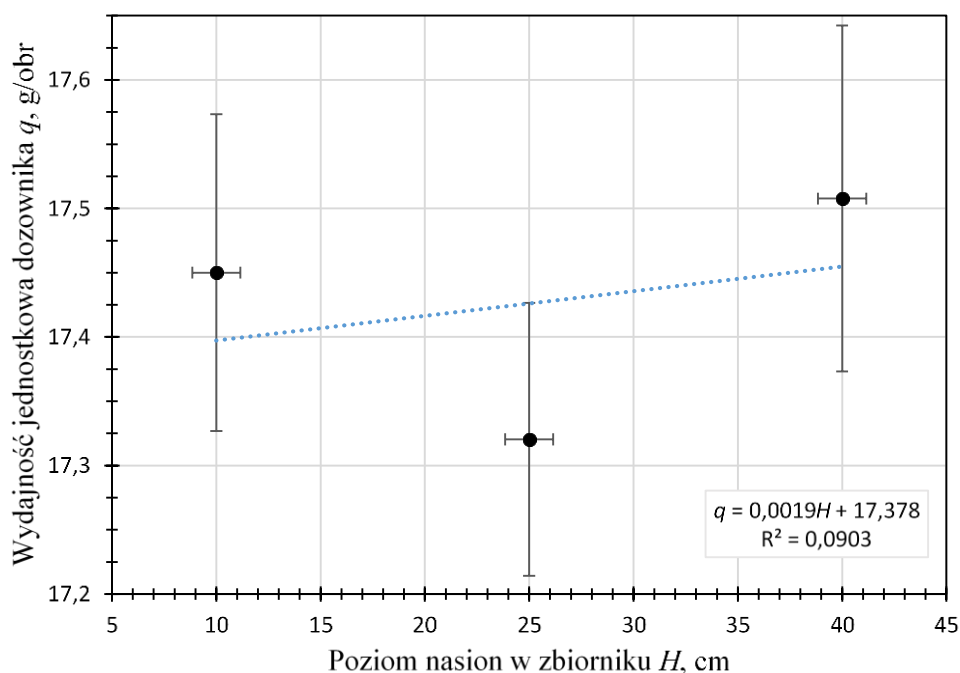
Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę wpływu poziomu nasion w zbiorniku H na wydajność jednostkową dozownika q .

Warunki badania zamieszczono w tab. 6.10 a wyniki przedstawiono w postaci wykresu na rys. 6.6.

Tab. 6.10. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji poziomu nasion w zbiorniku

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,2	%
Masa 1000 nasion	39,9	g
Czynna długość wałka wysiewającego	27	mm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	25,5	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 6.6. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku

(źródło: opracowanie własne)

6.1.8. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika roweczkowego od drgań siewnika dla siewu nasion pszenicy

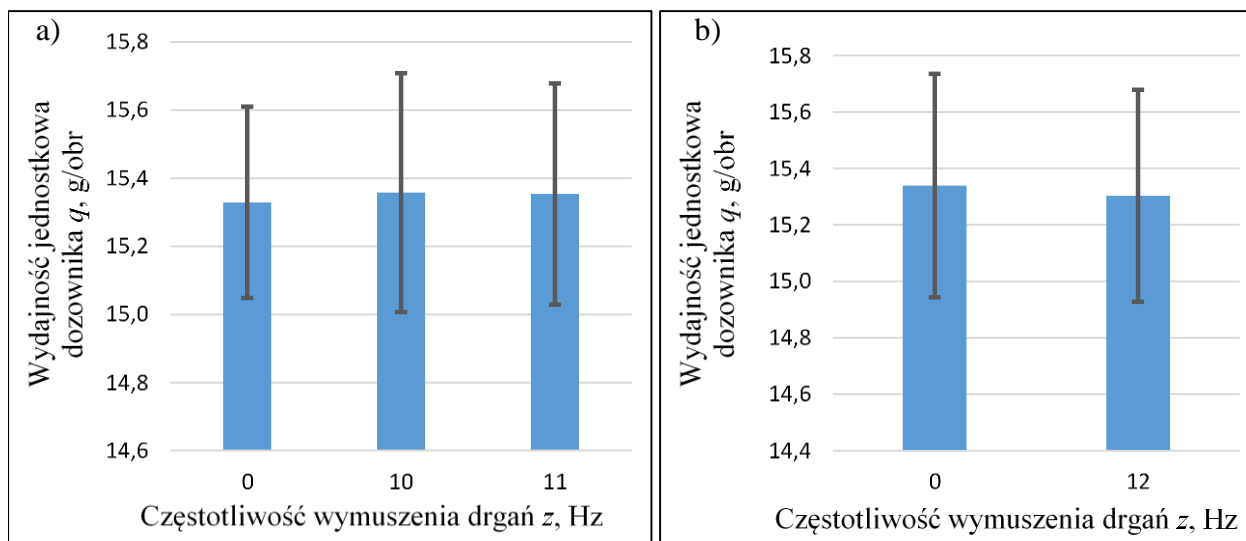
Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę wpływu częstotliwości drgań konstrukcji siewnika na wydajnością jednostkową dozownika q .

Warunki badania zamieszczono w tab. 6.11 a wyniki przedstawiono w postaci wykresów na rys. 6.7 i rys. 6.8.

Tab. 6.11. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji częstotliwości drgań konstrukcji siewnika

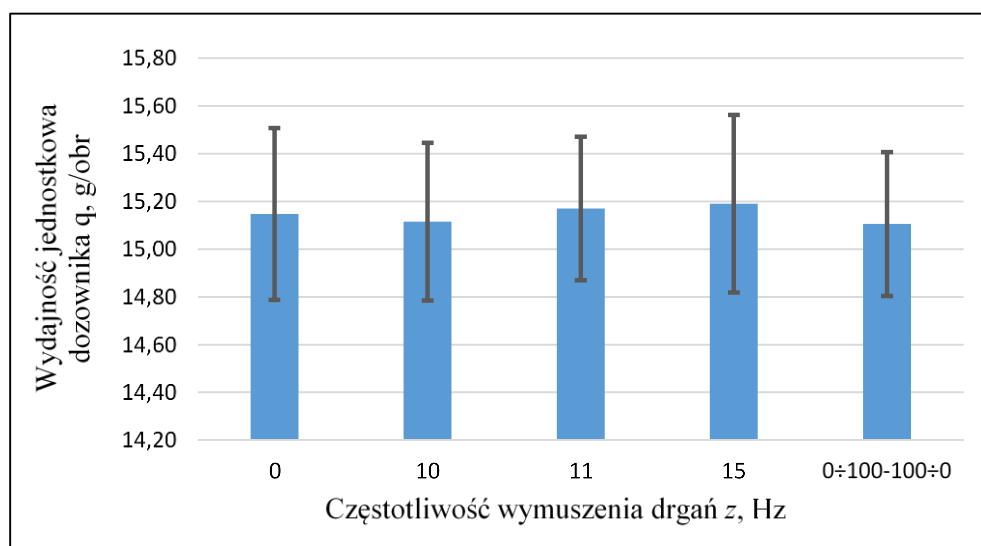
Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	13,8	%
Masa 1000 nasion	45,5	g
Czynna długość wałka wysiewającego	22	mm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	20	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)



Rys. 6.7. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od częstotliwości drgań konstrukcji siewnika przy wysiewie pszenicy – mieszadło w zbiorniku włączone

a- poziom nasion w zbiorniku $H = 420$ mm; b- poziom nasion w zbiorniku $H = 150$ mm
(źródło: opracowanie własne)



Rys. 6.8. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od częstotliwości drgań konstrukcji siewnika przy siewie pszenicy – mieszadło w zbiorniku wyłączone, poziom nasion w zbiorniku $H = 420$ mm

(źródło: opracowanie własne)

Ostatni słupek przedstawia wydajność dozownika przy wymuszeniu drgań z częstotliwością zmienianą (przemiatanie częstotliwością) w zakresie od 0 do 100.

Wyniki badań opublikowano również w artykułach Gałęzi i in. [12, 13].

6.2. Kołeczkowy aparat wysiewający typu Siederslebena (Typ K)

Kołeczkowy aparat wysiewający posiada stałą wydajność objętościową dla danej konfiguracji pracy. Wytypowany do badań aparat wysiewający posiada budowę dwusegmentową (wałek do wysiewu nasion drobnych i wałek do wysiewu nasion średnich). W

ramach pracy przeprowadzono badania tylko dla jednej konfiguracji odpowiedniej do wysiewu nasion pszenicy (oba wałki napędzane - patrz opis w rozdziale 5.1.2). W poniższym rozdziale przedstawiono wyniki badań pilotażowych mających na celu opracowanie charakterystyki pracy kołeczkowego aparatu wysiewającego i umożliwienie wyboru zmiennych niezależnych. Przeprowadzono badania mające na celu wstępną ocenę zależności wydajności jednostkowej q dozownika od kąta pochylenia siewnika β , poziomu nasion w zbiorniku H oraz prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w .

Wyniki badań zamieszczono poniżej w postaci zestawień tabelarycznych i wykresów.

6.2.1. Badania pilotażowe zależności wydajności jednostkowej q dozownika kołeczkowego od kąta pochylenia siewnika β dla siewu nasion pszenicy

Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę zależności kąta pochylenia siewnika β na wydajnością jednostkową dozownika q .

Warunki badania określono w tab. 6.12 a wyniki przedstawiono w tab. 6.13.

Tab. 6.12. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji kąta pochylenia siewnika

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g
Poziom nasion w zbiorniku	23	cm
Prędkość obr. wałka wysiewającego	25	obr/min

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.13. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od kąta pochylenia siewnika β uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy

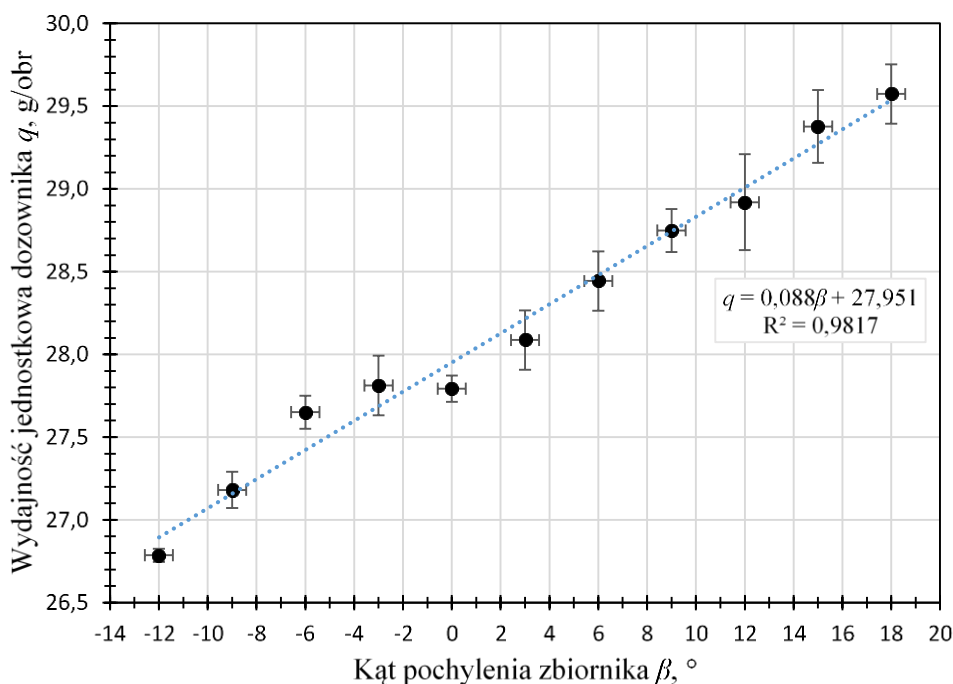
Parametr	β	$U(\beta)^*$	q	$U(q)^*$
Jednostka	°	°	g	g
1	-12	0,6	26,79	0,04
2	-9	0,6	27,18	0,11
3	-6	0,6	27,65	0,10
4	-3	0,6	27,81	0,18
5	0	0,6	27,79	0,08
6	3	0,6	28,09	0,18
7	6	0,6	28,44	0,18
8	9	0,6	28,75	0,13
9	12	0,6	28,92	0,29
10	15	0,6	29,38	0,22
11	18	0,6	29,57	0,18

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.13 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.9. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia kropkowana to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = 0,088\beta + 27,951 \quad (6.4)$$

gdzie β oznacza wartość kąta pochylenia siewnika w kierunku jazdy (wartości dodatnie – wjazd na wzniesienie). Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,9817.



Rys. 6.9. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od kąta pochylenia siewnika przy siewie pszenicy

(źródło: opracowanie własne)

6.2.2. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika kołeczkowego od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla siewu nasion pszenicy

Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę zależności prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w na wydajnością jednostkową dozownika q .

Warunki badania określono w tab. 6.14 a wyniki przedstawiono w tab. 6.15.

Tab. 6.14. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji prędkości obrotowej wałka wysiewającego

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g
Poziom nasion w zbiorniku	23	cm
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.15. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy

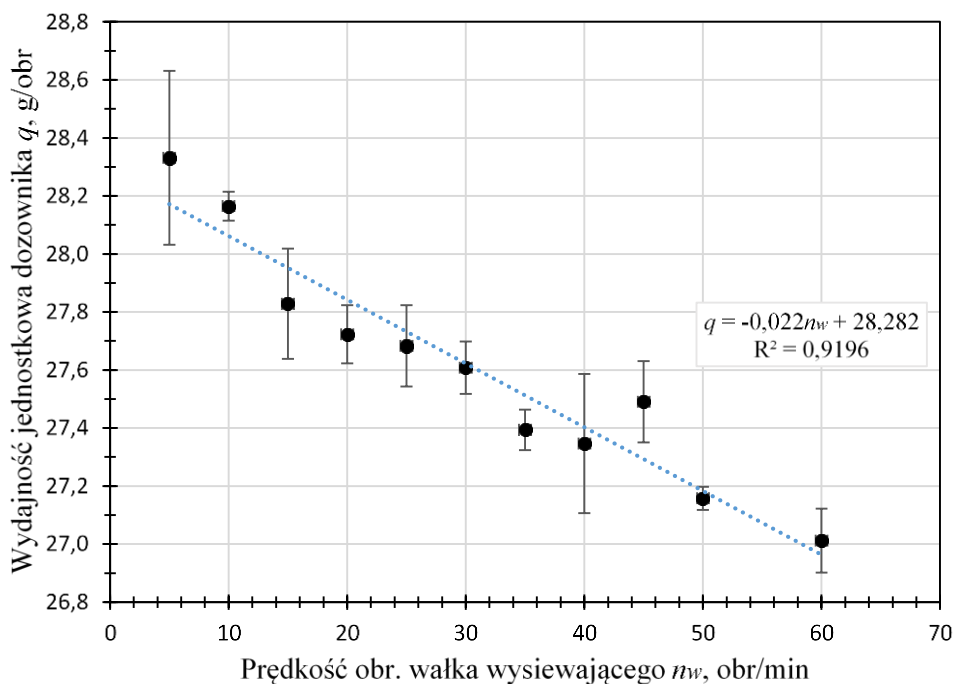
<i>Parametr</i>	n_w	$U(n_w)^*$	q	$U(q)^*$
Jednostka	obr/min	obr/min	g	g
1	5	0,5	28,33	0,30
2	10	0,5	28,16	0,05
3	15	0,5	27,83	0,19
4	20	0,5	27,72	0,10
5	25	0,5	27,68	0,14
6	30	0,5	27,61	0,09
7	35	0,5	27,39	0,07
8	40	0,5	27,35	0,24
9	45	0,5	27,49	0,14
10	50	0,5	27,16	0,04
11	60	0,5	27,01	0,11

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.15 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.10. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia punktowa to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = -0,022n_w + 28,282 \quad (6.5)$$

gdzie n_w oznacza prędkość obrotową wałka wysiewającego. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,9196.



Rys. 6.10. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego przy wysiewie pszenicy

(źródło: opracowanie własne)

6.2.3. Badania pilotażowe zależności wydajność jednostkowej q dozownika kołeczkowego od poziomu nasion w zbiorniku H dla siewu nasion pszenicy

Przeprowadzono badania pilotażowe mające na celu wstępną ocenę zależności poziomu nasion w zbiorniku H na wydajnością jednostkową dozownika q .

Warunki badania określono w tab. 6.16 a wyniki przedstawiono w tab. 6.17.

Tab. 6.16. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji poziomu nasion w zbiorniku

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g
Prędkość obr. wałka wysiewającego	25	obr/min
Kąt pochylenia siewnika β	0	°

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 6.17. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku H uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy

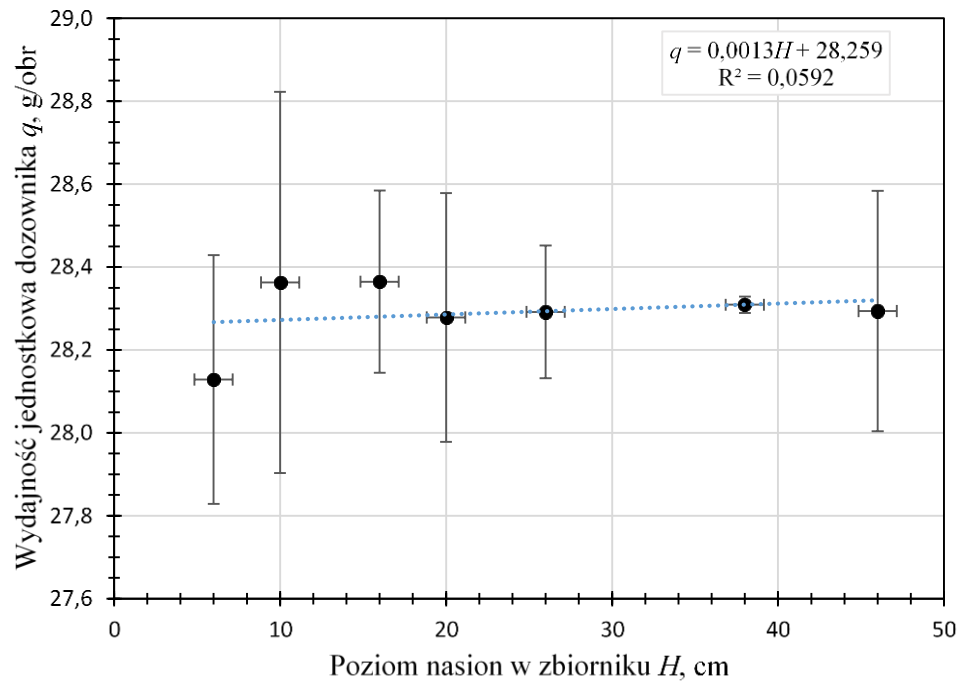
Parametr	H	$U(H)^*$	q	$U(q)^*$
Jednostka	cm	cm	g	g
1	46	1,2	28,29	0,29
2	38	1,2	28,31	0,02
3	26	1,2	28,29	0,16
4	20	1,2	28,28	0,30
5	16	1,2	28,36	0,22
6	10	1,2	28,36	0,46
7	6	1,2	28,13	0,30

* niepewność rozszerzona, (źródło: opracowanie własne)

Dane zawarte w tab. 6.17 zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 6.11. Wyniki eksperymentu przedstawiono jako czarne kółka. Niebieska linia punktowa to wykres uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów funkcji regresji postaci:

$$q = 0,0013H + 28,259 \quad (6.6)$$

gdzie H oznacza poziom nasion w zbiorniku. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wynosi 0,0592.



Rys. 6.11. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku przy siewie pszenicy

(źródło: opracowanie własne)

7. Wyniki badań wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydajności jednostkowej dozownika

7.1. Badanie wydajności jednostkowej dla roweczkowego aparatu wysiewającego

7.1.1. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu pszenicy

Dla wysiewu pszenicy przeprowadzono badania dla dwóch wartości nastawy parametru s (czynna długość wałka wysiewającego). Wynika to z dużego zakresu stosowanych dawek wysiewu dla nasion pszenicy, który wg [62] wynosi od 170 kg/ha do 270 kg/ha. Uzyskanie tak szerokiego zakresu dawkowania (przy ograniczonym zakresie możliwych do uzyskania prędkości obrotowych wałka wysiewającego) wymaga zmiany wydajności jednostkowej aparatu wysiewającego. Na podstawie badań wydajności jednostkowej dozownika w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego dla siewu nasion pszenicy (patrz rozdział 6.1.1) i wyników badań przedstawionych graficznie na rys. 6.1 przyjęto dwa warianty badań. Pierwszy (wariant I) dla $s = 27$ mm i drugi (wariant II) dla $s = 18$ mm.

W pierwszej fazie przeprowadzono badania istotności oddziaływania czynników β (kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy), n_w (prędkość obrotowa wałka wysiewającego), H (poziom nasion w zbiorniku). Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Przyjęto przy tym, że czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości z przedziałów odpowiednio $[-14^\circ, 14^\circ]$ oraz $[10 \text{ obr/min}, 50 \text{ obr/min}]$, natomiast czynnik H mógł przyjmować wartości z przedziału $[10 \text{ cm}, 40 \text{ cm}]$. Na tej podstawie, za pomocą programu Experiment Planner, wyznaczono, przedstawione w tab. 7.2, wartości czynników wejściowych, dla których przeprowadzono eksperymenty.

Tab. 7.1. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa I

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,2	%
Masa 1000 nasion	39,9	g
Czynna długość wałka wysiewającego	27	mm

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.2. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu pszenicy – nastawa I

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	q_1	q_2	q_3
1	0	10	10	17,8857	17,8439	17,8941
2	-7	20	10	17,1355	17,2503	17,1661
3	-14	30	10	16,6714	16,7117	16,8180
4	14	40	10	18,3503	18,4114	18,3858
5	7	50	10	17,7729	17,7139	17,6771
6	-7	10	17	17,0858	17,1629	17,2397
7	-14	20	17	16,6037	16,6672	16,7528
8	14	30	17	17,9263	17,9876	17,9022
9	7	40	17	17,4041	17,4643	17,3498
10	0	50	17	17,0074	16,9069	16,9006
11	-14	10	30	16,9222	17,0090	16,9709
12	14	20	30	18,1892	18,1911	18,2759
13	7	30	30	17,6069	17,6669	17,6255
14	0	40	30	17,1028	17,0823	16,9743
15	-7	50	30	16,5552	16,6523	16,6750
16	14	10	40	18,7251	18,6496	18,7430
17	7	20	40	17,8789	17,9174	17,9334
18	0	30	40	17,3202	17,3786	17,5133
19	-7	40	40	16,8330	16,8126	16,7907
20	-14	50	40	16,2947	16,3050	16,3573

(źródło: opracowanie własne)

Uzyskane rezultaty badań istotności przedstawiono w tab. 7.3. Okazało się, że wszystkie badane czynniki mają istotny wpływ na wartość wydajności jednostkowej dozownika.

Tab. 7.3. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa I

Zmienne wejściowe	Suma kwadratów odchyłeń od war. średniej	Liczba stopni swobody	Odchylenie standardowe	Wartość testu F	Wartość krytyczna statystyki F_{kr}	Istotność czynnika
Kąt pochylenia siewnika β , °	6,21	4	1,5531	212,4134	3,8400	istotny
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w , obr/min	1,34	4	0,3345	45,7465	3,8400	istotny
Poziom nasion w zbiorniku H , cm	0,36	3	0,1215	16,6105	4,0700	istotny
Wartość zmienności resztowej	0,06	8	0,0073			
Suma	7,97	19				

(źródło: opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do drugiej fazy obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej. Jak podano w rozdziale 5.8, badania przeprowadzono zgodnie

z pięciopoziomowym planem rotatabilnym. Otrzymane za pomocą programu Experiment Planner wartości czynników oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.4.

Tab. 7.4. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy– nastawa I, dozownik (Typ R)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-8,3	18,1	16,1	16,9929	16,9961	16,9222
2	8,3	18,1	16,1	18,0774	18,0538	18,1541
3	-8,3	41,9	16,1	17,3483	16,6433	16,6674
4	8,3	41,9	16,1	17,6352	17,6534	17,6322
5	-8,3	18,1	33,9	16,8887	16,9547	17,0050
6	8,3	18,1	33,9	18,1075	18,1658	18,0440
7	-8,3	41,9	33,9	16,6429	16,6901	16,7040
8	8,3	41,9	33,9	17,6887	17,5764	17,5418
9	14	30	25	18,2516	18,2397	18,3199
10	-14	30	25	16,7673	16,5656	16,6353
11	0	50	25	17,1560	17,0331	16,9914
12	0	10	25	17,6636	17,7435	17,6824
13	0	30	40	17,4500	17,5421	17,5315
14	0	30	10	17,5652	17,3696	17,4155
15	0	30	25	17,1722	17,2913	17,2370
16	0	30	25	17,2928	17,3148	17,2624
17	0	30	25	17,3244	17,2376	17,3415
18	0	30	25	17,3002	17,4130	17,2451
19	0	30	25	17,3034	17,2656	17,3951
20	0	30	25	17,2780	17,3674	17,3649

(źródło: opracowanie własne)

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$\begin{aligned}
 q = & 17,69182923 + 0,08945255317 \cdot \beta - 0,03204224126 \cdot n_w + \\
 & 0,04397317695 \cdot H - 0,001249970952 \cdot \beta \cdot n_w - 0,0002467719988 \cdot \beta \cdot \\
 & H - 0,0002769873194 \cdot n_w \cdot H + 0,0005794354668 \cdot \beta^2 + \\
 & 0,0008056920805 \cdot n_w^2 - 0,002265043025 \cdot H^2 + 1,950390789E - 5 \cdot \beta \cdot \\
 & n_w \cdot H - 1,406782471E - 5 \cdot \beta^3 - 8,155785135E - 6 \cdot n_w^3 + \\
 & 3,786388069E - 5 \cdot H^3
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.1) wynosi R=0,9963.

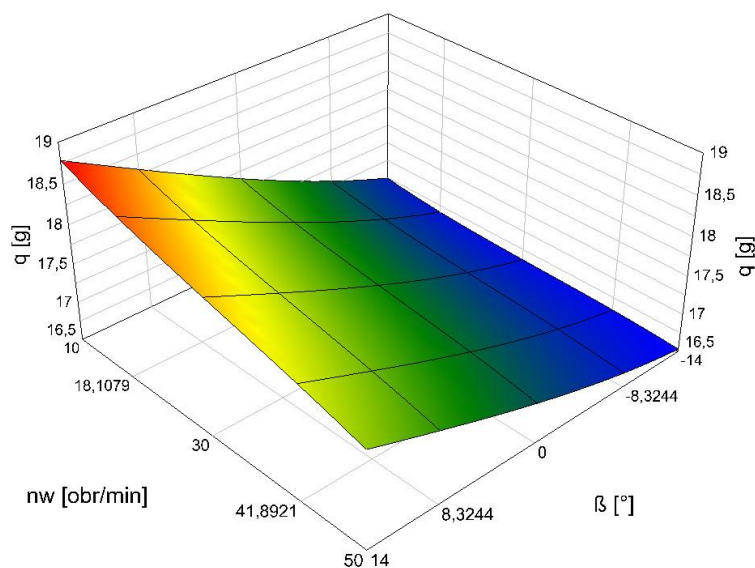
W tab. 7.5 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.1) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.5. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.1) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

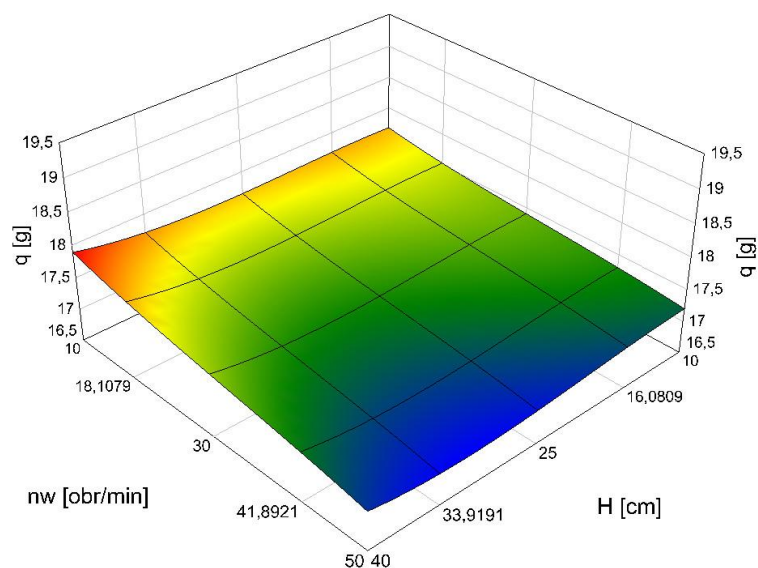
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (\pm)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	16,9704	17,0034	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	-8,3	18,1	16,1
2	18,0951	18,1281	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	8,3	18,1	16,1
3	16,8863	16,9193	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	-8,3	41,9	16,1
4	17,6403	17,6732	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	8,3	41,9	16,1
5	16,9495	16,9825	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	-8,3	18,1	33,9
6	18,1058	18,1387	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	8,3	18,1	33,9
7	16,679	16,712	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	-8,3	41,9	33,9
8	17,6023	17,6353	0,0942	0,033	0,20%	0,20%	8,3	41,9	33,9
9	18,2704	18,2238	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	14	30	25
10	16,6561	16,6095	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	-14	30	25
11	17,0601	17,0135	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	0	50	25
12	17,6965	17,6499	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	0	10	25
13	17,5079	17,4613	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	0	30	40
14	17,4501	17,4035	0,0934	-0,0466	-0,30%	-0,30%	0	30	10
15	17,2335	17,303	0,0807	0,0695	0,40%	0,40%	0	30	25
16	17,29	17,303	0,0807	0,0131	0,10%	0,10%	0	30	25
17	17,3012	17,303	0,0807	0,0019	0,00%	0,00%	0	30	25
18	17,3195	17,303	0,0807	-0,0164	-0,10%	-0,10%	0	30	25
19	17,3214	17,303	0,0807	-0,0183	-0,10%	-0,10%	0	30	25
20	17,3367	17,303	0,0807	-0,0337	-0,20%	-0,20%	0	30	25
Średnia kwadratowa:				0,0377	0,20%	0,20%			

(źródło: opracowanie własne)

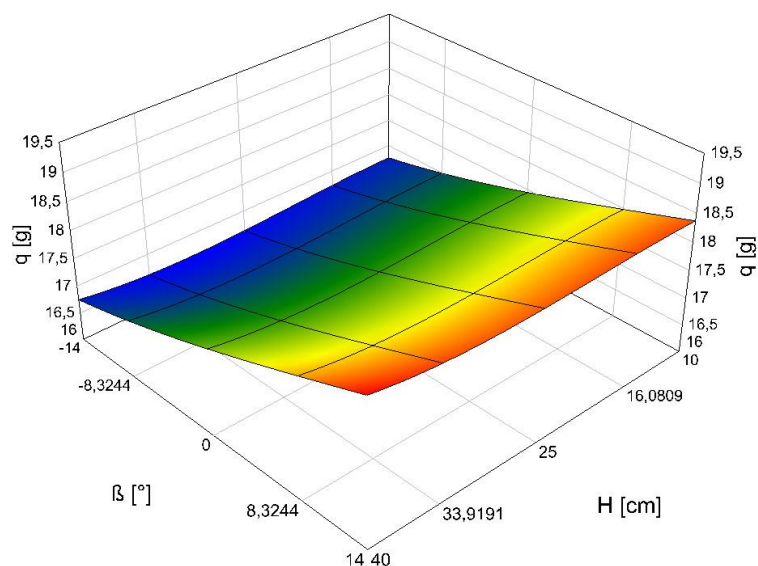
a)



b)



c)



Rys. 7.1. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu pszenicy dla $s = 27$ mm w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

Dla drugiego wariantu (nastawa II), dla zmienionej nastawy s (patrz tab. 7.6), podobnie jak to opisano wcześniej, przeprowadzono badania i obliczenia, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej. Plan eksperymentu oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.7.

Tab. 7.6. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa II

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,2	%
Masa 1000 nasion	39,9	g
Czynna długość wałka wysiewającego	18	mm

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.7. Wartości czynników wejściowych pięciopozomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy– nastawa II, dozownik (Typ R)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-8,3	18,1	16,1	10,9249	10,9038	10,8642
2	8,3	18,1	16,1	11,4564	11,4638	11,5009
3	-8,3	41,9	16,1	10,6887	10,7025	10,7128
4	8,3	41,9	16,1	11,2328	11,8622	11,2309
5	-8,3	18,1	33,9	10,7859	10,8050	10,8254
6	8,3	18,1	33,9	11,4577	11,4781	11,4553
7	-8,3	41,9	33,9	10,6317	10,6206	10,6015
8	8,3	41,9	33,9	11,1301	11,1384	11,1716
9	14	30	25	11,5297	11,4991	11,4917
10	-14	30	25	10,5930	10,6129	10,7266
11	0	50	25	10,8894	10,8822	10,8270
12	0	10	25	11,3056	11,3117	11,2992
13	0	30	40	10,7719	10,9662	11,1203
14	0	30	10	11,0425	11,0453	11,0695
15	0	30	25	11,0492	11,0902	11,0293
16	0	30	25	11,0666	11,0325	11,0579
17	0	30	25	11,0694	11,0753	11,0145
18	0	30	25	11,0445	11,0377	11,2091
19	0	30	25	11,0409	11,2442	11,0391
20	0	30	25	11,0864	11,1724	11,0437

(źródło: opracowanie własne)

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$\begin{aligned}
 q = & 11,05541714 + 0,01421721603 \cdot \beta - 0,03458979096 \cdot n_w + \\
 & 0,05994502605 \cdot H + 0,001085051349 \cdot \beta \cdot n_w + 0,001030492198 \cdot \beta \cdot H - \\
 & 0,0003258331316 \cdot n_w \cdot H + 3,416279092E - 5 \cdot \beta^2 + 0,00118513459 \cdot \\
 & n_w^2 - 0,002057045954 \cdot H^2 - 4,163043356E - 5 \cdot \beta \cdot n_w \cdot H - \\
 & 5,356976433E - 5 \cdot \beta^3 - 1,269500043E - 5 \cdot n_w^3 + 2,350539706E - 5 \cdot H^3
 \end{aligned} \quad (7.2)$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.2) wynosi R=0,9985.

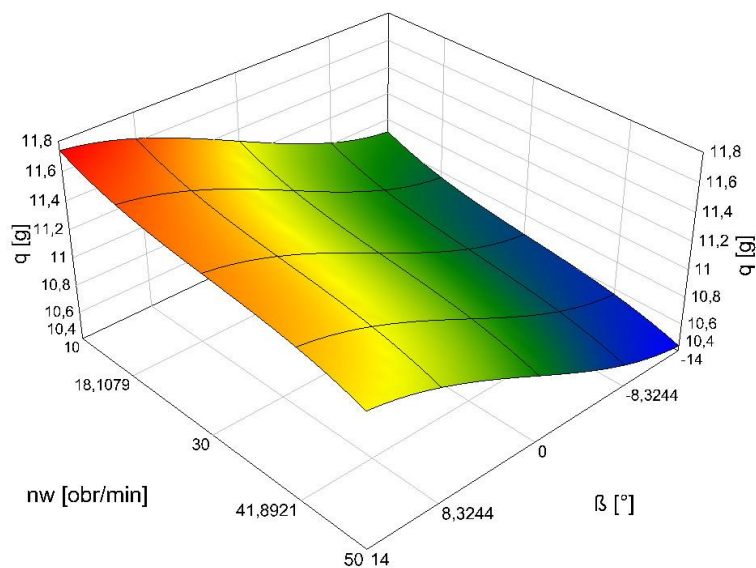
W tab. 7.8 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.2) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.8. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.2) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

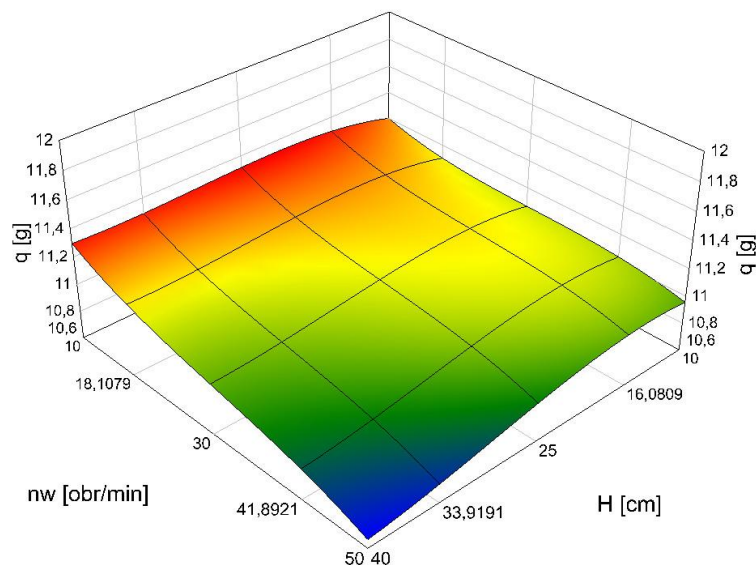
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (\pm)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	10,8976	10,8915	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	-8,3	18,1	16,1
2	11,4737	11,4676	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	8,3	18,1	16,1
3	10,7013	10,6952	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	-8,3	41,9	16,1
4	11,442	11,4359	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	8,3	41,9	16,1
5	10,8054	10,7993	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	-8,3	18,1	33,9
6	11,4637	11,4576	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	8,3	18,1	33,9
7	10,6179	10,6118	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	-8,3	41,9	33,9
8	11,1467	11,1406	0,0366	-0,0061	-0,10%	-0,10%	8,3	41,9	33,9
9	11,5068	11,5155	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	14	30	25
10	10,6442	10,6528	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	-14	30	25
11	10,8662	10,8748	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	0	50	25
12	11,3055	11,3141	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	0	10	25
13	10,9528	10,9615	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	0	30	40
14	11,0524	11,0611	0,0363	0,0086	0,10%	0,10%	0	30	10
15	11,0562	11,0774	0,0313	0,0212	0,20%	0,20%	0	30	25
16	11,0523	11,0774	0,0313	0,0251	0,20%	0,20%	0	30	25
17	11,0531	11,0774	0,0313	0,0244	0,20%	0,20%	0	30	25
18	11,0971	11,0774	0,0313	-0,0197	-0,20%	-0,20%	0	30	25
19	11,1081	11,0774	0,0313	-0,0306	-0,30%	-0,30%	0	30	25
20	11,1008	11,0774	0,0313	-0,0234	-0,20%	-0,20%	0	30	25
Średnia kwadratowa:				0,0147	0,10%	0,10%			

(źródło: opracowanie własne)

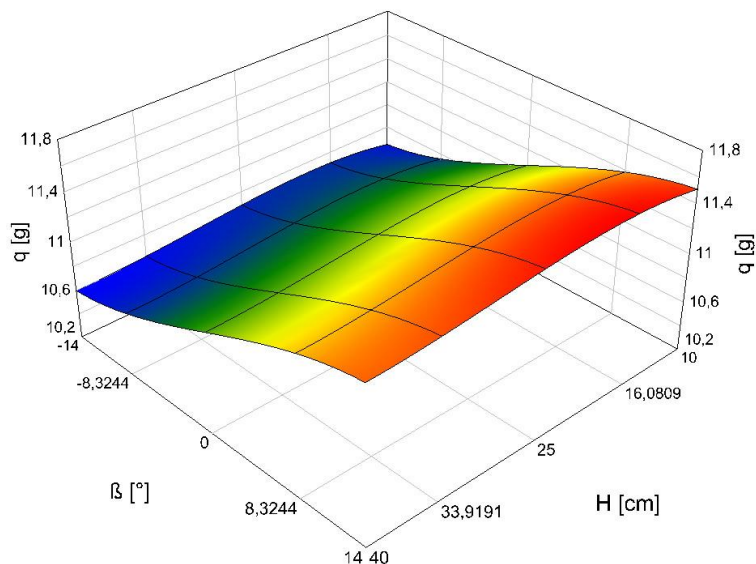
a)



b)



c)



Rys. 7.2. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu pszenicy dla $s = 18$ mm w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej walca wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

7.1.2. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu owsa

W pierwszej fazie przeprowadzono badania istotności oddziaływania czynników β , n_w , H . Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Przyjęto przy tym, że czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości z przedziałów odpowiednio $[-14^\circ, 14^\circ]$ oraz $[10$ obr/min, 50 obr/min], natomiast czynnik H mógł przyjmować wartości z przedziału $[10$ cm, 40 cm]. Na tej podstawie, za pomocą programu Experiment

Planner, wyznaczono, przedstawione w tab. 7.10, wartości czynników wejściowych, dla których przeprowadzono eksperymenty.

Tab. 7.9. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu owsa

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	owies	
Wilgotność	9,1	%
Masa 1000 nasion	36,8	g
Czynna długość wałka wysiewającego	27	mm

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.10. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu owsa

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	q_1	q_2	q_3
1	0	10	10	10,4685	10,3944	10,4239
2	-7	20	10	10,4941	10,4746	10,5247
3	-14	30	10	10,3570	10,2430	10,3473
4	14	40	10	11,0405	10,7696	10,8248
5	7	50	10	10,5136	10,5555	10,6892
6	-7	10	17	10,2560	10,3837	10,1326
7	-14	20	17	10,0104	10,0106	10,0654
8	14	30	17	10,7443	10,5968	10,6018
9	7	40	17	10,3926	10,3191	10,4753
10	0	50	17	10,0334	9,9392	10,0875
11	-14	10	30	10,1674	10,0047	10,0666
12	14	20	30	10,7992	10,8528	10,7379
13	7	30	30	10,5603	10,6459	10,5542
14	0	40	30	10,2972	10,3178	10,3550
15	-7	50	30	10,0873	10,1182	10,2151
16	14	10	40	10,6189	10,5425	10,7662
17	7	20	40	10,5660	10,4413	10,4620
18	0	30	40	10,5599	10,5436	10,5060
19	-7	40	40	10,1839	9,9320	10,2046
20	-14	50	40	9,9464	9,7173	9,7437

(źródło: opracowanie własne)

Uzyskane rezultaty badań istotności przedstawiono w tab. 7.11. Okazało się, że wszystkie badane czynniki mają istotny wpływ na wartość wydajności jednostkowej dozownika.

Tab. 7.11. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu owsa dozownikiem (Typ R)

Zmienne wejściowe	Suma kwadratów odchyłeń od war. średniej	Liczba stopni swobody	Odchylenie standardowe	Wartość testu F	Wartość krytyczna statystyki F_{kr}	Istotność czynnika
Kąt pochylenia siewnika β , °	0,91	4	0,2281	31,1045	3,8400	istotny
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w , obr/min	0,35	4	0,0873	11,8986	3,8400	istotny
Poziom nasion w zbiorniku H , cm	0,21	3	0,0705	9,6174	4,0700	istotny
Wartość zmienności resztowej	0,06	8	0,0073			
Suma	1,53	19				

(źródło: opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do drugiej fazy obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej. Jak podano w rozdziale 5.8, badania przeprowadzono zgodnie z pięciopoziomowym planem rotatabilnym. Otrzymane za pomocą programu Experiment Planner wartości czynników oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.12.

Tab. 7.12. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu owsa dozownikiem (Typ R)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-8,3	18,1	16,1	10,4969	10,4706	10,1891
2	8,3	18,1	16,1	10,7500	10,7617	10,8193
3	-8,3	41,9	16,1	10,1705	10,2179	10,2448
4	8,3	41,9	16,1	10,6848	10,7034	10,6673
5	-8,3	18,1	33,9	10,4451	10,3028	10,1266
6	8,3	18,1	33,9	10,7782	10,8515	10,8457
7	-8,3	41,9	33,9	10,4554	10,3594	10,3985
8	8,3	41,9	33,9	10,7436	10,7406	10,7401
9	14	30	25	10,7261	10,7516	10,8837
10	-14	30	25	9,9775	10,0379	10,1717
11	0	50	25	10,4120	10,4165	10,3773
12	0	10	25	10,6666	10,6818	10,6596
13	0	30	40	10,4957	10,5361	10,4819
14	0	30	10	10,5267	10,7410	10,5638
15	0	30	25	10,5434	10,5511	10,6301
16	0	30	25	10,5678	10,6216	10,6211
17	0	30	25	10,5935	10,5304	10,5783
18	0	30	25	10,6272	10,6179	10,7022
19	0	30	25	10,5847	10,6243	10,6155
20	0	30	25	10,7368	10,7074	10,7066

(źródło: opracowanie własne)

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$q = 11,61107523 + 0,0006281077992 \cdot \beta - 0,04372717544 \cdot n_w - 0,0779933135 \cdot H + 0,000844406097 \cdot \beta \cdot n_w + 0,001194475736 \cdot \beta \cdot H + 0,0003481737557 \cdot n_w \cdot H - 0,0008709987693 \cdot \beta^2 + 0,001310410412 \cdot n_w^2 + 0,003124449096 \cdot H^2 - 3,953101838E - 5 \cdot \beta \cdot n_w \cdot H - 1,471956609E - 6 \cdot \beta^3 - 1,622167688E - 5 \cdot n_w^3 - 4,390748195E - 5 \cdot H^3 \quad (7.3)$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.3) wynosi R=0,9868.

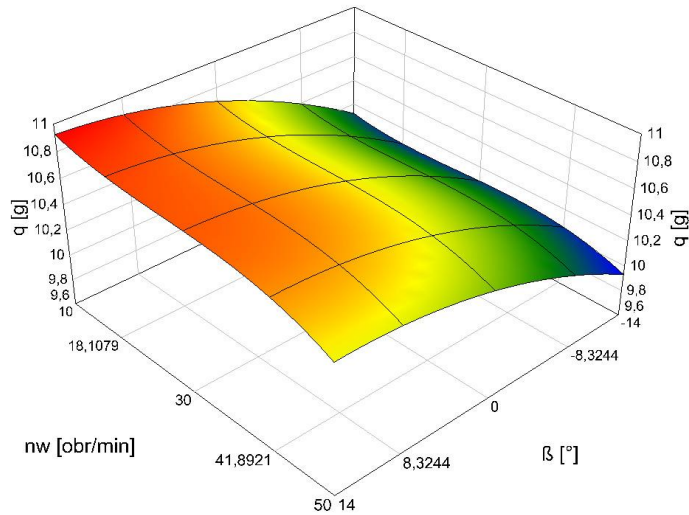
W tab. 7.13 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.3) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.13. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.3) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

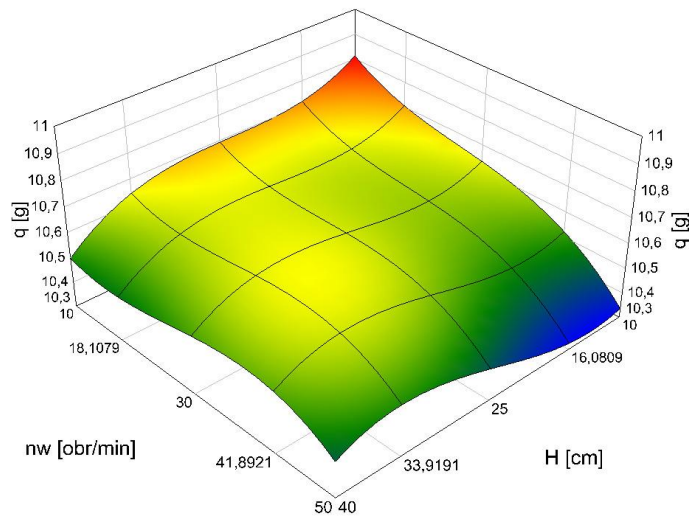
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (±)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	10,3855	10,3691	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	-8,3	18,1	16,1
2	10,777	10,7606	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	8,3	18,1	16,1
3	10,2111	10,1947	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	-8,3	41,9	16,1
4	10,6852	10,6688	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	8,3	41,9	16,1
5	10,2915	10,2751	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	-8,3	18,1	33,9
6	10,8251	10,8087	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	8,3	18,1	33,9
7	10,4044	10,388	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	-8,3	41,9	33,9
8	10,7415	10,725	0,0806	-0,0164	-0,20%	-0,20%	8,3	41,9	33,9
9	10,7871	10,8103	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	14	30	25
10	10,0624	10,0856	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	-14	30	25
11	10,4019	10,4251	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	0	50	25
12	10,6694	10,6926	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	0	10	25
13	10,5046	10,5278	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	0	30	40
14	10,6105	10,6337	0,0799	0,0232	0,20%	0,20%	0	30	10
15	10,5749	10,6187	0,0691	0,0438	0,40%	0,40%	0	30	25
16	10,6035	10,6187	0,0691	0,0151	0,10%	0,10%	0	30	25
17	10,5674	10,6187	0,0691	0,0513	0,50%	0,50%	0	30	25
18	10,6491	10,6187	0,0691	-0,0304	-0,30%	-0,30%	0	30	25
19	10,6082	10,6187	0,0691	0,0105	0,10%	0,10%	0	30	25
20	10,7169	10,6187	0,0691	-0,0983	-0,90%	-0,90%	0	30	25
Średnia kwadratowa:				0,0323	0,30%	0,40%			

(źródło: opracowanie własne)

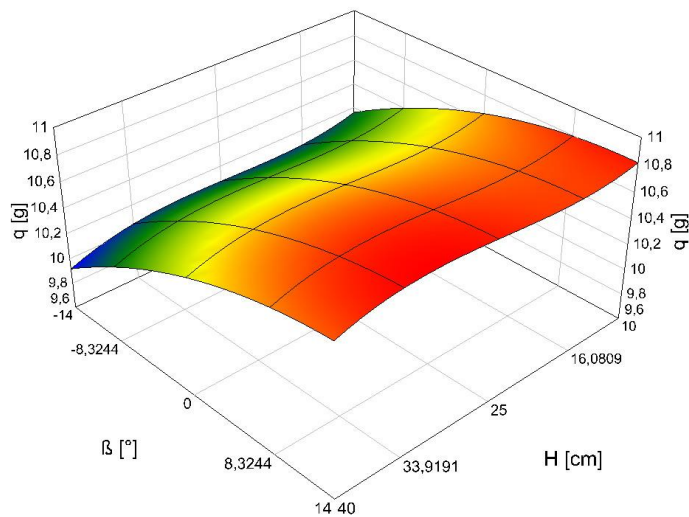
a)



b)



c)



Rys. 7.3. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu owsa w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

7.1.3. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu jęczmienia

W pierwszej fazie przeprowadzono badania istotności oddziaływania czynników β , n_w , H . Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Przyjęto przy tym, że czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości z przedziałów odpowiednio $[-14^\circ, 14^\circ]$ oraz $[10 \text{ obr/min}, 50 \text{ obr/min}]$, natomiast czynnik H mógł przyjmować wartości z przedziału $[10 \text{ cm}, 40 \text{ cm}]$. Na tej podstawie, za pomocą programu Experiment Planner, wyznaczono, przedstawione w tab. 7.15, wartości czynników wejściowych, dla których przeprowadzono eksperymenty.

Tab. 7.14. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu jęczmienia - nastawa I

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	jęczmień	
Wilgotność	12,7	%
Masa 1000 nasion	41,0	g
Czynna długość wałka wysiewającego	15	mm

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.15. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu jęczmienia

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	0	10	5	7,0750	7,1005	7,1751
2	-7	20	5	6,8684	7,0430	7,0713
3	-14	30	5	7,0003	7,1244	7,2534
4	14	40	5	7,5775	7,5888	7,5494
5	7	50	5	7,3597	7,3017	7,4675
6	-7	10	17	7,0077	7,1365	7,2085
7	-14	20	17	6,9844	6,9613	6,9060
8	14	30	17	6,9444	6,9919	7,1048
9	7	40	17	6,9904	7,1065	7,0862
10	0	50	17	6,8962	6,5826	6,5042
11	-14	10	30	6,5969	6,8897	6,9456
12	14	20	30	6,7171	7,0019	6,9075
13	7	30	30	6,5589	6,7914	6,6097
14	0	40	30	6,6716	6,6503	6,4320
15	-7	50	30	6,5948	6,6520	6,5884
16	14	10	40	6,3240	6,9432	7,0907
17	7	20	40	6,3899	6,3400	6,3699
18	0	30	40	6,9311	6,4729	6,3971
19	-7	40	40	6,5334	6,1487	6,8544
20	-14	50	40	6,5376	6,4514	6,5298

(źródło: opracowanie własne)

Uzyskane rezultaty badań istotności przedstawiono w tab. 7.16. Z pośród trzech analizowanych czynników dla wysiewu jęczmienia istotny wpływ (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) na wartość wydajności jednostkowej dozownika ma tylko poziom nasion w zbiorniku.

Tab. 7.16. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu jęczmienia dozownikiem (Typ R)

Zmienne wejściowe	Suma kwadratów odchyłeń od war. średniej	Liczba stopni swobody	Odchylenie standardowe	Wartość testu F	Wartość krytyczna statystyki F_{kr}	Istotność czynnika
Kąt pochylenia siewnika β , °	0,24	4	0,0594	2,7536	3,8400	nieistotny
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w , obr/min	0,10	4	0,0239	1,1075	3,8400	nieistotny
Poziom nasion w zbiorniku H , cm	1,35	3	0,4484	20,7851	4,0700	istotny
Wartość zmienności resztowej	0,17	8	0,0216			
Suma	1,85	19				

(źródło: opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do drugiej fazy badań i obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej. Jak podano w rozdziale 5.8, badania przeprowadzono zgodnie z pięciopoziomowym planem rotabilnym. Pomimo braku wykazania zależności wydajności jednostkowej od β i n_w badania prowadzono dla wszystkich czynników niezależnych w celu zachowania zgodności z programem badań. Przyczyną braku zależności mogła być mała czynność długość wałka wysiewającego co powodowało problem z napływem nasion i tylko poziom nasion w zbiorniku zmieniał warunki pracy dozownika.

Otrzymana średnia wydajność jednostkowa dozownika przy wysiewie jęczmienia dla nastawy $s = 15$ mm jest niewystarczająca do uzyskania wymaganej normy wysiewu dla planowanej maksymalnej prędkości roboczej siewnika. Z uwagi na powyższe dalsze badania przeprowadzono dla nastawy $s = 22$ mm (patrz tab. 7.17).

Otrzymane za pomocą programu Experiment Planner wartości czynników oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.18.

Tab. 7.17. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu jęczmienia - nastawa II

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	jęczmień	
Wilgotność	12,7	%
Masa 1000 nasion	41,0	g
Czynna długość wałka wysiewającego	22	mm

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.18. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu jęczmienia dozownikiem (Typ R)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-8,3	18,1	16,1	10,3903	10,2826	10,2669
2	8,3	18,1	16,1	10,5903	10,5848	10,6923
3	-8,3	41,9	16,1	10,0005	10,1253	10,1316
4	8,3	41,9	16,1	10,3805	10,3639	10,3857
5	-8,3	18,1	33,9	10,2040	10,2642	10,2893
6	8,3	18,1	33,9	10,7993	10,7037	10,7301
7	-8,3	41,9	33,9	10,0960	10,0489	10,0656
8	8,3	41,9	33,9	10,5338	10,5139	10,4645
9	14	30	25	10,3830	10,4917	10,6111
10	-14	30	25	10,0500	9,9809	10,0439
11	0	50	25	10,2845	10,1530	10,1517
12	0	10	25	10,4838	10,5702	10,5245
13	0	30	40	10,5427	10,5589	10,6312
14	0	30	10	10,5120	10,3281	10,2715
15	0	30	25	10,4902	10,3246	10,3541
16	0	30	25	10,3782	10,4103	10,3973
17	0	30	25	10,3944	10,4819	10,4492
18	0	30	25	10,4267	10,5119	10,3934
19	0	30	25	10,4494	10,3821	10,3346
20	0	30	25	10,4184	10,4029	10,4830

(źródło: opracowanie własne)

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$\begin{aligned}
 q = & 10,22557273 + 0,01121911696 \cdot \beta + 0,008058376567 \cdot n_w + \\
 & 0,04177193613 \cdot H + 4,428074295E - 5 \cdot \beta \cdot n_w + 0,000717068591 \cdot \beta \cdot \\
 & H + 5,958046342E - 5 \cdot n_w \cdot H - 0,000766097191 \cdot \beta^2 - \\
 & 0,000531085084 \cdot n_w^2 - 0,002026937307 \cdot H^2 - 5,624541016E - 6 \cdot \beta \cdot \\
 & n_w \cdot H - 4,82618335E - 5 \cdot \beta^3 + 4,540006899E - 6 \cdot n_w^3 + 3,08049572E - \\
 & 5 \cdot H^3
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.4) wynosi R=0,997.

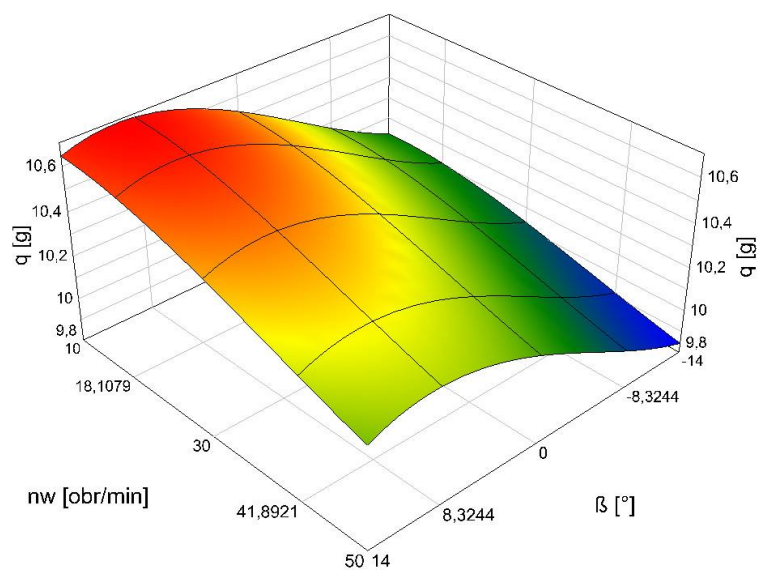
W tab. 7.19 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.4) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.19. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.4) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

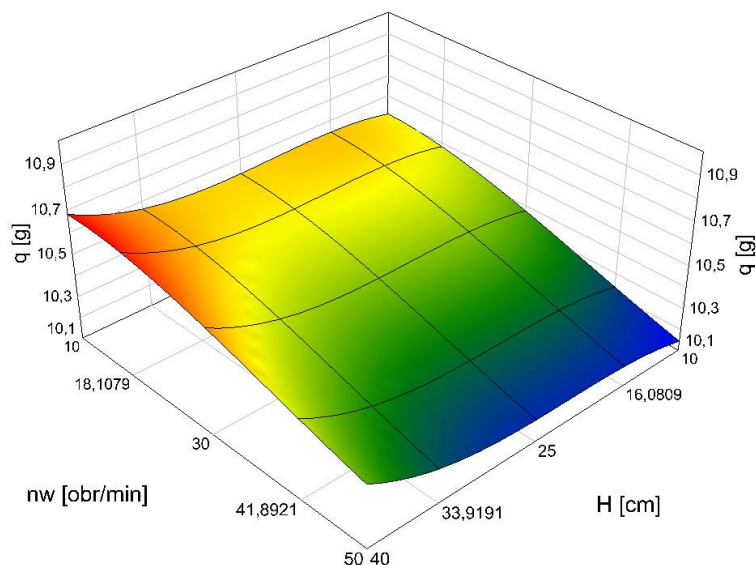
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (\pm)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	10,3133	10,3097	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	-8,3	18,1	16,1
2	10,6225	10,6188	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	8,3	18,1	16,1
3	10,0858	10,0822	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	-8,3	41,9	16,1
4	10,3767	10,3731	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	8,3	41,9	16,1
5	10,2525	10,2489	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	-8,3	18,1	33,9
6	10,7444	10,7408	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	8,3	18,1	33,9
7	10,0702	10,0665	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	-8,3	41,9	33,9
8	10,504	10,5004	0,035	-0,0036	0,00%	0,00%	8,3	41,9	33,9
9	10,4953	10,5004	0,0347	0,0051	0,00%	0,00%	14	30	25
10	10,025	10,0301	0,0347	0,0051	0,10%	0,10%	-14	30	25
11	10,1964	10,2015	0,0347	0,0051	0,10%	0,10%	0	50	25
12	10,5261	10,5313	0,0347	0,0051	0,00%	0,00%	0	10	25
13	10,5776	10,5827	0,0347	0,0051	0,00%	0,00%	0	30	40
14	10,3705	10,3756	0,0347	0,0051	0,00%	0,00%	0	30	10
15	10,3896	10,4154	0,03	0,0258	0,20%	0,20%	0	30	25
16	10,3953	10,4154	0,03	0,0201	0,20%	0,20%	0	30	25
17	10,4418	10,4154	0,03	-0,0264	-0,30%	-0,30%	0	30	25
18	10,444	10,4154	0,03	-0,0286	-0,30%	-0,30%	0	30	25
19	10,3887	10,4154	0,03	0,0267	0,30%	0,30%	0	30	25
20	10,4348	10,4154	0,03	-0,0194	-0,20%	-0,20%	0	30	25
Średnia kwadratowa:				0,014	0,10%	0,10%			

(źródło: opracowanie własne)

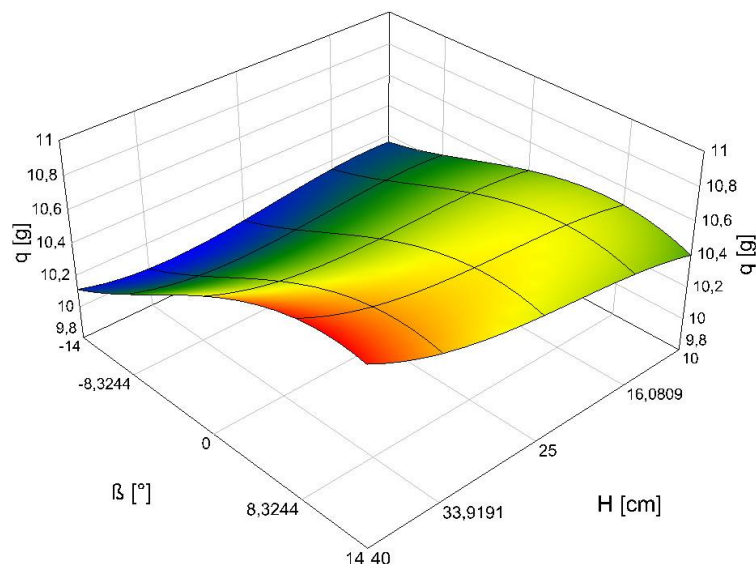
a)



b)



c)



Rys. 7.4. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu jęczmienia w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej walka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla:

a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

7.1.4. Badanie wydajności jednostkowej dla wysiewu rzepaku

W pierwszej fazie przeprowadzono badania istotności oddziaływania czynników β , n_w , H . Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Przyjęto przy tym, że czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości z przedziałów odpowiednio $[-14^\circ, 14^\circ]$ oraz $[10 \text{ obr/min}, 50 \text{ obr/min}]$, natomiast czynnik H mógł przyjmować wartości z przedziału $[10 \text{ cm}, 17 \text{ cm}]$. Na tej podstawie, za pomocą programu Experiment Planner, wyznaczono, przedstawione w tab. 7.21, wartości czynników wejściowych, dla których przeprowadzono eksperymenty.

Tab. 7.20. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu rzepaku

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	rzepak	
Wilgotność	6,5	%
Masa 1000 nasion	4,45	g

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.21. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu rzepaku

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	q_1	q_2	q_3
1	0	10	10	0,4354	0,4315	0,4320
2	-7	20	10	0,4183	0,4264	0,4248
3	-14	30	10	0,4167	0,4169	0,4178
4	14	40	10	0,4247	0,4239	0,4260
5	7	50	10	0,4237	0,4225	0,4139
6	-7	10	12,3	0,4152	0,4258	0,4258
7	-14	20	12,3	0,4198	0,4259	0,4227
8	14	30	12,3	0,4194	0,4212	0,4228
9	7	40	12,3	0,4088	0,4055	0,4079
10	0	50	12,3	0,4058	0,4045	0,4020
11	-14	10	14,7	0,4045	0,4076	0,4095
12	14	20	14,7	0,4146	0,4157	0,4173
13	7	30	14,7	0,4088	0,4048	0,4033
14	0	40	14,7	0,3968	0,3920	0,4004
15	-7	50	14,7	0,3924	0,4003	0,3943
16	14	10	17	0,4186	0,4245	0,4229
17	7	20	17	0,4068	0,4059	0,4075
18	0	30	17	0,3908	0,3924	0,3917
19	-7	40	17	0,3975	0,3980	0,3962
20	-14	50	17	0,3851	0,3867	0,3869

(źródło: opracowanie własne)

Uzyskane rezultaty badań istotności przedstawiono w tab. 7.22. Okazało się, że wszystkie badane czynniki mają istotny wpływ na wartość wydajności jednostkowej dozownika.

Tab. 7.22. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu rzepaku dozownikiem (Typ R)

Zmienne wejściowe	Suma kwadratów odchyleń od war. średniej	Liczba stopni swobody	Odchylenie standardowe	Wartość testu F	Wartość krytyczna statystyki F_{kr}	Istotność czynnika
Kąt pochylenia siewnika β , °	0,0004	4	0,0001	5,0530	3,8400	istotny
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w , obr/min	0,0010	4	0,0003	13,6988	3,8400	istotny
Poziom nasion w zbiorniku H , cm	0,0017	3	0,0006	29,7148	4,0700	istotny
Wartość zmienności resztowej	0,0001	8	0,0000			
Suma	0,0032	19				

(źródło: opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do drugiej fazy obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej.

Tab. 7.23. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu rzepaku dozownikiem (Typ R)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-8,3	18,1	11,4	0,5085	0,4388	0,4411
2	8,3	18,1	11,4	0,4482	0,4530	0,4575
3	-8,3	41,9	11,4	0,4330	0,4296	0,4274
4	8,3	41,9	11,4	0,4431	0,4377	0,4393
5	-8,3	18,1	15,6	0,4208	0,4260	0,4239
6	8,3	18,1	15,6	0,4250	0,4266	0,4292
7	-8,3	41,9	15,6	0,4052	0,4067	0,4078
8	8,3	41,9	15,6	0,4200	0,4186	0,4166
9	14	30	13,5	0,4315	0,4286	0,4328
10	-14	30	13,5	0,4137	0,4184	0,4171
11	0	50	13,5	0,4179	0,4175	0,4161
12	0	10	13,5	0,4382	0,4368	0,4380
13	0	30	17	0,4068	0,4001	0,4134
14	0	30	10	0,4379	0,4435	0,4457
15	0	30	13,5	0,4286	0,4319	0,4345
16	0	30	13,5	0,4306	0,4349	0,4317
17	0	30	13,5	0,4297	0,4301	0,4354
18	0	30	13,5	0,4351	0,4301	0,4343
19	0	30	13,5	0,4348	0,4323	0,4355
20	0	30	13,5	0,4401	0,4404	0,4341

(źródło: opracowanie własne)

Jak podano w rozdziale 5.8, badania przeprowadzono zgodnie z pięciopoziomowym planem rotabilnym. Otrzymane za pomocą programu Experiment Planner wartości czynników oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.23.

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$q = 0,03120492984 - 0,005306446053 \cdot \beta + 0,0004246988537 \cdot n_w + 0,105364725 \cdot H + 0,0001302510392 \cdot \beta \cdot n_w + 0,0003186000848 \cdot \beta \cdot H + 0,0001015469626 \cdot n_w \cdot H - 2,616471546E - 5 \cdot \beta^2 - 8,556611359E - 5 \cdot n_w^2 - 0,00823572725 \cdot H^2 - 6,985875753E - 6 \cdot \beta \cdot n_w \cdot H + 2,274105E - 6 \cdot \beta^3 + 9,116743518E - 7 \cdot n_w^3 + 0,0001947504532 \cdot H^3 \quad (7.5)$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.5) wynosi R=0,9677.

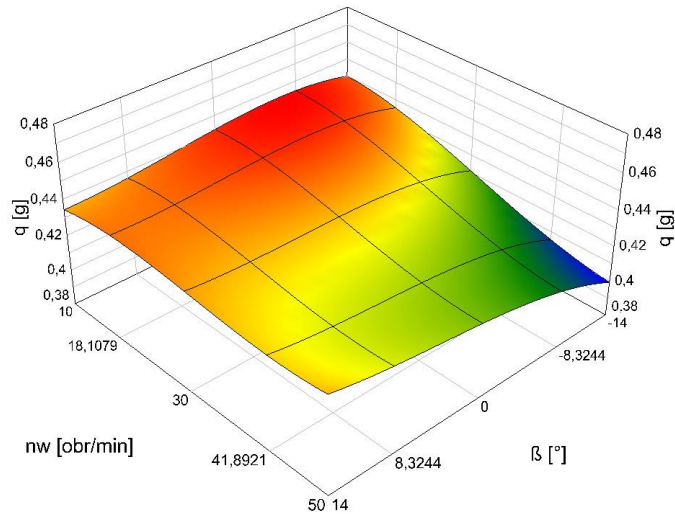
W tab. 7.24 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.5) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.24. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.5) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

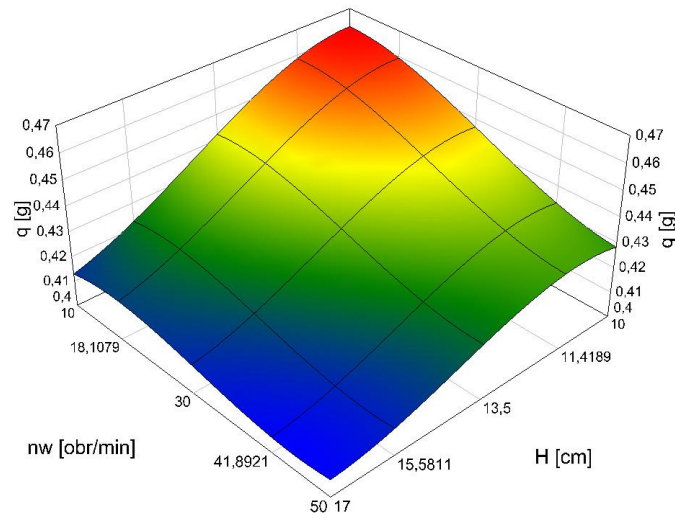
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (±)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	0,4628	0,4597	0,0286	-0,0032	-0,70%	-0,70%	-8,3	18,1	11,4
2	0,4529	0,4497	0,0286	-0,0032	-0,70%	-0,70%	8,3	18,1	11,4
3	0,43	0,4268	0,0286	-0,0032	-0,70%	-0,70%	-8,3	41,9	11,4
4	0,4401	0,4369	0,0286	-0,0032	-0,70%	-0,70%	8,3	41,9	11,4
5	0,4235	0,4204	0,0286	-0,0032	-0,80%	-0,70%	-8,3	18,1	15,6
6	0,4269	0,4238	0,0286	-0,0032	-0,70%	-0,70%	8,3	18,1	15,6
7	0,4065	0,4034	0,0286	-0,0032	-0,80%	-0,80%	-8,3	41,9	15,6
8	0,4184	0,4152	0,0286	-0,0032	-0,80%	-0,80%	8,3	41,9	15,6
9	0,431	0,4354	0,0283	0,0045	1,00%	1,00%	14	30	13,5
10	0,4164	0,4209	0,0283	0,0045	1,10%	1,10%	-14	30	13,5
11	0,4172	0,4216	0,0283	0,0045	1,10%	1,10%	0	50	13,5
12	0,4377	0,4421	0,0283	0,0045	1,00%	1,00%	0	10	13,5
13	0,4067	0,4112	0,0283	0,0045	1,10%	1,10%	0	30	17
14	0,4424	0,4468	0,0283	0,0045	1,00%	1,00%	0	30	10
15	0,4317	0,4333	0,0245	0,0016	0,40%	0,40%	0	30	13,5
16	0,4324	0,4333	0,0245	0,0009	0,20%	0,20%	0	30	13,5
17	0,4317	0,4333	0,0245	0,0016	0,40%	0,40%	0	30	13,5
18	0,4332	0,4333	0,0245	0,0001	0,00%	0,00%	0	30	13,5
19	0,4342	0,4333	0,0245	-0,0009	-0,20%	-0,20%	0	30	13,5
20	0,4382	0,4333	0,0245	-0,0049	-1,10%	-1,10%	0	30	13,5
Średnia kwadratowa:				0,0034	0,80%	0,80%			

(źródło: opracowanie własne)

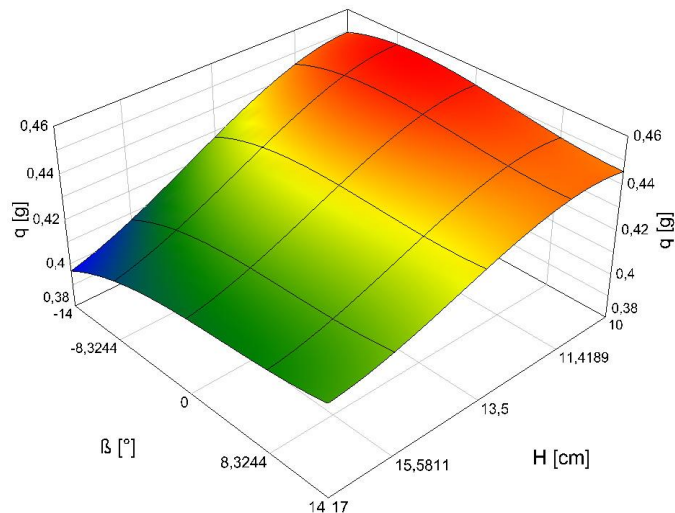
a)



b)



c)



Rys. 7.5. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu rzepaku w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej walca wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 13,5$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

7.2. Badanie wydatków jednostkowych dla kołeczkowego zespołu wysiewającego

W pierwszej fazie przeprowadzono badania istotności oddziaływania czynników β , n_w , H . Dla czynników β i n_w przyjęto po pięć poziomów, natomiast dla czynnika H cztery poziomy. Przyjęto przy tym, że czynniki β i n_w mogą przyjmować dowolne wartości z przedziałów odpowiednio $[-12^\circ, 18^\circ]$ oraz $[5 \text{ obr/min}, 50 \text{ obr/min}]$, natomiast czynnik H mógł przyjmować wartości z przedziału $[7 \text{ cm}, 46 \text{ cm}]$. Na tej podstawie, za pomocą programu Experiment Planner, wyznaczono, przedstawione w tab. 7.26, wartości czynników wejściowych, dla których przeprowadzono eksperymenty.

Tab. 7.25. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) dla wysiewu pszenicy

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 7.26. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ K) oraz wyniki tych badań dla wysiewu pszenicy

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	3	5	7	29,8125	29,8151	29,9540
2	-4,5	16	7	27,8412	28,0344	28,1503
3	-12	27	7	26,2965	26,4545	26,7246
4	18	39	7	29,5231	29,5042	29,6493
5	10,5	50	7	28,7734	28,7208	28,9293
6	-4,5	5	23	30,0705	29,9975	29,9810
7	-12	16	23	27,7519	27,6243	27,7274
8	18	27	23	29,7085	30,0916	29,9398
9	10,5	39	23	28,8603	29,0595	29,0357
10	3	50	23	28,1850	28,1122	28,3371
11	-12	5	23	29,0570	29,1845	29,4708
12	18	16	23	30,6530	30,7525	30,8383
13	10,5	27	23	29,4569	29,5558	29,7146
14	3	39	23	28,6215	28,4474	29,2795
15	-4,5	50	23	27,5888	27,5084	27,5978
16	18	5	46	32,3498	32,3395	32,1810
17	10,5	16	46	30,3994	30,2460	30,4833
18	3	27	46	28,9960	29,1498	29,0533
19	-4,5	39	46	28,0392	28,1270	27,8651
20	-12	50	46	26,6137	26,4968	26,4733

(źródło: opracowanie własne)

Uzyskane rezultaty badań istotności przedstawiono w tab. 7.27. Okazało się, że wszystkie badane czynniki mają istotny wpływ na wartość wydajności jednostkowej dozownika.

Tab. 7.27. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu pszenicy dozownikiem (Typ K)

Zmienne wejściowe	Suma kwadratów odchyłeń od war. średniej	Liczba stopni swobody	Odchylenie standardowe	Wartość testu F	Wartość krytyczna statystyki F_{kr}	Istotność czynnika
Kąt pochylenia siewnika β , °	22,14	4	5,5356	98,1079	3,8400	istotny
Prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w , obr/min	13,78	4	3,4454	61,0632	3,8400	istotny
Poziom nasion w zbiorniku H , cm	1,52	3	0,5078	9,0000	4,0700	istotny
Wartość zmienności resztowej	0,45	8	0,0564			
Suma	37,90	19				

(źródło: opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do drugiej fazy obliczeń, które miały na celu uzyskanie modelu matematycznego wiążącego wartości czynników wejściowych z wartością wydajności jednostkowej.

Tab. 7.28. Wartości czynników wejściowych pięciopozomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy dozownikiem (Typ K)

Lp.	Czynniki wejściowe			Wydajność jednostkowa		
	β	n_w	H	$q1$	$q2$	$q3$
1	-5,9	14,1	14,9	28,8901	28,6643	28,7029
2	11,9	14,1	14,9	30,4638	30,6643	30,6304
3	-5,9	40,9	14,9	27,9083	27,7052	27,5327
4	11,9	40,9	14,9	29,2494	29,5002	29,4663
5	-5,9	14,1	38,1	28,7757	28,8213	28,7972
6	11,9	14,1	38,1	30,1788	30,2701	30,3332
7	-5,9	40,9	38,1	27,5806	27,6548	27,5074
8	11,9	40,9	38,1	29,8492	29,2078	29,1821
9	18	27,5	26,5	30,1031	30,1200	30,2394
10	-12	27,5	26,5	27,4037	27,2942	27,0652
11	3	50	26,5	28,1395	28,2792	28,2639
12	3	5	26,5	30,7320	31,1139	31,0455
13	3	27,5	46	29,1271	28,8635	29,0906
14	3	27,5	7	28,9193	28,9592	28,9970
15	3	27,5	26,5	28,7107	28,9174	28,9497
16	3	27,5	26,5	28,9746	29,1658	29,1867
17	3	27,5	26,5	29,2062	29,0961	29,0438
18	3	27,5	26,5	29,0553	28,8994	29,0847
19	3	27,5	26,5	28,8482	28,8925	29,0960
20	3	27,5	26,5	29,0851	28,8202	29,2046

(źródło: opracowanie własne)

Jak podano w rozdziale 5.8, badania przeprowadzono zgodnie z pięciopoziomowym planem rotabilnym. Otrzymane za pomocą programu Experiment Planner wartości czynników oraz odpowiadające im wyniki dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 7.28.

Po wprowadzeniu danych z przeprowadzonych eksperymentów uzyskano następujący wielomian opisujący poszukiwany model:

$$q = 31,30662387 + 0,1386415091 \cdot \beta - 0,2338467646 \cdot n_w + 0,0522148883 \cdot H - 0,0009925801341 \cdot \beta \cdot n_w - 0,001551995534 \cdot \beta \cdot H - 1,575528057E - 5 \cdot n_w \cdot H - 0,001543675135 \cdot \beta^2 + 0,006346340797 \cdot n_w^2 - 0,00210051408 \cdot H^2 + 4,637525525E - 5 \cdot \beta \cdot n_w \cdot H + 7,57305479E - 6 \cdot \beta^3 - 6,353134509E - 5 \cdot n_w^3 + 2,498342415E - 5 \cdot H^3 \quad (7.6)$$

Współczynnik korelacji dla modelu (7.6) wynosi R=0,9984.

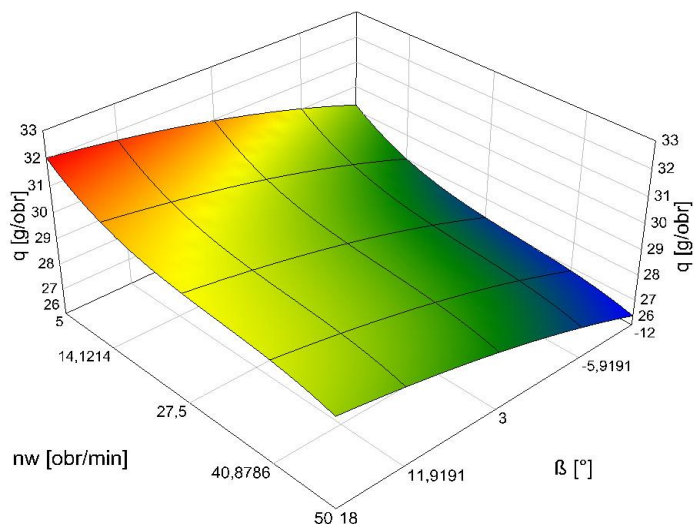
W tab. 7.29 przedstawiono porównanie wartości wydatku jednostkowego uzyskanych za pomocą modelu (7.6) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu.

Tab. 7.29. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.6) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu

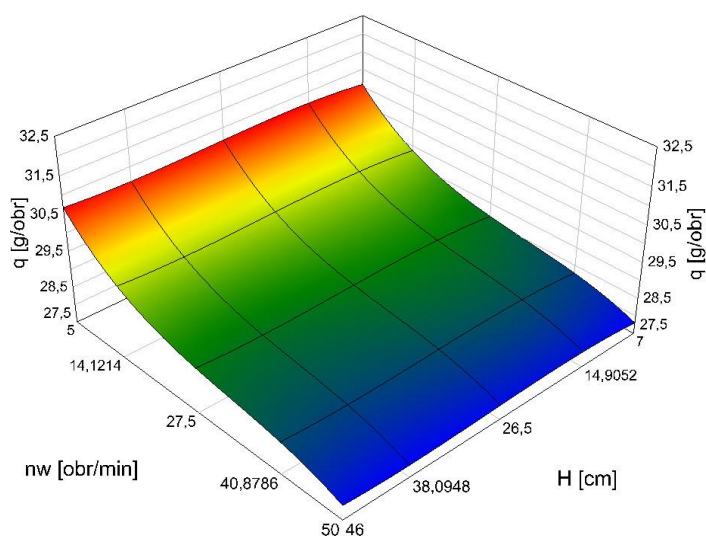
Lp.	Średni wynik badania	Wynik modelu	Przedział ufności (±)	Różnica wyników badanie – model			β°	n_w obr/min	H cm
				Całkowita	Badanie, %	Model, %			
1	28,7524	28,7679	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	-5,9	14,1	14,9
2	30,5862	30,6016	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	11,9	14,1	14,9
3	27,7154	27,7308	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	-5,9	40,9	14,9
4	29,4053	29,4207	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	11,9	40,9	14,9
5	28,7981	28,8135	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	-5,9	14,1	38,1
6	30,2607	30,2761	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	11,9	14,1	38,1
7	27,5809	27,5964	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	-5,9	40,9	38,1
8	29,413	29,4285	0,1288	0,0154	0,10%	0,10%	11,9	40,9	38,1
9	30,1542	30,1323	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	18	27,5	26,5
10	27,2544	27,2325	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	-12	27,5	26,5
11	28,2275	28,2057	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	3	50	26,5
12	30,9638	30,942	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	3	5	26,5
13	29,0271	29,0052	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	3	27,5	46
14	28,9585	28,9367	0,1277	-0,0218	-0,10%	-0,10%	3	27,5	7
15	28,8593	29,0144	0,1104	0,1551	0,50%	0,50%	3	27,5	26,5
16	29,109	29,0144	0,1104	-0,0946	-0,30%	-0,30%	3	27,5	26,5
17	29,1154	29,0144	0,1104	-0,101	-0,30%	-0,30%	3	27,5	26,5
18	29,0131	29,0144	0,1104	0,0013	0,00%	0,00%	3	27,5	26,5
19	28,9456	29,0144	0,1104	0,0688	0,20%	0,20%	3	27,5	26,5
20	29,0366	29,0144	0,1104	-0,0222	-0,10%	-0,10%	3	27,5	26,5
Średnia kwadratowa:				0,0516	0,20%	0,20%			

(źródło: opracowanie własne)

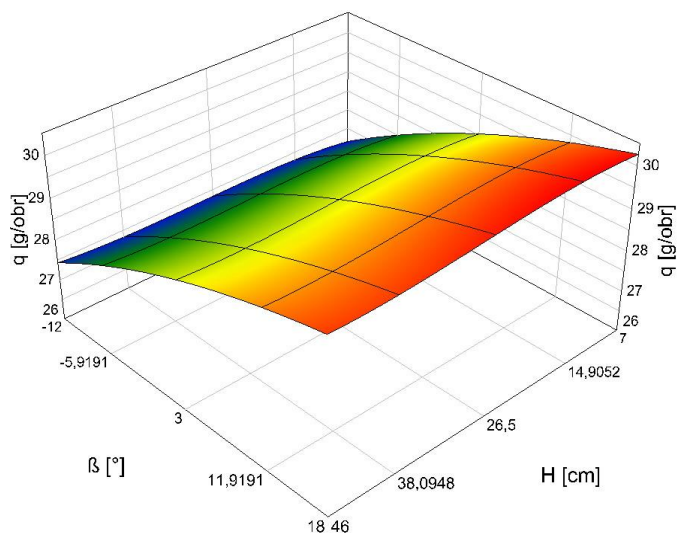
a)



b)



c)



Rys. 7.6. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ K podczas wysiewu pszenicy w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej walca wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min

(źródło: opracowanie własne)

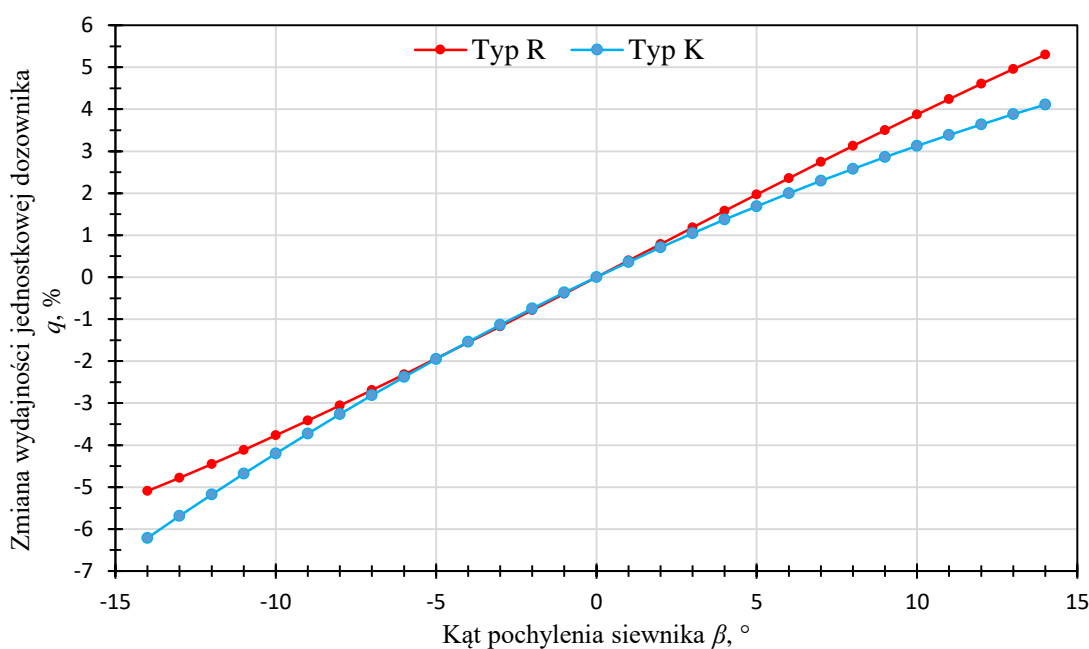
7.3. Dyskusja wyników

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz otrzymano modele regresyjne, opisujące zależność wydajności jednostkowej badanych dozowników, dla wybranych rodzajów nasion i ustawień aparatu wysiewającego (patrz rozdział 5.3), od wartości czynników eksploatacyjnych (β , n_w , H).

Dla badaczy i projektantów aparatów wysiewających interesujące jest porównanie tych zależności w kontekście zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i nastaw analizowanych dozowników nasion.

Przykładowo wielomiany (7.1) i (7.6) uzyskane dla wysiewu nasion pszenicy odpowiednio roweczkowym (Typ R) i kołeczkowym (Typ K) aparatem wysiewającym, zostały wykorzystane do porównania wpływu kąta pochylenia siewnika β , prędkości kątowej wałka wysiewającego n_w oraz wysokości warstwy nasion w skrzyni nasiennej siewnika H , na wartość wydajności jednostkowej dla obu aparatów wysiewających. Jako miarę wpływu przyjęto procentową zmianę wydajności jednostkowej danego typu dozownika od wartości bazowej, którą była wydajność jednostkowa danego dozownika dla następujących wartości czynników eksploatacyjnych: $\beta = 0^\circ$, $n_w = 25$ obr/min, $H = 23$ cm.

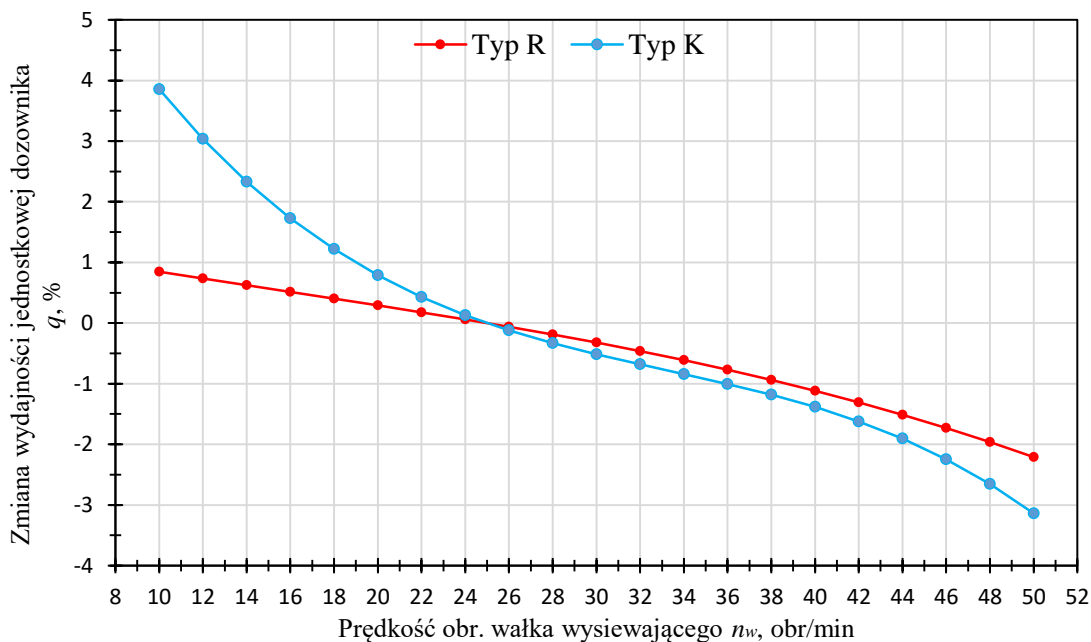
Dla porównania wpływu kąta pochylenia siewnika β na wydajność jednostkową q dozowników, przyjęto następujące wartości pozostałych parametrów: $n_w = 25$ obr/min, $H = 23$ cm. Na wykresie (rys. 7.7) przedstawiono procentowe zmiany wydajności jednostkowej dozowników w funkcji kąta pochylenia siewnika.



Rys. 7.7. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β dla $n_w = 25$ obr/min i $H = 23$ cm

(źródło: opracowanie własne)

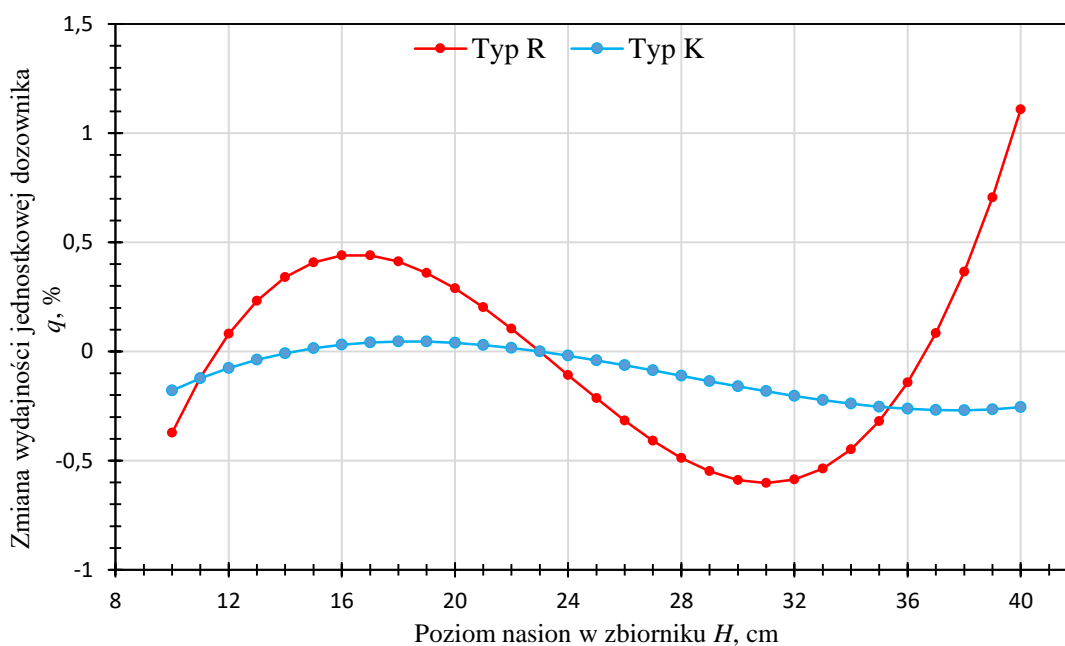
Wpływ prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w na wydajność jednostkową dla obu badanych aparatów wysiewających przedstawiono na rys. 7.8. Dla pozostałych parametrów przyjęto następujące wartości: $\beta = 0^\circ$, $H = 23$ cm.



Rys. 7.8. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od wartości prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla $\beta = 0^\circ$ i $H = 23$ cm

(źródło: opracowanie własne)

Dla porównania wpływu poziomu nasion w zbiorniku H na wydajność jednostkową dla obu badanych aparatów wysiewających przyjęto następujące wartości pozostałych parametrów: $\beta = 0^\circ$, $n_w = 25$ obr/min.



Rys. 7.9. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od poziomu nasion w zbiorniku H dla $n_w = 25$ obr/min i $\beta = 0^\circ$

(źródło: opracowanie własne)

Przedstawione wyniki, świadczą, w zgodzie z danymi literaturowymi [50, 23, 22, 6], że największy wpływ na zmianę wydajności jednostkowej dozownika (niezależnie o typu aparatu wysiewającego) ma kąt pochylenia siewnika β .

Nie mniej jednak interesujący jest również łączny wpływ analizowanych czynników na dawkowanie nasion. Jednym ze wskaźników opisujących taki wpływ jest odchyłka dawkowania, określona na podstawie zależności (7.7).

$$\Delta q = \frac{q_{Mmax} - q_{Mmin}}{\bar{q}_M} \cdot 100\% \quad (7.7)$$

gdzie: Δq - odchyłka dawkowania w %,
 q_{Mmax} - wydajność jednostkowa z modelu – wartość maksymalna w g/obr,
 q_{Mmin} - wydajność jednostkowa z modelu – wartość minimalna w g/obr,
 \bar{q}_M - wydajność jednostkowa z modelu – wartość średnia w g/obr,

Wartość q_{Mmax} i q_{Mmin} wyznaczono z funkcji regresji opisującej wydajność jednostkową aparatu wysiewającego siewnika.

Poszukiwania maksimum i minimum przeprowadzono dla następującego zakresu zmienności czynników eksploatacyjnych:

- kąt pochylenia siewnika β od -14° do 14° ,
- prędkość obrotowa wałka wysiewającego n_w od 10 obr/min do 50 obr/min,
- poziom nasion w zbiorniku H od 10 cm do 40 cm.

Uzyskane skrajne wartości wydajności dozowników i odpowiadające im wartości parametrów eksploatacyjnych oraz odchyłka dawkowania, dla analizowanych wariantów badawczych przedstawiono w tab. 7.30.

Tab. 7.30. Odchyłka dawkowania w oparciu o analizę modeli regresyjnych poszczególnych wariantów badawczych

Typ dozownika	Rodzaj nasion	Wydajność min	Parametry eksploatacyjne dla q_{Mmin}	Wydajność max	Parametry eksploatacyjne dla q_{Mmax}	Odchyłka dawkowania
		q_{Mmax} , g/obr	β° ; n_w obr/min; H cm	q_{Mmin} , g/obr	β° ; n_w obr/min; H cm	Δq , %
Typ R	pszenica I	16,4054	-14; 50; 35	19,0145	14; 10; 40	14,73
Typ R	pszenica II	10,2985	-14; 50; 10	11,8505	14; 10; 40	14,01
Typ R	owies	9,6787	-14; 50; 10	10,9758	14; 10; 33	12,56
Typ R	jęczmień	9,8295	-14; 50; 30	10,9441	12; 10; 40	10,73
Typ R	rzepak	0,38539	-14; 48; 17	0,47329	-12; 10; 10	20,47
Typ K	pszenica	25,835	-14; 50; 40	31,2436	14; 10; 11	18,95

(źródło: opracowanie własne)

Otrzymane wartości odchyłek dawkowania dla wyników uzyskanych z poszczególnych modeli regresyjnych, pozwoliły na porównanie zakresu zmienności wydajności jednostkowej

dla poszczególnych rozwiązań dozowników i rodzajów wysiewanych nasion w przyjętym zakresie zmienności czynników eksploatacyjnych.

Przykładowo dla wysiewu pszenicy, ilość wysiewanych nasion kołeczkowym aparatem wysiewającym podlega większej zmienności niż roweczkowym dozownikiem, w tym samym zakresie zmian parametrów eksploatacyjnych (β , n_w , H). Można również zauważyć, że wartości ekstremalne q występują dla podobnych wartości czynników eksploatacyjnych.

Pełniejszy obraz wpływu poszczególnych czynników eksploatacyjnych na wydajność jednostkową dozownika można uzyskać na podstawie analizy wykresów 3D dołączonych do wyników poszczególnych badań w rozdziale 7.

8. Algorytm korekcyjny sterujący napędem dozowników nasion

Dysponując opisem matematycznym zależności wydajności jednostkowej dozownika nasion od zmiennych warunków eksploatacyjnych, opracowanym dla wysiewu podstawowych rodzajów nasion i odpowiadającym im nastawom regulacyjnym aparatu wysiewającego, można było przystąpić do opracowania algorytmu korekcyjnego, korzystającego z odpowiedniego (dla wysiewu danego typu nasion) modelu regresyjnego. Celem zastosowania algorytmu jest zminimalizowanie skutków zmienności dawkowania dozownika pracującego w warunkach odbiegających od tych dla których przeprowadzono jego kalibrację (tzw. próbę kręconą).

8.1. Zasada działania algorytmu

Zadaniem algorytmu jest zachowanie, dla wysiewanego rodzaju nasion zadanej dawki wysiewu Q_{ha} mimo zmiany warunków eksploatacyjnych siewnika opisanych przez: prędkość roboczą siewnika v_s , kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy β , prędkość obrotową wałka wysiewającego n_w oraz poziom nasion w zbiorniku H . Cel ten ma zostać osiągnięty przez odpowiednią korektę (w czasie rzeczywistym) prędkości obrotowej wałka wysiewającego dozownika.

Sterowanie prędkością obrotową wałka wysiewającego dozownika może odbywać się poprzez odpowiednie wysterowanie silnika elektrycznego czy hydraulicznego lub w przypadku zastosowania napędu mechanicznego z zastosowaniem przekładni bezstopniowej – przez korektę przełożenia.

Obliczanie wymaganej prędkości obrotowej wałka wysiewającego oparto na zależności (3.1), w której zastąpiono wydajność jednostkową dozownika q (wyznaczoną z próby kręconej) wydajnością skorygowaną q_K (uwzględniającą korektę wydajności dozownika wg zależności (8.3)).

$$Q_{ha} = \frac{n_w \cdot q_K}{p \cdot v_s \cdot 6}, \text{ kg/ha} \quad (8.1)$$

gdzie: n_w - prędkość obrotowa wałka wysiewającego w obr/min,
 q_K - skorygowana wydajność jednostkowa w g/obr,
 p - rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi) w m,
 v_s - prędkość robocza siewnika w m/s.

W rozdziale 7 przedstawiono wielomiany opisujące zależność wydajności jednostkowej pojedynczego zespołu wysiewającego od warunków pracy siewnika. Zapisując tę zależność w postaci ogólnej uzyskujemy:

$$q_M = q_M(\beta, n_w, H) \quad (8.2)$$

gdzie: q_M - wydajność jednostkowa na podstawie modelu dla aktualnych warunków eksploatacji (β, n_w, H) w g/obr,
 β - kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy w °,
 n_w - prędkość obrotowa wałka wysiewającego w obr/min,
 H - poziom nasion w zbiorniku w cm.

Każda partia materiału siewnego może się różnić parametrami fizyko-mechanicznymi nasion (np. MTN) czy siłą kiełkowania. Dlatego przed każdym zasiewem należy określić normę wysiewu (ilość wysiewu) oraz przeprowadzić tzw. próbę kręconą. Wynikiem takiej próby może być wydajność jednostkowa dozownika q_p . Zaleca się przeprowadzenie próby kręconej w warunkach (określanych parametrami β_p, n_{wp} i H_p) zbliżonych do warunków, w których realizowany będzie zasiew.

Z przyczyn praktycznych zasiew często odbywa się w warunkach odbiegających od tych, przy jakich przeprowadzono próbę kręconą. Wynika to z pożałowania powierzchni pola (praca na stokach), zmienności prędkości roboczej siewnika czy nieuniknionej zmiany poziomu nasion w zbiorniku.

Z uwagi na powyższe, wyznaczanie prędkości obrotowej wałka wysiewającego na podstawie wydajności jednostkowej dozownika q_p wyznaczonej z próby kręconej powoduje, w przypadku wysiewu w warunkach odbiegających od tych, dla których przeprowadzono próbę kręconą, błędy ilości wysiewu. W celu wyeliminowania tych błędów wyznaczana jest skorygowana wydajność jednostkowa dozownika z zależności (8.3).

$$q_K = \frac{q_{Mb}(\beta, n_w, H)}{q_{Mp}(\beta_p, n_{wp}, H_p)} \cdot q_p, \text{ g} \quad (8.3)$$

gdzie: q_K - skorygowana wydajność jednostkowa dozownika w g/obr,
 $q_{Mb}(\beta, n_w, H)$ - wydajność jednostkowa na podstawie modelu dla aktualnych (bieżących) warunków eksploatacji w g/obr,
 $q_{Mp}(\beta_p, n_{wp}, H_p)$ - wydajność jednostkowa na podstawie modelu dla warunków eksploatacji w jakiej przeprowadzono próbę kręconą (β_p, n_{wp}, H_p) w g/obr,
 q_p - wydajność jednostkowa wyznaczona na podstawie próby kręconej w g/obr.

Przekształcając wyrażenie (8.1) otrzymujemy warunek na utrzymanie stałej dawki wysiewu, niezależnie od warunków pracy siewnika:

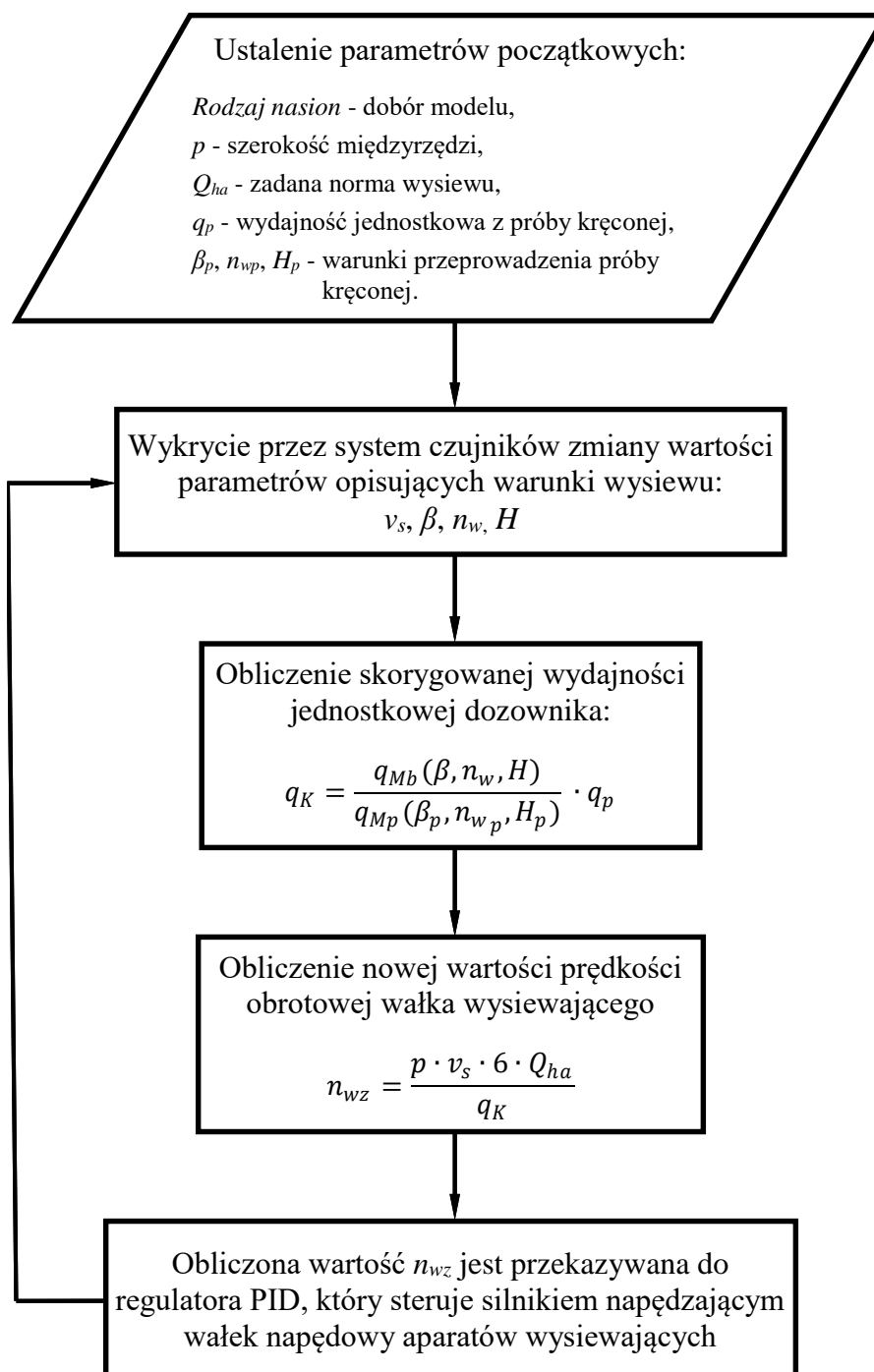
$$\frac{n_w \cdot q_K}{p \cdot v_s \cdot 6} - Q_{ha} = 0 \quad (8.4)$$

gdzie: n_w - prędkość obrotowa wałka wysiewającego w obr/min,
 q_K - skorygowana wydajność jednostkowa dozownika w g/obr,
 p - rozstaw rzędów redlic (szerokość międzyrzędzi) w m,
 v_s - prędkość robocza siewnika w m/s,
 Q_{ha} - założona ilość wysiewu (norma wysiewu) w kg/ha.

Ostatecznie z zależności (8.5) otrzymano wyrażenie pozwalające na wyznaczenie prędkości obrotowej wałka wysiewającego z uwzględnieniem skorygowanego wydatku jednostkowego dozownika.

$$n_{wz} = \frac{p \cdot v_s \cdot 6 \cdot Q_{ha}}{q_K}, \text{ obr/min} \quad (8.5)$$

Schemat algorytmu korekty prędkości obrotowej wałka wysiewającego przedstawiono na rys. 8.1.



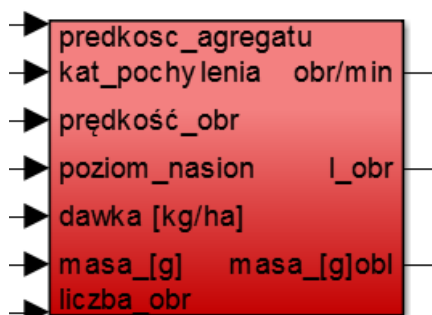
Rys. 8.1. Uproszczony schemat blokowy algorytmu sterowania pracą siewnika

(źródło: opracowanie własne)

8.2. Implementacja algorytmu korekcyjnego

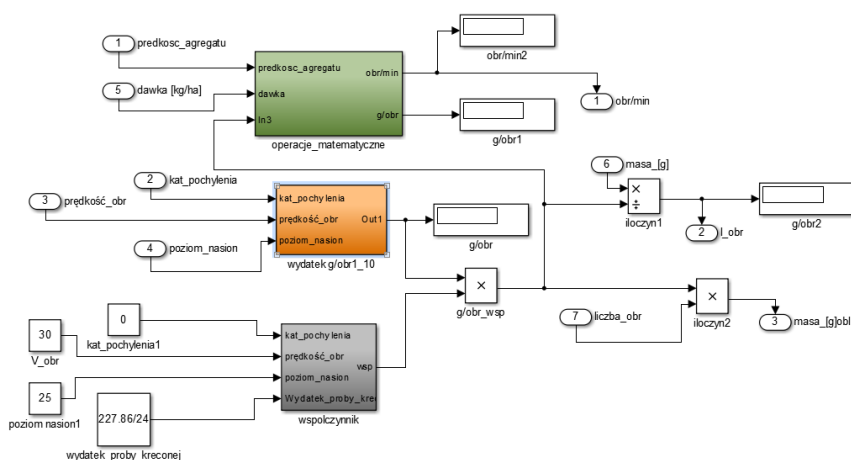
Sterowanie laboratoryjnym stanowiskiem badania siewników zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 5.2.4 odbywa się za pomocą programu MATLAB z modułem SIMULINK. W celu implementacji algorytmu korekcyjnego do sterowania napędem aparatów wysiewających zamontowanych na modelu siewnika, opracowano i dodano do aplikacji sterującym stanowiskiem niezbędne bloki.

Blok algorytmu korekcyjnego (rys. 8.2) umieszczono wewnątrz głównego bloku sterującego zamieszczonego na rysunku 5.18. Blok ten odczytuje aktualne wartości parametrów takich jak: prędkość agregatu, kąt pochylenia siewnika, prędkość obrotową wałka wysiewającego, poziom nasion w zbiorniku, zadaną dawkę wysiewu. Na podstawie tych wartości wprowadza korektę prędkości obrotowej wałka wysiewającego.



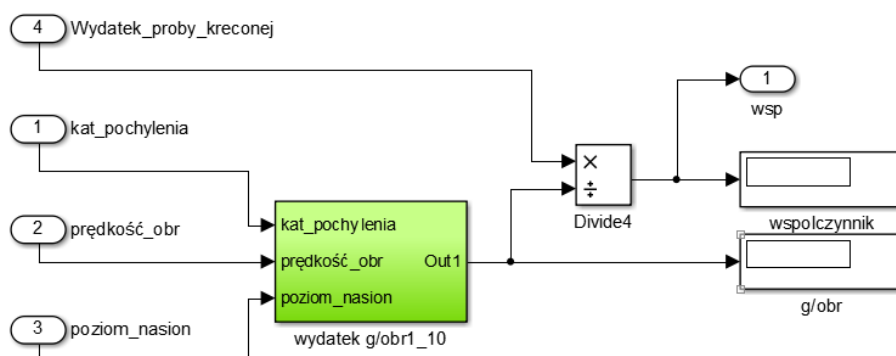
Rys. 8.2. Widok wyprowadzeń wejściowych oraz wyjściowych bloku algorytmu korekcyjnego
(źródło: opracowanie własne)

Rysunek 8.3 przedstawia rozmieszczenie oraz połączenie elementów wewnątrz bloku algorytmu korekcyjnego. Oprócz prostych operacji matematycznych znajduje się tam blok obliczający współczynnik korekcyjny wydajności siewu nasion.



Rys. 8.3. Widok elementów wewnątrz bloku algorytmu korekcyjnego
(źródło: opracowanie własne)

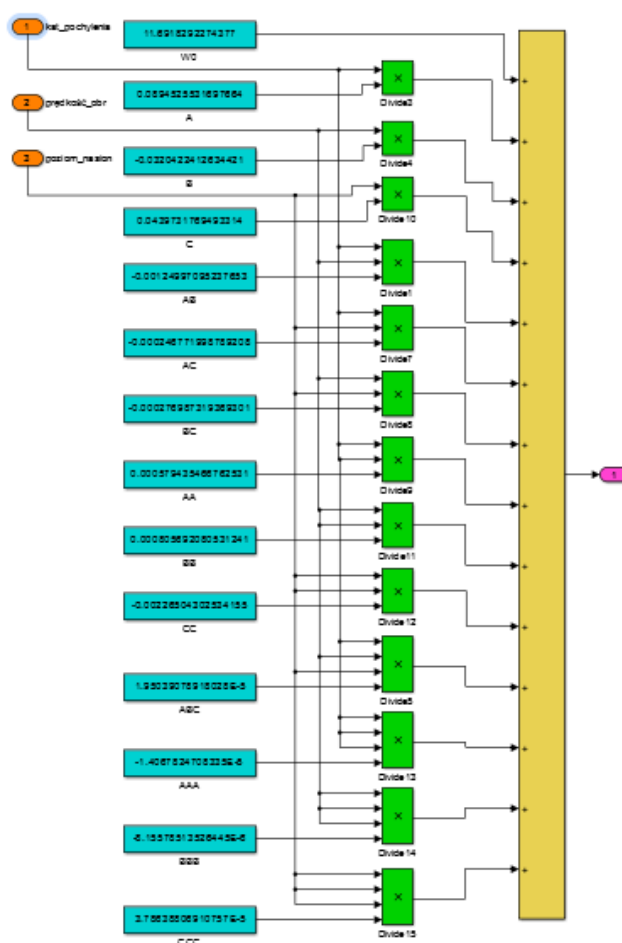
Wnętrze bloku współczynnika korekcji pokazano na rysunku 8.4. Wartość współczynnika wyznaczana jest poprzez iloraz wydatku otrzymanego z próby kręconej oraz wydatku obliczonego w programie (dla parametrów jak przy próbie kręconej).



Rys. 8.4. Widok elementów wewnątrz bloku współczynnika korekcji

(źródło: opracowanie własne)

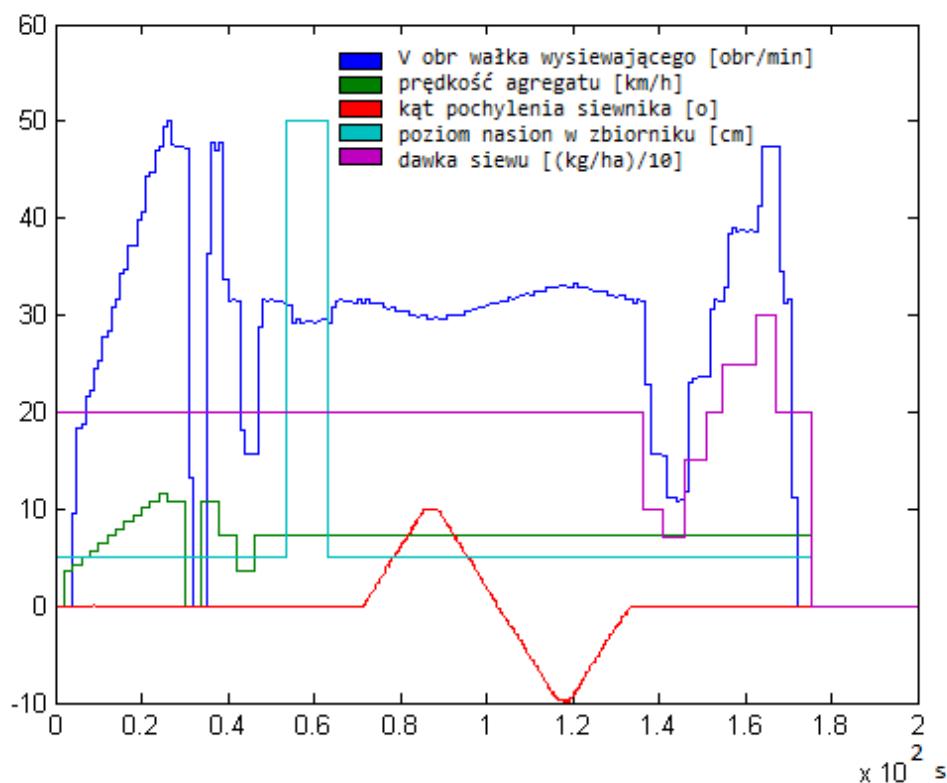
Schemat algorytmu obliczającego wydatek pokazano na rysunku 8.5. Wartości bloków niebieskich są wynikiem analizy statystycznej na podstawie badań laboratoryjnych dla danego rodzaju nasion.



Rys. 8.5. Fragment programu odpowiedzialny za obliczenie wydajności jednostkowej dozownika na podstawie modelu regresyjnego

(źródło: opracowanie własne)

Na rysunku 8.6 pokazano przykład przebiegu, według zaprogramowanego scenariusza zmian czynników eksploatacyjnych, obrazujący działanie algorytmu. Wykres przedstawia zmiany prędkości obrotowej wałka wysiewającego, spowodowane przez zaprogramowane zmiany warunków pracy. W pierwszej kolejności zmianie ulegała prędkość jazdy agregatu. Wraz ze wzrostem prędkości zwiększała się również prędkość obrotowa wałka. W kolejnym etapie zmianie uległa wysokość słupa nasion w zbiorniku. Jak przedstawiono na wykresie prędkość obrotowa wałka wysiewającego spadła w przypadku pełnego zbiornika, gdzie wysokość poziomu nasion wynosiła 50 cm. Następnie zmianie ulegał kąt pochylenia siewnika w zakresie od -10° do 10° . W przypadku gdy siewnik wjeżdżał na wzniesienie, prędkość obrotowa wałka wysiewającego zmniejszyła się, natomiast w przypadku zjazdu z wzniesienia prędkość obrotowa wzrosła. W ostatnim etapie zmieniano nastawę dawki wysiewu. Jak przedstawiono na wykresie wraz ze wzrostem dawki siewu, prędkość obrotowa również rośnie. Analogicznie podczas zmniejszenia dawki siewu prędkość obrotowa wałka wysiewającego malała.



Rys. 8.6. Wykres obrazujący przebieg eksperymentu oraz działanie algorytmu korekcyjnego reagującego na symulowane zmiany parametrów eksploatacyjnych

(źródło: opracowanie własne)

8.3. Badania laboratoryjne skuteczności działania opracowanego algorytmu

Do oceny skuteczności działania opisanego w rozdziale 8.1 algorytmu korekcyjnego, wybrano klasyczną metodę wagową. Metoda ta umożliwia pomiar ilości wysianych nasion dla wytypowanych (stałych) warunków pracy siewnika i uzyskanie dokładnych wyników pozwalających na zweryfikowanie poprawności wysiewu założonej ilości nasion.

Przeprowadzono badania porównawcze ilości wysiewu modelu siewnika z włączonym i wyłączonym algorytmem korekcyjnym.

Badania polegały na zasypaniu zbiornika określoną ilością nasion (poziom nasion w zbiorniku H), zaprogramowaniu pracy stanowiska poprzez wprowadzenie parametrów pracy siewnika takich jak: norma wysiewu (ilość wysiewu) Q_{ha} , szerokość międzyrzędzi p , prędkość robocza siewnika v_s , kąt pochylenia siewnika β oraz wprowadzeniu danych z próby kręconej i określeniu długości odcina, na jakim przeprowadzony ma być zasiew. Mierzono masę nasion wysianych bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego (w trzech powtórzeniach). Badania przeprowadzono dla pięciu zestawów wartości czynników eksploatacyjnych (gdzie jeden opowiadał warunkom wykonania próby kręconej). Parametry materiału siewnego oraz wartości nastaw nie podlegające modyfikacji w trakcie badań przedstawiono w tab. 8.1. Wartości nastaw czynników eksploatacyjnych poszczególnych zestawów badań oraz odpowiadające im wyniki badań przedstawiono w tab. 8.2.

Tab. 8.1. Arkusz badań sprawdzających odchyłki dawkowania dozownika bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g
Typ dozownika	Typ K	
Szerokość międzyrzędzi	0,125	m
Norma wysiewu	200	kg/ha
Długość odcinka wysiewu	200	m

(źródło: opracowanie własne)

Dla przyjętych warunków eksperymentu i zadanej normy wysiewu siewnik, po przejechaniu odcinka 200 m, obsiewa jedną sekcją powierzchnię 0,0025 ha. Przy zadanej ilości wysiewu (200 kg/ha) pojedyncza sekcja siewnika (po przejechaniu odcinka 200 m) powinna wysiać 500 g nasion.

Próby kręconą przeprowadzono w następujących warunkach: kąt pochylenia siewnika $\beta = 0^\circ$, wysokość warstwy nasion w skrzyni nasiennej $H = 23\text{cm}$, prędkość obrotowa wałka wysiewającego $n_w = 25\text{ obr/min}$.

Wydajność jednostkowa dozownika dla próby kręconej wyniosła:

$$q_p = 27,6 \pm 0,1\text{ g/obr}$$

W tabeli 8.2 przedstawiono wyniki badań modelu siewnika na stanowisku badawczym przy różnych parametrach pracy z wyłączonym i włączonym algorytmem korekcyjnym.

Tab. 8.2. Wyniki badań skuteczności działania algorytmu korekcyjnego na stanowisku badawczym – porównanie dokładności zachowania zadanej normy wysiewu $Q_{ha} = 200\text{ kg/ha}$

Lp.	Prędkość robocza siewnika	Kąt pochylenia siewnika	Poziom nasion w zbiorniku	Wysiew bez algorytmu	Ilość wysiewu bez algorytmu	Wysiew z algorytmem	Ilość wysiewu z algorytmem
	$v_s, \text{m/s}$	$\beta, ^\circ$	H, cm	m, g	$Q_{ha}, \text{kg/ha}$	m', g	$Q'_{ha}, \text{kg/ha}$
1	4,6	0	23	505,8	202,3	504,0	201,6
2	1,7	10	23	557,8	223,1	518,8	207,5
3	3,3	18	23	548,7	219,5	518,5	207,4
4	3,3	-12	23	491,5	196,6	516,4	206,6
5	4,2	-8,5	12	502,5	201,0	513,7	205,5

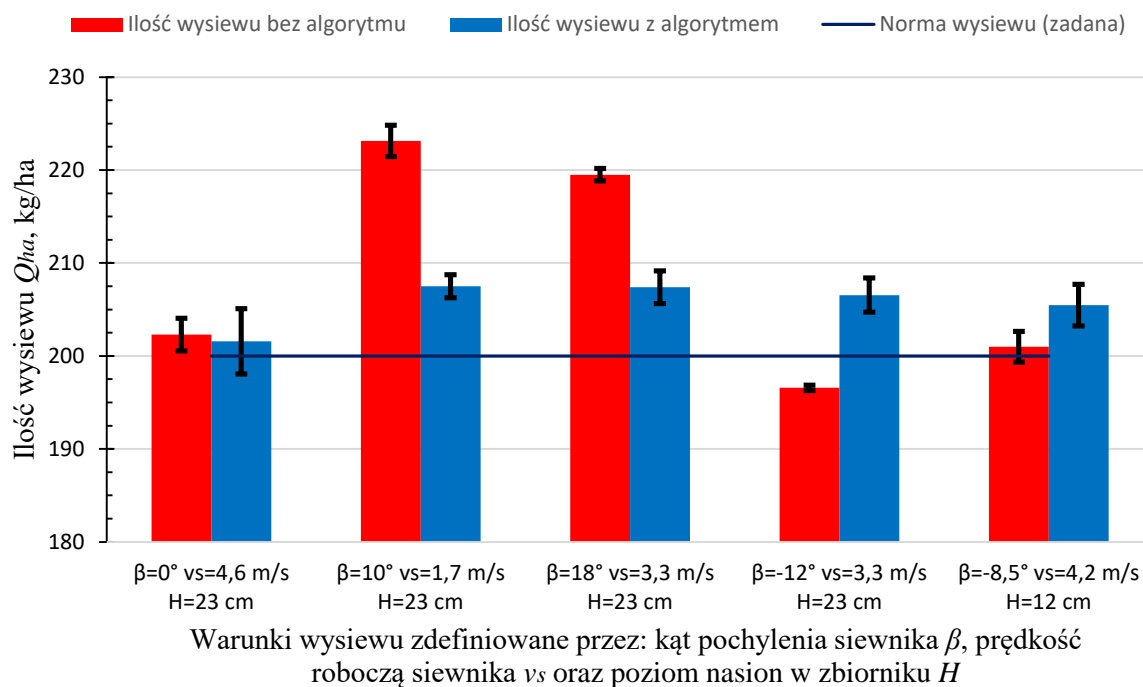
(źródło: opracowanie własne)

Pierwszy przypadek badawczy z tab. 8.2 odpowiadał warunkom wykonania próby kręconej. Uzyskane wartości wysiewu i powiązane z nim dawki wysiewu dla siewnika pracującego z wyłączonym i włączonym algorytmem korekcyjnym są zbliżone do siebie. W pozostałych przypadkach, gdy siewnik pracował w warunkach odbiegających od warunków przeprowadzenia próby kręconej, działanie algorytmu pozwoliło na zmniejszenie błędów dozowania.

Ciekawy przypadek wystąpił w eksperymencie oznaczonym w tab. 8.2 numerem pięć, gdzie wpływy zmian wartości parametrów eksploatacyjnych β , n_w i H (gdzie n_w jest zależne od v_s i chwilowej wartości wydatku jednostkowego dozownika) na wydajność jednostkową dozownika wzajemnie się zniósł i w efekcie wartości ilości wysiewu zarówno z włączonym algorytmem, jak i bez niego znacząco nie odbiegają od siebie (w odniesieniu do warunków wykonania próby kręconej pochylenie siewnika odpowiadające zjazdowi ze wzniesienia spowodowało zmniejszenie wydajności jednostkowej dozownika, które zostało skompensowane wzrostem wydajności dozownika w konsekwencji zmniejszenia prędkości obrotowej wałka wysiewającego i niższego poziomu nasion w zbiorniku).

Przeprowadzone badania wskazują, że działanie algorytmu korekcyjnego korzystnie wpływa na jakość siewu, pozwalając z większą dokładnością utrzymać zadaną dawkę wysiewu.

Wyniki eksperymentu przedstawiono graficznie na rys. 8.7.



Rys. 8.7. Porównanie ilości wysiewu bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego

(źródło: opracowanie własne)

Wskaźnik jakości pracy siewnika związany z nierównomiernością siewu nasion, dotyczący odchyłki od średniej dawki wysiewu zdefiniowano w PN-84/R-55050 [84] następującymi zależnościami:

$$\Delta Q_{ha_min} = \frac{Q_{ha_min} - \bar{Q}_{ha}}{\bar{Q}_{ha}} \cdot 100, \% \quad (8.6)$$

$$\Delta Q_{ha_max} = \frac{Q_{ha_max} - \bar{Q}_{ha}}{\bar{Q}_{ha}} \cdot 100, \% \quad (8.7)$$

gdzie: ΔQ_{ha_min} - odchyłka minimalna ilości wysiewu w %,
 ΔQ_{ha_max} - odchyłka maksymalna ilości wysiewu w %,
 Q_{ha_min} - minimalna ilość wysiewu w kg/ha,
 Q_{ha_max} - maksymalna ilość wysiewu w kg/ha,
 \bar{Q}_{ha} - średnia ilość wysiewu w kg/ha,

Z zależności (8.6) i (8.7) uzyskano:

dla wysiewu bez algorytmu:

$$\Delta Q_{ha_min} = -5,72\%$$

$$\Delta Q_{ha_max} = 7,01\%$$

oraz dla wysiewu z algorytmem:

$$\Delta Q_{ha_min} = -2,00\%$$

$$\Delta Q_{ha_max} = 0,88\%$$

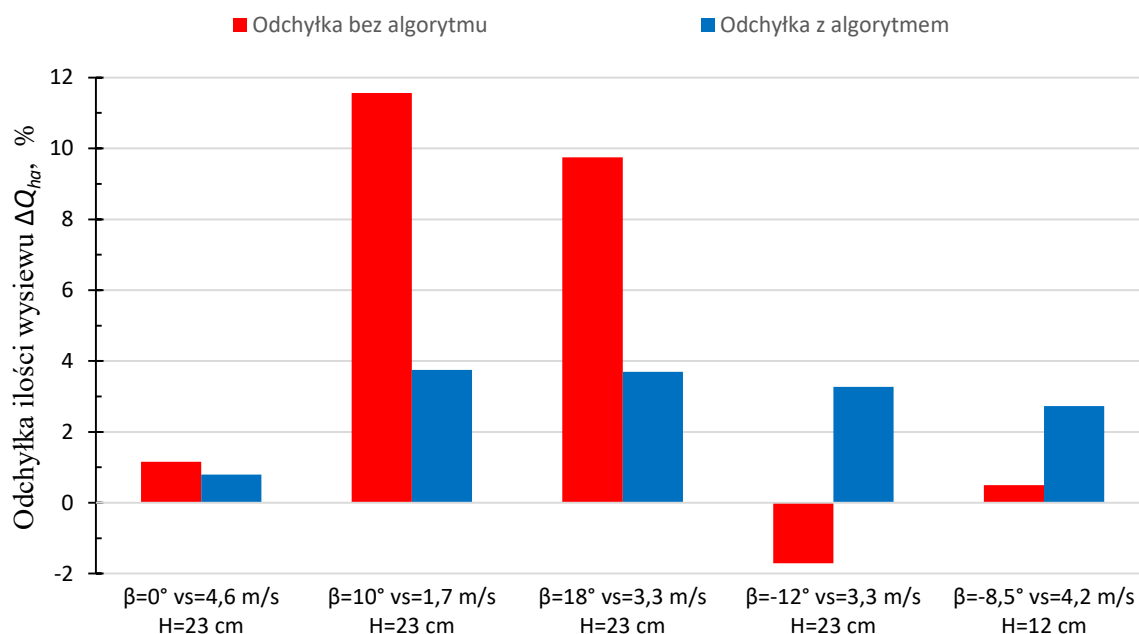
Można przypomnieć, że zgodnie z wytycznymi normy PN-87/R-36540 [85] dopuszczalna odchyłka od wysiewu średniego dla nasion zbóż wynosi $\pm 8\%$. Uwzględniając powyższe zarówno wysiew bez jak i z użyciem algorytmu korekcyjnego spełnia wymagania normy.

Innym wskaźnikiem oceny dokładności dozowania nasion zgodnie z metodyką stosowaną przez DLG [97] jest wartość procentowa odchylenia między rzeczywistą ilością wysiewu i ilością zadaną (8.8). Odniesieniem tej zależności jest zadana ilość wysiewu wynikająca z zaleceń agrotechnicznych, co lepiej odzwierciedla spełnienie wymagań agrotechnicznych niż zależności (8.6) i (8.7) określone w PN-84/R-55050 [84].

$$\Delta Q_{ha} = \frac{Q_{ha_rz} - Q_{ha}}{Q_{ha}} \cdot 100, \% \quad (8.8)$$

gdzie: ΔQ_{ha} - odchyłka ilości wysiewu w %,
 Q_{ha_rz} - rzeczywista ilość wysiewu w kg/ha,
 Q_{ha} - zadana ilość wysiewu (norma wysiewu) w kg/ha,

Według klasyfikacji stosowanej przez DLG (tab. 8.3) dla wariantu wysiewu $\beta = 10^\circ$, $v_s = 1,7$ m/s i $H = 23$ cm (wysiew bez algorytmu) siewnik nie spełnia wymagań jakościowych. W przypadku wysiewu z zastosowaniem algorytmu korekcyjnego dla wszystkich analizowanych przypadków uzyskano wynik co najmniej dobry. Wartości odchyłek ilości wysiewu wg metodyki DLG dla analizowanych wariantów pracy siewnika przedstawiono na rys. 8.8.



Warunki wysiewu zdefiniowane przez: kąt pochylenia siewnika β , prędkość roboczą siewnika v_s oraz poziom nasion w zbiorniku H

Rys. 8.8. Odchyłka ilości wysiewu ΔQ_{ha} (wartość procentowa odchylenia między rzeczywistą ilością wysiewu i ilością zadaną)

(źródło: opracowanie własne)

Tab. 8.3. Ocena dokładności dozowania wg DLG

Odchylenie od ilości zadanej, %	Ocena dokładności dozowania
do 2,5	bardzo dobra
do 5	dobra
> 5 do 10	zadawalająca
> 10	niedostateczna

(źródło: opracowano na podstawie [97])

Stanowisko badawcze opisane w rozdziale 5 umożliwia również przeprowadzenie badań jakości pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, prowadzonych według dowolnego scenariusza (w zakresie możliwych regulacji stanowiska), w sposób ciągły, obejmujący stany nieustalone. W czasie badań zastosowano piezoelektryczną metodę liczenia nasion. Metoda ta (patrz rozdział 5.7.4) z uwagi na wygodę jej stosowania posłużyła do przeprowadzenia badań nierównomierności podłużnej wysiewu, którą wyznaczono z zależności (8.9) (na podstawie PN-84/R-55050 [84]).

$$d_N = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_{sr})^2}}{N_{sr}} \quad (8.9)$$

gdzie: d_N - wskaźnik nierównomierności podłużnej wysiewu w %,
 n - liczba odcinków pomiarowych,
 N_i - liczba nasion w i – tym odcinku pomiarowym,
 N_{sr} – średnia liczba nasion w odcinkach pomiarowych.

Zgodnie z wytycznymi normy PN-84/R-55050 przyjęto, że odcinki pomiarowe mają długość 0,1 m. Zliczanie nasion w odcinkach przeprowadzono za pomocą algorytmu opisanego w rozdziale 5.7.4, zastosowanego dla poszczególnych przedziałów czasowych odpowiadających przejazdowi odcinka 0,1 m. Synchronizację między pomiarami liczby ziaren, a zmianami wartości parametrów opisujących warunki wysiewu, których wartości przedstawiono na rys. 8.9, zapewniono za pomocą pomocniczych impulsów, które są rejestrowane jednocześnie z danymi opisującymi parametry pracy stanowiska (model siewnika) oraz danymi z czujnika piezoelektrycznego (zestaw akwizycji danych SCADAS patrz rozdz. 5.7.4). Przebieg tych sygnałów widoczny jest na rys. 8.9 (kolor żółty).

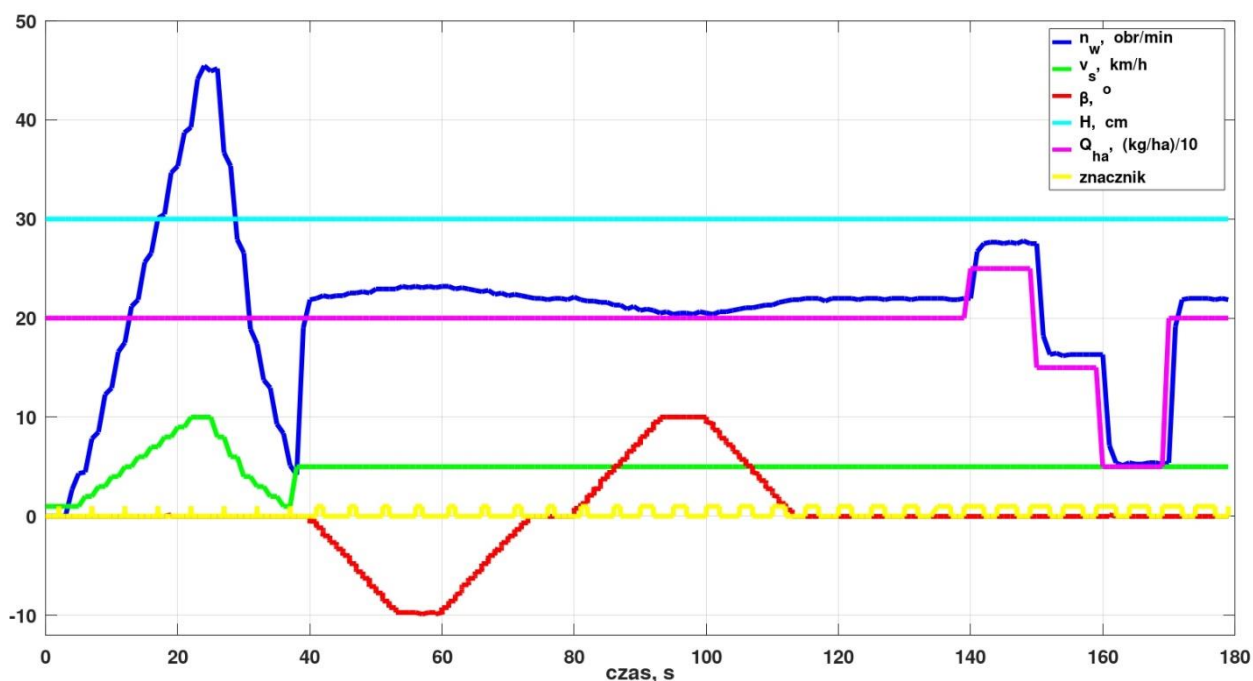
Badania jakości pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych przeprowadzono podczas wysiewu nasion pszenicy roweczkowym aparatem wysiewającym dla parametrów przedstawionych w tab. 8.4.

Tab. 8.4. Arkusz badań sprawdzających jakość pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego

Wyszczególnienie	Wartość	Jednostka
Rodzaj nasion	pszenica	
Wilgotność	12,1	%
Masa 1000 nasion	44,4	g
Typ dozownika	Typ R	
Szerokość międzyrzędzi	0,125	m
Norma wysiewu	200	kg/ha
Czynna długość wałka wysiewającego	18	mm

(źródło: opracowanie własne)

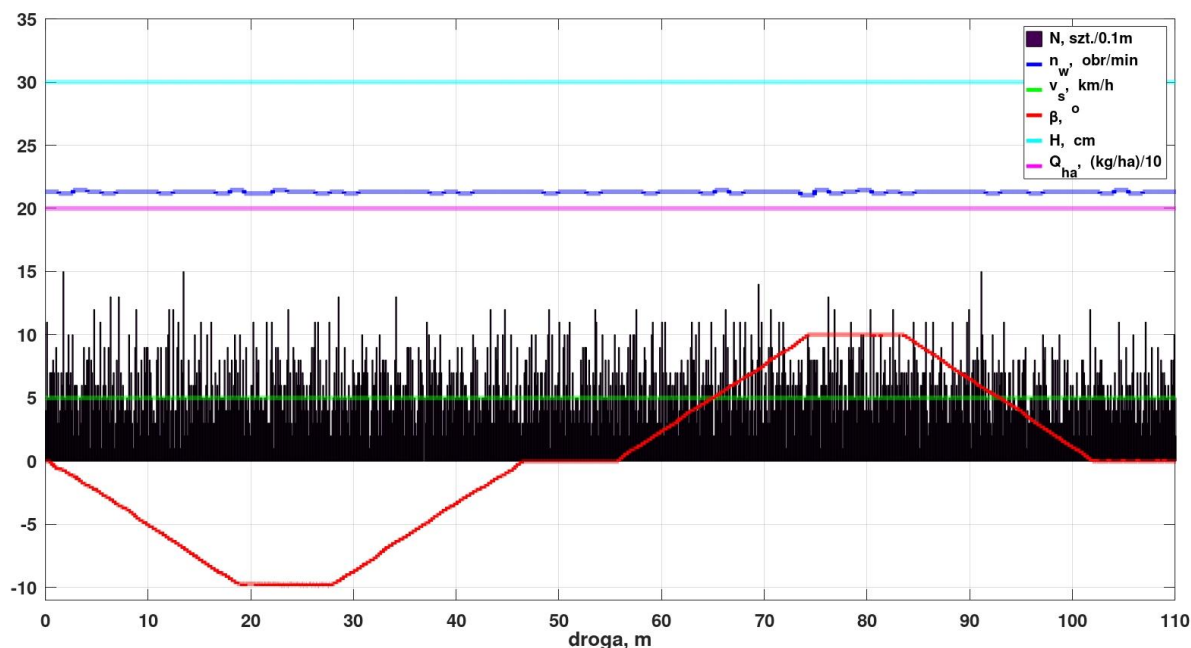
Jeden z możliwych scenariuszy pracy siewnika przedstawiono na rys. 8.9. Można na nim prześledzić skutki działania algorytmu korygującego w postaci zmian prędkości obrotowej wałka wysiewającego następujących w wyniku zaprogramowanych zmian parametrów, takich jak: kąt pochylenia siewnika, prędkość robocza siewnika lub zmiana zadanej dawki wysiewu.



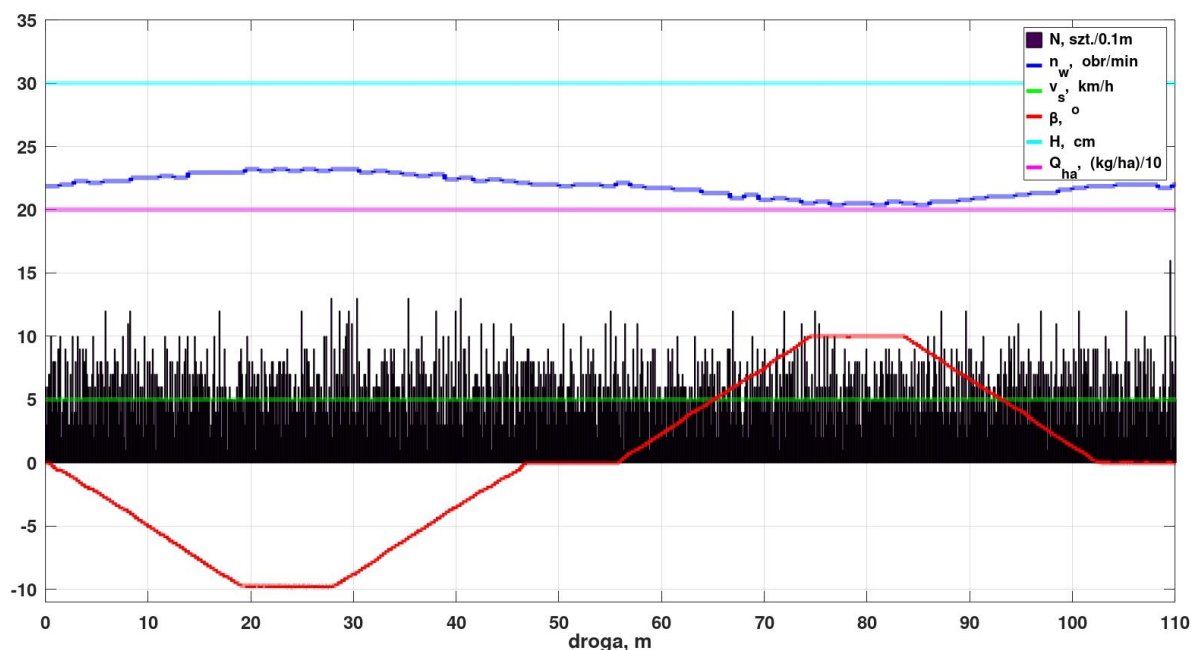
Rys. 8.9. Scenariusz pracy siewnika w postaci wykresu zmian parametrów opisujących warunki wysiewu

n_w – prędkość obrotowa wałka wysiewającego, v_s – prędkość robocza siewnika, β – kąt pochylenia siewnika w kierunku jazdy, H – poziom nasion w zbiorniku, Q_{ha} – założona ilość wysiewu (norma wysiewu) podzielona przez 10, znacznik – przebieg sygnału impulsowego niezbędnego do synchronizacji pomiaru liczby nasion oraz sygnałów sterujących stanowiskiem, (źródło: opracowanie własne)

Badania nierównomierności podłużnej przeprowadzono dla fragmentu eksperymentu odpowiadającemu pracy siewnika ze stałą prędkością roboczą i zmiennym kącie pochylenia. Rozkład liczby nasion w kolejnych odcinkach pomiarowych o długości 0,1 m przedstawiono odpowiednio dla wysiewu bez algorytmu (rys. 8.10) oraz dla wysiewu z algorytmem (rys. 8.11).



Rys. 8.10. Rozkład liczby nasion w kolejnych odcinkach pomiarowych o długości 0,1 m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - wysiew bez algorytmu
(źródło: opracowanie własne)

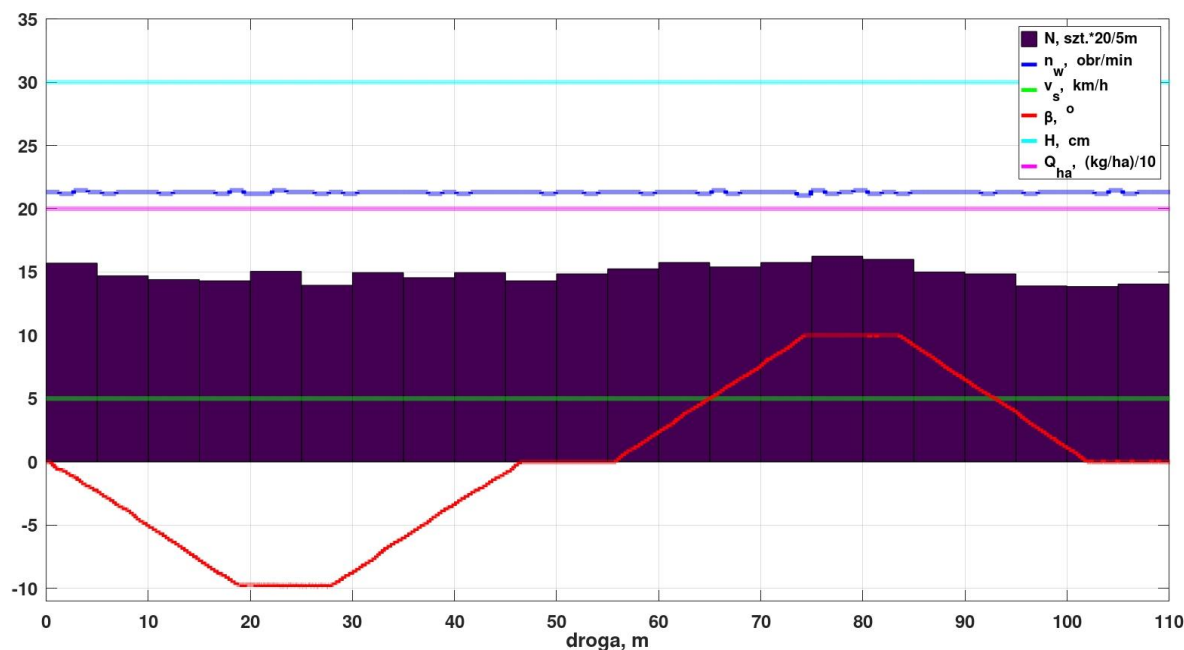


Rys. 8.11. Rozkład liczby nasion w kolejnych odcinkach pomiarowych o długości 0,1 m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - wysiew z algorytmem
(źródło: opracowanie własne)

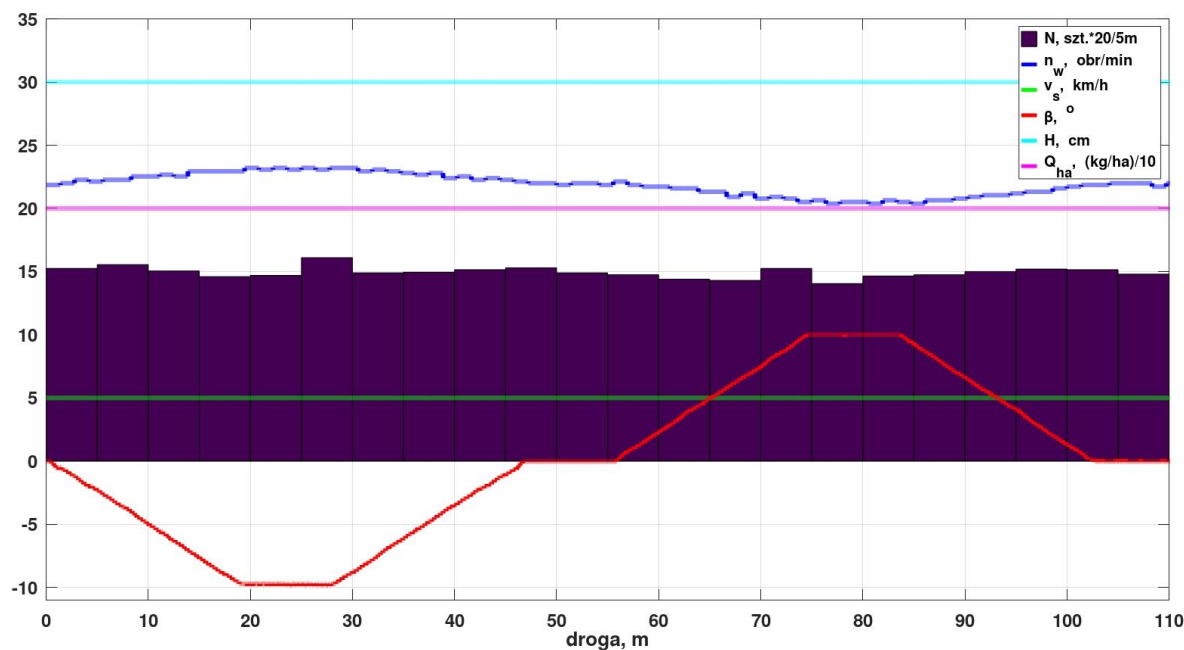
Na podstawie uzyskanych wyników obliczono z zależności (8.9) wskaźniki nierównomierności podłużnej. Dla wysiewu bez działającego algorytmu otrzymano $d_N = 43\%$, przy włączonym algorytmie uzyskano większą równomierność ($d_N = 40\%$).

Działanie algorytmu korekcyjnego można również zaobserwować oceniając zróżnicowanie ilości wysiewu na dłuższych odcinkach. Przykładowo na poniższych wykresach

przedstawiono licznosci nasion w przedziałach o długości 5m odpowiednio dla wysiewu bez algorytmu (rys. 8.12) i z algorytmem (rys. 8.13).



Rys. 8.12. Licznosci nasion w przedziałach o długości 5m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - dla wysiewu bez algorytmu
(źródło: opracowanie własne)



Rys. 8.13. Licznosci nasion w przedziałach o długości 5m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - dla wysiewu bez algorytmu
(źródło: opracowanie własne)

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że włączenie algorytmu korekcyjnego zmienia korzystnie działanie siewnika zmniejszając wartość współczynnika nierównomierności podłużnej wysiewu oraz zbliżając faktyczną wartość ilości wysiewu do wartości zadanej.

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono problematykę dotyczącą jakości wysiewu uniwersalnymi siewnikami rzędowymi z mechanicznym dozowaniem i grawitacyjnym transportem nasion do redlic. W oparciu o przeprowadzone studia literaturowe zidentyfikowano element roboczy siewnika, który ma zasadniczy wpływ na jakość wysiewu i w efekcie skupiono się nad zagadnieniami dotyczącymi pracy aparatu wysiewającego w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Analiza dostępnych w literaturze wyników badań wykazała wrażliwość jakości wysiewu nasion na zmienność czynników eksploatacyjnych objawiającą się zmiennością ilości wysiewu. Zmienność tą określa wskaźnik stałości ilości wysiewu (odchyłka dozowania). Ilość wysiewu powiązana jest między innymi z wydajnością jednostkową dozownika. W pracy podjęto próbę ograniczenia wpływu zmieniających się czynników eksploatacyjnych poprzez korektę prędkości obrotowej wałka wysiewającego. Możliwość taką daje zastosowanie elektronicznego układu sterowania napędem aparatów wysiewających (pracującego w układzie otwartym), bazującego na modelu matematycznym, który dla znanych wartości czynników zakłócających (pochylenie siewnika, prędkość obrotowa wałka wysiewającego oraz poziom nasion w zbiorniku) może być użyty do korekty prędkości obrotowej wałka wysiewającego.

Tak więc przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej był system sterowania napędem dozowników nasion a celem pracy było zmniejszenie niekorzystnego wpływu zmiennych warunków eksploatacyjnych na pracę siewnika, co objawia się zmiennym dawkowaniem nasion, odbiegającym od zadanego.

W świetle stwierdzonych w wyniku analizy literatury braków wiedzy w zakresie matematycznego opisu łącznego wpływu zmienności czynników eksploatacyjnych siewnika na wydajność jednostkową dozownika nasion, podstawowym problemem naukowym pracy było opracowanie modelu matematycznego takiego wpływu i wykorzystanie go do predykcji wydajności jednostkowej dozownika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych – odbiegających od tych, dla jakich przeprowadzono jego kalibrację (tzw. próbę kręconą) oraz wykorzystanie go do sterowania napędem aparatów wysiewających w celu poprawy jakości pracy siewnika.

Uwzględniając powyższe sformułowano hipotezę badawczą przedstawioną w rozdziale 4.

Osiągnięcie celu pracy i weryfikacja postawionej hipotezy badawczej wymagały przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Badania wykonano dla dwóch typów dozowników nasion (roweczkowych i kołeczkowych) oraz dla czterech rodzajów nasion (pszenicy, owsa, jęczmienia i rzepaku). Badania przeprowadzono w dwóch blokach. Podczas badań

rozpoznawczych wyznaczono charakterystyki wydajnościowe dozownika roweczkowego w funkcji czynnej długości wałka wysiewającego (w celu ustalenia odpowiednich nastaw dozownika dla danego typu uprawy) oraz przeprowadzono badania pilotażowe zależności wydajności jednostkowej dozownika od poszczególnych czynników eksploatacyjnych (porównanie zakresu i charakteru zależności wydajności jednostkowej dwóch badanych konstrukcji dozowników nasion).

W drugim bloku przeprowadzono badania wpływu wartości czynników eksploatacyjnych na wartość wydajności jednostkowej badanych dozowników nasion, które posłużyły do wyznaczenia modeli matematycznych wysiewu dla poszczególnych typów nasion. W końcowej części pracy w oparciu o uzyskane modele regresyjne opisujące wysiew dozownika opracowano algorytm korekcyjny oraz przeprowadzono badania skuteczności jego działania.

Przeprowadzone badania eksperymentalne na autorskim stanowisku badawczym potwierdziły postawioną w pracy hipotezę badawczą.

W wyniku przeprowadzonych badań:

1. Stwierdzono istotność wpływu analizowanych czynników zakłócających na jakość pracy siewnika.
2. Opracowano regresyjne modele matematyczne opisujące zależność wydajności jednostkowej dozownika od kąta pochylenia siewnika, prędkości obrotowej wałka wysiewającego oraz wysokości warstwy nasion w skrzyni nasiennej dla różnych rodzajów nasion i dwóch typów aparatów wysiewających. Opracowane modele posiadają dobre właściwości predykcyjne i mogą być wykorzystywane do analiz numerycznych zachowania siewnika.
3. Opracowano algorytm korygujący prędkość obrotową wałka wysiewającego w zależności od wartości czynników zakłócających i przeprowadzono jego implementację na stanowisku badawczym.
4. Przeprowadzono badania weryfikacyjne na stanowisku badawczym, które potwierdziły skuteczność opracowanego sterownika.

Przebieg badań weryfikacyjnych pozwala stwierdzić, że:

1. Opracowany i wykorzystany do badań algorytm korekcyjny pozwolił na redukcję wpływu zmienności czynników eksploatacyjnych na równomierność wysiewu wyrażaną odchyłką ilości wysiewu.
2. Zastosowanie algorytmu korekcyjnego umożliwiło poszerzenie zakresu "normalnych warunków pracy siewnika" (większy zakres prędkości roboczych, dopuszczalne większe pochylenie pola) przy zachowaniu wymaganej jakości jego pracy.

3. Zastosowanie algorytmu korekcyjnego umożliwi wykorzystanie prostszych (mniej wyrafinowanych, tańszych) konstrukcji aparatów wysiewających przy zachowaniu wymaganej jakości ich pracy.
4. Opracowany algorytm może być wykorzystywany w nowoczesnych siewnikach wspierających idee rolnictwa precyzyjnego, posiadających już oprzyrządowanie umożliwiające zmienne dawkowanie nasion, jak i w klasycznych konstrukcjach, wymagających jednak pewnych zabiegów adaptacyjnych i ingerencji w układ napędowy siewnika.
5. Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość i zasadność stosowania sterowalnych układów napędowych (np. elektrycznych) i elektronicznego układu sterowania realizującego algorytm korekcyjny zgodnie z założeniami zawartymi w patencie autora PL215509.

Przedstawiona w niniejszej pracy problematyka nie wyczerpuje w całości zagadnienia dotyczącego jakości pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Istnieje zatem potrzeba prowadzenia dalszych prac obejmujących m.in. następujące zagadnienia:

1. Wybór/opracowanie wskaźnika i procedury badawczej umożliwiającej ocenę odchyłki ilości wysiewu siewnika pracującego w zmiennych warunkach eksploatacyjnych (w stanach nieustalonych) oraz określenie wymogów jakościowych uwzględniających wymagania agrotechniczne.
2. Zastosowanie praktyczne elektronicznego układu sterowania realizującego algorytm korekcyjny w warunkach polowych wymaga dokonania doboru odpowiednich czujników i opracowania obróbki ich sygnałów.
3. Weryfikacja adekwatności modelu matematycznego wysiewu (opracowanego dla danego materiału siewnego) dla innego materiału siewnego charakteryzującego się podobnymi parametrami fizycznymi (wielkość, gęstość, struktura powierzchni) – określenie zakresu stosowalności modelu.

Opracowane stanowisko oraz metody badawcze umożliwiły przeprowadzenie zaplanowanego programu badań w warunkach laboratoryjnych. Należy prowadzić dalsze prace nad udoskonalaniem czujników i metod służących do oceny dozowania nasion. W pierwszym etapie do zastosowań laboratoryjnych, a z czasem po uzyskaniu wymaganej dokładności i niezawodności, do prowadzenia badań w warunkach polowych.

Literatura

1. Al-Mallahi A., Kataoka T.: Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121, s. 412-419, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.006>, 2016.
2. Bangura K., Gong H., Deng R., Tao M., Liu C., Cai Y., et al.: Simulation analysis of fertilizer discharge process using the Discrete Element Method (DEM). *PLoS ONE* 15(7): e0235872. <https://doi.org/10.1371/journal>, 2020.
3. Bański J. (red.), *Atlas Rolnictwa Polski*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, Polska Akademia Nauk, Wydanie I, Warszawa, 2010.
4. Bański J., Historia rozwoju gospodarki rolnej, W: Górka Z. (red.), Zborowski A. (red.), *Człowiek i rolnictwo*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, s. 33–45, ISBN 978-83-88424-43-4, Kraków, 2009.
5. Bondyra R., Markowski P., Rawa T.: Wpływ wybranych czynników na nierównomierność dozowania nasion pszenżyta wybranym kołeczkowym zespołem wysiewającym. *Inżynieria Rolnicza* 2(100), s 7–14, 2008.
6. Correia T.P., Sousa S.G., Silva P.R., Dias P.P., Gomes A.R.: Sowing performance by a metering mechanism of continuous flow in different slope conditions. *Engenharia Agricola*, 36, s. 839-845, 2016.
7. Crişan V. D., Roş V., Ghereş M.: Evaluation of small seeds distribution uniformity. 40. Symposium „Actual Tasks on Agricultural Engineerin”, Opatija, Croatia, s. 243- 251, 2012.
8. CRIŞAN V., ROŞ V.: Comparative Analysis of Distribution Uniformity on Plain and Inclined Fluted Rollers. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 69(1), 2012.
9. Doruchowski G.: Postęp i nowe koncepcje w rolnictwie precyzyjnym. *Inżynieria Rolnicza R. 12*, nr 9(107), s. 19–31, 2008.
10. Dreszer K. A., Pawłowski T., Szczepaniak J., Szymanek M., Tanaś W., *Maszyny Rolnicze*, ISBN 978-83-921598-9-6, PIMR Poznań, 2008.
11. Gała Z., Kęska W.: Metoda oceny jakości rozmieszczenia nasion po siewie zbóż. *Inżynieria Rolnicza* 1/2001.
12. Gałęzia A., Gumiński R., Jasiński M., Mączak J.: Badania modalne modelu badawczego agregatu uprawno-siewnego i analiza wpływu drgań na jego pracę. *Logistyka*, nr 6, s. 3748–3754, 2014.
13. Gałęzia A., Gumiński R., Jasiński M., Mączak J.: Wpływ drgań na pracę agregatu uprawowo-siewnego z mechatronicznym układem sterowania. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów / Politechnika Warszawska*, z. 3/99, s. 61–67, 2014.
14. Gazdowski D., Samborski S., Sioma S.: *Rolnictwo precyzyjne*. SGGW, Warszawa, 2007.
15. Gierz Ł., Paszkiewicz B.K.: PVDF Piezoelectric Sensors for Seeds Counting and Coulter Clogging Detection in Sowing Process Monitoring. *Journal of Engineering*. s. 1-7, 10.1155/2020/2676725, 2020.
16. Gierz Ł.: Comparative studies of grain flow sensor in row drills and single seeders. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 60(1), s. 11-13, 2015.
17. Główny Urząd Statystyczny. Departament Rolnictwa, *Użytkowanie gruntów i powierzchnia zasiewów w 2019 roku*, Dostępny w internecie: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/rolnictwo/uzytkowanie-gruntow-i-powierzchnia-zasiewow-w-2019-roku,8,15.html>, dostęp: 23-07-2020.

18. Grabiński J.: Zasady Agrotechniki. AGRO SERWIS, Zboże wysokiej jakości wydanie 2 – czerwiec 2005.
19. Griepentrog H. W.: Längsverteilung von Sämaschinen und ihre Wirkung auf Standfläche und Ertrag bei Raps. Agrartechnische Forschung, 1, s. 129-136, 1995.
20. Griepentrog H. W.: Zur Bewertung der Flächenverteilung von Saatgut. Agrartechnische Forschung, 5, s. 117-124, 1999.
21. Griepentrog H. W.: Zur Bewertung von Längsverteilungen bei Drillmaschinen. Landtechnik, 46, s. 550-551, 1991.
22. Grudnik P.: Równo w rzędzie, Farmer 06/2006, Dostępne w Internecie pod adresem: <https://www.farmer.pl/technika-rolnicza/serwis-czesci-osprzet/rowno-w-rzedzie,1155.html> – stan z dnia: 22-07-2020.
23. Grudnik P.: Równo w rzędzie, Farmer 5/2007. Dostępne w Internecie pod adresem: <https://www.farmer.pl/technika-rolnicza/maszyny-rolnicze/rowno-w-rzedzie,4136.html> – stan z dnia: 23-07-2020.
24. Guler I.: Effects of diameter and helical angle of flute on the flow evenness of fluted roller used in seed drills using lentil seed. African Journal of Biotechnology, 10(65), s. 14380-14383, 2011.
25. Harasim A.: Przewodnik ekonomiczno-rolniczy w zarysie. IUWG, Puławy, 2006.
26. Hecht V.L., Temperton V.M., Nagel K.A., Rascher U., Postma J.A.: Sowing Density: A Neglected Factor Fundamentally Affecting Root Distribution and Biomass Allocation of Field Grown Spring Barley (*Hordeum Vulgare* L.). Frontiers in plant science, 7, 944. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00944>, 2016.
27. Heege H.: Saverfahren für Getreide und Raps. Landtechnik, Nr 2, s. 77-79, 1985.
28. Heege H.J., Feldhaus B.: Site Specific Control of Seed-Numbers per Unit-Area for Grain Drills. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 01 012. Vol. IV. December, 2002.
29. http://www.bomet.pl/oferta_tekst-109.html, – stan z dnia: 18-03-2019.
30. <https://lemken.com/pl/siew/mechaniczne-siewniki-rzedowe/saphir/saphir-8/> – stan z dnia: 12-08-2020.
31. https://meprozet.biz/Oferta/Siewnik_zbozowy_mechaniczny_rzedowy,4 – stan z dnia: 12-08-2020.
32. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Siew> – stan z dnia: 03-03-2019.
33. <https://www.amazone.pl/236.asp> – stan z dnia: 12-08-2020.
34. <https://www.horsch.com/pl/produkty/siewniki/siewniki-talerzowe/pronto-dc> – stan z dnia: 13-08-2020.
35. <https://www.uniamachines.com/en/products/seed-drills/19-Mechanical%20seed%20drills/38-mazur> – stan z dnia: 12-08-2020.
36. <https://wyznalezki.andrej.edu.pl/index.php/wyznalezki/32-s/529-siewnik> – stan z dnia: 23-07-2020.
37. Image Processing Toolbox for Use with Matlab. User Guide ver. 3, The MathWorks, Inc, 2001.
38. Instrukcja obsługi, katalog części – Siewnik mechaniczny POLONEZ 550/3D, wydanie kwiecień 2016.
39. Instrukcja obsługi. Pronto 3 - 6 DC. HORSCH, 10/2016.
40. Instrukcja obsługi. Siewnik Saphir 8 PL. LEMKEN GmbH & Co. KG, Nr.17510201 art./08.06, 2006.

41. Instrukcja obsługi. Siewnik zbożowy mechaniczny MAZUR 6.0/1100 i D6.0/1100. Unia Sp. z o.o., 01/2020.
42. Instrukcja obsługi. SingularSystem HORSCH z dozownikiem Funck. HORSCH, 07/2018.
43. Kanafojski Cz.: Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych, T.1, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1967.
44. Kara M., Bayhan A. K., Özsert I., Yildirim Y.: Performance of Fluted Roll Metering Devices in Seed Drills with Ammonium Sulphate and Diammonium Phosphate. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 26(2), s.197-201, 2010.
45. Karayel D., Wiesehoff M., Özmerzi A., Müller J.: Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2), s. 89-96, 2006.
46. Karimi H., Navid H., Mahmoudi A.: Detection of damaged seeds in laboratory evaluation of precision planter using impact acoustics and artificial neural networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1, s. 67-74, 2012.
47. Karimi H., Navid H., Mahmoudi A.: Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1) s. 1-8, 2015.
48. Karimi H., Skovsen S., Dyrmann M., Nyholm Jørgensen R.: A Novel Locating System for Cereal Plant Stem Emerging Points' Detection Using a Convolutional Neural Network. *Sensors*. 18 (5):Article 1611. <https://doi.org/10.3390/s18051611>, 2018.
49. Kęska W.: Zastosowanie mikrokomputera do badania podłużnej nierównomierności wysiewu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, 34, 1990.
50. Kogut Z., Ilość wysiewu nasion siewnikiem uniwersalnym w aspekcie zmiennych warunków eksploatacyjnych, *Problemy Inżynierii Rolniczej*, R. 11, nr 4, s 25-34, 2003.
51. Kogut Z.: Wpływ wybranych parametrów przekładni krzywkowej na jakość wysiewu nasion techniką redlicową. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 4/2007, s. 27-37, 2007.
52. Kogut Z.: Wskaźniki jakości wysiewu w ocenie pracy siewników rzędowych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, nr 3, s. 29-41, 1998.
53. Kubiacyk A.: Określanie niepewności pomiarów. *Laboratorium Fizyki I Wydział Fizyki Politechnika Warszawska*, Warszawa 2019.
54. Kuczewski J., Waszkiewicz Cz.: *Mechanizacja rolnictwa, Tom II, Maszyny i urządzenia do produkcji roślinnej i zwierzęcej*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1996.
55. Kuczewski J.: Budowa i działanie bezstopniowej skrzyni przekładniowej w uniwersalnych siewnikach zbożowych. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, nr 11, s. 2-3, 1994.
56. Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. PWN, Warszawa, 2002.
57. Kukielka S.: *Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań*. Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Maszyn Roboczych, praca magisterska, Koszalin, 2002.
58. Lan Y., Kocher M.F., Smith J.A.: Opto-electronic Sensor System for Laboratory Measurement of Planter Seed Spacing with Small Seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 72, Issue 2, s. 119-127, 1999.
59. Lejman K., Owsiak Z.: Analiza konstrukcji przewodu nasiennego w aspekcie podłużnej nierównomierności wysiewu. *Roczniki Nauk Rolniczych*, t. 80-C-1, s. 143-149, 1994.
60. Lejman K., Owsiak Z.: Badania podłużnej nierównomierności wysiewu siewników rzędowych. *Roczniki Nauk Rolniczych*, t. 80-C-1, s. 127-133, 1994.

61. Lipiński A. J.: Studia nad procesem rozpraszania nasion zbóż siewnikami mechanicznymi. *Inżynieria Rolnicza* 2006, R. 10, nr 1(76), s. 1–115, 2006.
62. Lipiński A., Markowski P.: Stan prac badawczych i najnowsze tendencje konstrukcji maszyn do siewu i sadzenia. Olsztyn, 2011. Dostępne w Internecie pod adresem: <http://www.agengpol.pl/ekspertyzy.aspx> – stan z dnia: 01-03-2019.
63. Lipiński A.: Równomierność podłużna wysiewu nasion pszenicy siewnikiem z redlicami talerzowymi. *Inżynieria Rolnicza*. 4(129), s 191–196, 2011.
64. Liu T., Li R., Jin X., Ding J., Zhu X., Sun C., Guo W.: Evaluation of Seed Emergence Uniformity of Mechanically Sown Wheat with UAV RGB Imagery. *Remote Sensing*, 9(12), 1241, 2017.
65. Maleki M.R., Mouazen A.M., De Ketelaere B., De Baerdemaeker J.: A New Index for Seed Distribution Uniformity Evaluation of Grain Drills. *Biosystems Engineering*, Volume 94, Issue 3, s. 471-475, 2006.
66. Marcinkiewicz J., Selech J., Staszak Ż., Gierz Ł., Ulbrich D., Romek D.: DEM simulation research of selected sowing unit elements used in a mechanical seeding drill. *MATEC Web Conf.* 254 02021 (2019), DOI: 10.1051/mateconf/201925402021, 2019
67. Markowski P., Anders A., Kaliniewicz Z., Choszcz D., Kolankowska E., Grodzicki M.: Wpływ przewodu nasiennego i prędkości roboczej siewnika na równomierność wysiewu nasion pszenżyta. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 575, s. 79-89, 2013.
68. Markowski P., Rawa T., Lipiński A.: Wpływ wybranych czynników na równomierność dozowania i wysiewu nasion pszenicy kołeczkowym zespołem wysiewającym. *Inżynieria Rolnicza* 5(103), s 103–109, 2008.
69. Markowski P., Rawa T., Warych G.: Próba określenia wpływu przewodu nasiennego i redlicy siewnika na równomierność wysiewu nasion pszenicy. *Inżynieria Rolnicza* 7(95), s 137–143, 2007.
70. Markowski P., Rawa T.: Kołeczkowy zespół wysiewający. Część 1. Budowa i zasada funkcjonowania. *Inżynieria Rolnicza* 5(114), s. 201–209, 2009.
71. Markowski P.: Uwarunkowania techniczno-technologiczne oceny siewników uniwersalnych i specjalnych w aspekcie równomierności wysiewu. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 2017.
72. Markowski P.: Wpływ wybranych czynników na równomierność wysiewu nasion żyta siewnikami rzędowymi. *Inżynieria Rolnicza* 4(129), s 227–235, 2011.
73. Markowski, P., Rawa T., Szczyglak P.: Wpływ wybranych parametrów siewu na kształtowanie przestrzeni życiowej roślin bobiku. *Inżynieria Rolnicza, Z.* 4(139) T.1, s. 247-257, 2012.
74. Markowski, P., Rawa, T., Szczyglak, P.: Wpływ wybranych parametrów siewu na kształtowanie przestrzeni życiowej roślin pszenicy. *Inżynieria Rolnicza, Z.* 3(146) T.2, s. 263-273, 2013.
75. Marquering J., Scheufler B.: Precise Sowing with a Grain Counter Sensor. *LANDTECHNIK* 61, 5, s. 248-249, 2006.
76. Müller J., Wiesehoff M., Hörner R.: Längsverteilung von Drillmaschinen - ISO-Standard 7256/2 ist revisionsbedürftig. *LANDTECHNIK* 61, 6 (Dez. 2006), s. 374–375, 2006.
77. Müller J., Wiesehoff M., Hörner R.: Neubewertung des ISO-Standards 7256/2 zur Evaluierung der Längsverteilung von Drillmaschinen. In: *Tagung Landtechnik*, Hannover, 2001.
78. Navid H., Ebrahimian S., Gassemzadeh H., Mousavi nia MJ.: Laboratory Evaluation of Seed Metering Device Using Image Processing Method. *Australian Journal of Agricultural Engineering*, Vol. 2, No. 1, s. 1-4, 2011.

79. Norma BN-81/9195-11. 1981. Maszyny rolnicze. Siewniki. Nazwy, określenia i podział. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. Wyd. Normalizacji ALFA.
80. Norma ISO 7256/2-1984.: Sowing equipment - Test methods - Seed drills for sowing in lines.
81. Öztürk İ., Yildirim Y., Hınıslioglu S., Demir B., Kuş E.: Optimization of seed flow evenness of fluted rolls used in seed drills by Taguchi method. *Scientific Research and Essays*, Vol. 7(1), s. 78-85, 2012.
82. Pawłowski T., Szczepaniak J., Rogacki R., Wietrzyk M., Wojciechowski J.: Siewnik do siewu nasion różnych kultur, zwłaszcza do siewu nasion uprawnych. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, PL215509 B1, 2011.
83. Podolska G.: Prowadzenie łąnu, *Farmer* 09/2007, s. 12-15, Dostępne w Internecie pod adresem: <https://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/zboza/prowadzenie-lanu,4259.html> – stan z dnia: 23-07-2020.
84. Polska Norma PN-84/R-55050. Metody badań siewników polowych rzędowych i rzutowych. PKNMiJ, Wyd. Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1985.
85. Polska Norma PN-87/R-36540. Siewniki zbożowe. Ogólne wymagania i badania. PKNMiJ, Wyd. Normalizacyjne Alfa, Warszawa 1987.
86. Prospekt. Pronto DC. Uniwersalna technika siewu w każdych warunkach. HORSCH, PL-90.230.455 (2020.02_ver.01).
87. Prospekty i materiały informacyjne firmy Meccanoplast.
88. Rawa T., Markowski P., Lipiński A.: Próba określenia wpływu parametrów roboczych kołeczkowego zespołu wysiewającego oraz szerokości międzyrzędzi i prędkości siewu na równomierność dozowania nasion pszenicy. *Inżynieria Rolnicza* 7/2005, s 255–263, 2005.
89. Rawa T., Markowski P.: Analiza kołeczkowych zespołów wysiewających w aspekcie ich konstrukcji i równomierności dozowania nasion. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 13(33). Kraków. s. 383-390, 2001.
90. Rawa T., Markowski P.: Kołeczkowy zespół wysiewający, patent P- 200965, 2003.
91. Rawa T., Markowski P.: Kształtowanie wskaźnika nierównomierności wysiewu nasion rzepaku w zależności od wybranych czynników i procedur obliczeniowych. *Inżynieria Rolnicza* R. 10, nr 12(87), s. 435–442, 2006.
92. Rogacki R., Szczepaniak J., Pawłowski T., Szczepaniak M., Wasieczko P.: Zespół wysiewający służący do dozowania nasion w rzędowych siewnikach polowych, pozwalający na wysiew różnych kultur nasion uprawnych, patent P- 225949, 2014.
93. Ślesicka E., Markowski P., Gierz Ł.: Przegląd parametrów technicznych i cech użytkowych siewników uniwersalnych. Cz. 1. Siewniki mechaniczne. *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 2/2019.
94. System Maszyn Rolniczych. Część 7. Produkcja ziarna i nasion. Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa, 1988.
95. Szwedziak, K., Grzywacz, Z., Polanóczyk, E., Bebenek, P., Olejnik, M.: Optimization of management processing in assessing the quality of stored grain using techniques and artificial neural networks, *Applied Sciences* 10(16),5721, 2020.
96. Test DLG – Raport z testu 6794: Mechaniczny siewnik Amazone Cataya 3000 Super. www.DLG-Test.de, 2017.
97. Test DLG – Raport z testu DLG 5724F: Zawieszany siewnik rzędowy D9-30 Super. 2008.
98. Wachowski M.: James Cooke, jeden z wybitnych wynalazców siewnika, *Kwartalnik Historii Nauki i Techniki* 7/1-2, s 99-108, 1962.

99. Wolny S., Tys J.: Kodeks dobrej praktyki produkcji rzepaku. Monografia. Polskie Stowarzyszenie Producentów Oleju, Warszawa 2008.
100. Zarajczyk J., Sobczak P.: The meating of beetroot seeds sowing quality with the use of precision seed plate planter. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 75, s 51-55, 2011.
101. Zhao B., Zhang J., Yang C., Zhou G., Ding Y., Shi Y., Zhang D., Xie J., Liao Q.: Rapeseed Seedling Stand Counting and Seeding Performance Evaluation at Two Early Growth Stages Based on Unmanned Aerial Vehicle Imagery. *Frontiers in plant science*, 9, 1362. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01362>, 2018.

Spis rysunków

Rys. 2.1 Siewnik S107 firmy MEPROZET [31]	13
Rys. 2.2. Siewnik MAZUR 1100 firmy UNIA [35]	13
Rys. 2.3. Siewnik AD Super firmy AMAZONE [33]	14
Rys. 2.4. Siewnik Saphir 8 firmy LEMKEN [30]	15
Rys. 2.5. Siewnik FS 2400/4 firmy UNIA	16
Rys. 2.6. Siewnik Pronto 3 - 6 DC firmy HORSCH [34]	16
Rys. 5.1. Budowa roweczkowego aparatu wysiewającego	34
Rys. 5.2. Parametry nastawcze roweczkowego aparatu wysiewającego.....	35
Rys. 5.3. Kołeczkowy aparat wysiewający typu Siederslebena firmy Meccanoplast.....	36
Rys. 5.4. Siewnik rzędowy uniwersalny Scorpius firmy Bomet [29]	36
Rys. 5.5. Siewnik rzędowy uniwersalny firmy Agromaster.....	37
Rys. 5.6. Regulacja kołeczkowego aparatu wysiewającego na przykładzie siewnika POLONEZ firmy UNIA [38]	37
Rys. 5.7. Kształt skrzyni nasiennej.....	38
Rys. 5.8. Budowa stanowiska badawczego	39
Rys. 5.9. Układ sterowania i kontroli	40
Rys. 5.10. Możliwości nastawcze stanowiska	41
Rys. 5.11. Stanowisko badawcze – warianty badań z wysiewem na taśmę.....	42
Rys. 5.12 Stanowisko badawcze w konfiguracji do optycznej rejestracji wysianych nasion ..	42
Rys. 5.13 Stanowisko badawcze w konfiguracji do rejestracji wysianych nasion czujnikiem piezoelektrycznym.....	43
Rys. 5.14 Stanowisko badawcze w konfiguracji do klasycznych pomiarów wagowych.....	43
Rys. 5.15. Schemat aplikacji sterującej stanowiskiem badawczym	44
Rys. 5.16. Fragment interfejsu z polami wyświetlającymi informacje o nastawach i parametrach pracy	44
Rys. 5.17. Widok nastaw prędkości taśmy oraz prędkości kątowej i wartości zmian kąta pochylenia skrzyni nasiennej.....	45
Rys. 5.18. Widok wyprowadzeń wejściowych oraz wyjściowych głównego bloku sterującego	45
Rys. 5.19. Wago-suszarka MA200 3Y WM firmy Radwag.....	51
Rys. 5.20. Stanowisko badawcze masy 1000 nasion.....	52
Rys. 5.21. Ziarna grube - badania z wykorzystaniem nasion kukurydzy	55
Rys. 5.22. Ziarna średniej wielkości - badania z wykorzystaniem nasion pszenicy	55
Rys. 5.23. Ziarna drobne - badania z wykorzystaniem nasion gorczycy	55
Rys. 5.24. Nasiona na przenośniku z widocznymi obszarami zliczania ziarna.....	56
Rys. 5.25. Przygotowanie obrazu do operacji zliczania nasion; (zaznaczono nasiona leżące blisko siebie, które mogą być uznane przez program zliczający za jeden obiekt)	57
Rys. 5.26. W wyniku działania funkcji <i>imerode</i> obraz leżących blisko siebie ziaren został rozdzielony	57

Rys. 5.27. Postać binarna analizowanego obrazu (z lewej) oraz powiększenie widoku pojedynczego nasiona (z prawej)	58
Rys. 5.28. Postać końcowa analizowanego obrazu (z lewej) oraz powiększenie widoku pojedynczego nasiona (z prawej)	59
Rys. 5.29. Układ pomiarowy do zliczania nasion wysianych na stanowisku pomiarowym. ...	60
Rys. 5.30. Pierwotny przebieg otrzymany z układu pomiarowego do zliczania nasion (fragment)	61
Rys. 5.31. Schemat blokowy algorytmu.....	61
Rys. 5.32. Fragmentu wykresu sygnału z widocznymi wartościami stałej limit (dwie poziome niebieskie linie) oraz zakresem działania parametru ramka – punkty pomiarowe, dla których wysokość czerwonej linii wynosi 1 zostały pominięte w analizie	62
Rys. 5.33. Wykres fragmentu sygnału z widocznymi, zaznaczonymi czerwoną linią, „ramkami”; każdy taki słupek oznacza zliczone nasiono.....	62
Rys. 6.1. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu pszenicy.....	66
Rys. 6.2. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu owsa	67
Rys. 6.3. Zależność wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla wysiewu jęczmienia	69
Rys. 6.4. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od kąta pochylenia siewnika przy wysiewie pszenicy	70
Rys. 6.5. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego (źródło: opracowanie własne).....	71
Rys. 6.6. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku	72
Rys. 6.7. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od częstotliwości drgań konstrukcji siewnika przy wysiewie pszenicy – mieszadło w zbiorniku włączone.....	73
Rys. 6.8. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w zależności od częstotliwości drgań konstrukcji siewnika przy siewie pszenicy – mieszadło w zbiorniku wyłączone, poziom nasion w zbiorniku $H = 420$ mm.....	73
Rys. 6.9. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od kąta pochylenia siewnika przy siewie pszenicy	75
Rys. 6.10. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego przy wysiewie pszenicy	76
Rys. 6.11. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku przy siewie pszenicy	78
Rys. 7.1. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu pszenicy dla $s = 27$ mm w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	83
Rys. 7.2. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu pszenicy dla $s = 18$ mm w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	86
Rys. 7.3. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu owsa w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	90
Rys. 7.4. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu jęczmienia w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości	

obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	95
Rys. 7.5. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ R podczas wysiewu rzepaku w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 13,5$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	99
Rys. 7.6. Wykresy zmian wartości wydatku jednostkowego q dozownika Typ K podczas wysiewu pszenicy w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β , prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w i grubości warstwy ziarna w skrzyni nasiennej H odpowiednio dla: a) $H = 25$ cm, b) $\beta = 0^\circ$ c) $n_w = 25,2$ obr/min	103
Rys. 7.7. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od wartości kąta pochylenia siewnika β dla $n_w = 25$ obr/min i $H = 23$ cm	104
Rys. 7.8. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od wartości prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w dla $\beta = 0^\circ$ i $H = 23$ cm	105
Rys. 7.9. Wykres zmian wartości wydajności jednostkowej q dla dozowników Typ R i Typ K, w zależności od poziomu nasion w zbiorniku H dla $n_w = 25$ obr/min i $\beta = 0^\circ$	105
Rys. 8.1. Uproszczony schemat blokowy algorytmu sterowania pracą siewnika	110
Rys. 8.2. Widok wyprowadzeń wejściowych oraz wyjściowych bloku algorytmu korekcyjnego	111
Rys. 8.3. Widok elementów wewnątrz bloku algorytmu korekcyjnego	111
Rys. 8.4. Widok elementów wewnątrz bloku współczynnika korekcji	112
Rys. 8.5. Fragment programu odpowiedzialny za obliczenie wydajności jednostkowej dozownika na podstawie modelu regresyjnego	112
Rys. 8.6. Wykres obrazujący przebieg eksperymentu oraz działanie algorytmu korekcyjnego reagującego na symulowane zmiany parametrów eksploatacyjnych	113
Rys. 8.7. Porównanie ilości wysiewu bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego	116
Rys. 8.8. Odchyłka ilości wysiewu ΔQ_{ha} (wartość procentowa odchylenia między rzeczywistą ilością wysiewu i ilością zadaną)	117
Rys. 8.9. Scenariusz pracy siewnika w postaci wykresu zmian parametrów opisujących warunki wysiewu	119
Rys. 8.10. Rozkład liczby nasion w kolejnych odcinkach pomiarowych o długości 0,1 m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - wysiew bez algorytmu	120
Rys. 8.11. Rozkład liczby nasion w kolejnych odcinkach pomiarowych o długości 0,1 m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - wysiew z algorytmem	120
Rys. 8.12. Liczności nasion w przedziałach o długości 5m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - dla wysiewu bez algorytmu	121
Rys. 8.13. Liczności nasion w przedziałach o długości 5m na tle wartości czynników eksploatacyjnych - dla wysiewu bez algorytmu	121

Spis tabel

Tab. 2.1. Wymagania dotyczące nierównomierności siewu nasion	11
Tab. 5.1. Czynniki doświadczenia	46
Tab. 5.2. Warianty badań roweczkowego aparatu wysiewającego	49
Tab. 6.1. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion pszenicy	65
Tab. 6.2. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy	65

Tab. 6.3. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion owsa	66
Tab. 6.4. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu owsa	67
Tab. 6.5. Arkusz badań zależności wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) od czynnej długości wałka wysiewającego dla nasion jęczmienia	68
Tab. 6.6. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ R) w zależności od czynnej długości wałka wysiewającego s uzyskane w wyniku badań wysiewu jęczmienia	68
Tab. 6.7. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla nasion rzepaku	69
Tab. 6.8. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji kąta pochylenia siewnika	70
Tab. 6.9. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji prędkości obrotowej wałka wysiewającego	71
Tab. 6.10. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji poziomu nasion w zbiorniku	71
Tab. 6.11. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) w funkcji częstotliwości drgań konstrukcji siewnika	72
Tab. 6.12. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji kąta pochylenia siewnika	74
Tab. 6.13. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od kąta pochylenia siewnika β uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy	74
Tab. 6.14. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji prędkości obrotowej wałka wysiewającego	75
Tab. 6.15. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od prędkości obrotowej wałka wysiewającego n_w uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy	76
Tab. 6.16. Arkusz badań pilotażowych wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) w funkcji poziomu nasion w zbiorniku	77
Tab. 6.17. Wartości wydajności jednostkowej q dozownika (Typ K) w zależności od poziomu nasion w zbiorniku H uzyskane w wyniku badań wysiewu pszenicy	77
Tab. 7.1. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa I	79
Tab. 7.2. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu pszenicy – nastawa I	80
Tab. 7.3. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa I	80
Tab. 7.4. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy – nastawa I, dozownik (Typ R)	81
Tab. 7.5. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.1) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	82
Tab. 7.6. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu pszenicy – nastawa II	84
Tab. 7.7. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy – nastawa II, dozownik (Typ R)	84
Tab. 7.8. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.2) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	85
Tab. 7.9. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu owsa	87
Tab. 7.10. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu owsa	87

Tab. 7.11. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu owsa dozownikiem (Typ R).....	88
Tab. 7.12. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu owsa dozownikiem (Typ R).....	88
Tab. 7.13. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.3) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	89
Tab. 7.14. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu jęczmienia - nastawa I	91
Tab. 7.15. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu jęczmienia.....	91
Tab. 7.16. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu jęczmienia dozownikiem (Typ R).....	92
Tab. 7.17. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu jęczmienia - nastawa II.....	92
Tab. 7.18. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu jęczmienia dozownikiem (Typ R)	93
Tab. 7.19. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.4) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	94
Tab. 7.20. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ R) dla wysiewu rzepaku	96
Tab. 7.21. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ R) oraz wyniki tych badań dla wysiewu rzepaku	96
Tab. 7.22. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu rzepaku dozownikiem (Typ R)	97
Tab. 7.23. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu rzepaku dozownikiem (Typ R)	97
Tab. 7.24. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.5) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	98
Tab. 7.25. Arkusz badań wydajności jednostkowej dozownika (Typ K) dla wysiewu pszenicy	100
Tab. 7.26. Wartości czynników wejściowych dla planu badań istotności ich wpływu na wydajność jednostkową dozownika (Typ K) oraz wyniki tych badań dla wysiewu pszenicy	100
Tab. 7.27. Wyniki badań istotności wpływu czynników wejściowych na wydatek jednostkowy dla wysiewu pszenicy dozownikiem (Typ K).....	101
Tab. 7.28. Wartości czynników wejściowych pięciopoziomowego planu rotatabilnego oraz wyniki badań dla wysiewu pszenicy dozownikiem (Typ K).....	101
Tab. 7.29. Porównanie wartości wydajności jednostkowych uzyskanych za pomocą modelu (7.6) oraz z eksperymentów wykonywanych dla potrzeb identyfikacji modelu	102
Tab. 7.30. Odchyłka dawkowania w oparciu o analizę modeli regresyjnych poszczególnych wariantów badawczych	106
Tab. 8.1. Arkusz badań sprawdzających odchyłki dawkowania dozownika bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego	114
Tab. 8.2. Wyniki badań skuteczności działania algorytmu korekcyjnego na stanowisku badawczym – porównanie dokładności zachowania zadanej normy wysiewu $Q_{ha} = 200$ kg/ha	115
Tab. 8.3. Ocena dokładności dozowania wg DLG	118
Tab. 8.4. Arkusz badań sprawdzających jakość pracy siewnika w zmiennych warunkach eksploatacyjnych bez i z użyciem algorytmu korekcyjnego	119