

Autoreferat rozprawy doktorskiej

mgr inż. Marcin Wachowicz



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

Wydział Inżynierii Mechanicznej

**Badanie wpływu wybranych cech
i parametrów konstrukcyjnych maszyny do
obierania cebuli na kształtowanie jej
charakterystyk użytkowych**

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Bochat

Publiczna obrona rozprawy doktorskiej

Bydgoszcz, 23.11.2021

1. Uzasadnienie wyboru tematu

Cebula jadalna jest jednym z głównych składników potraw ludzkości od czasów starożytnych. W ostatnich latach średnioroczna produkcja cebuli na świecie kształtuje się na poziomie 85-88 mln ton, a powierzchnia jej upraw wynosi 4,4 mln ha. Największym producentem cebuli na świecie jest Azja z krajami takimi jak Chiny czy Indie. Dużym producentem w skali światowej są też Stany Zjednoczone. Produkcja Europejska to ponad 15% produkcji światowej, a największymi producentami europejskimi są Holandia, Hiszpania i Polska, gdzie rocznie na ok. 25 tys. ha uprawia się ok. 500-600 tys. to cebuli.

Większość zbiorów cebuli przetwarzana jest w sposób przemysłowy stanowiąc składniki konserw, mrożonek, sałatek oraz będąc półproduktem wykorzystywanym w pokrewnych dziedzinach przemysłu spożywczego służącym głównie do zapewnienia określonych wymagań smakowych.

Niezależnie od dalszego przeznaczenia pierwszymi zabiegami, jakim poddawana jest cebula po zebraniu z planacji są usunięcie zewnętrznych, zaschniętych warstw łusek oraz pozabawienie jej pozostałości szczypioru i piętki zawierającej korzeń. Pomimo nieustannego rozwoju technik przetwórstwa spożywczego zabiegi te wciąż wykonywane są w dużym zakresie w sposób manualny. Jako główną przyczynę braku pełnego zmechanizowania procesów obierania cebuli wymienić można dużą energochłonność, w tym wysokie zużycie sprężonego powietrza, niezadowalającą skuteczność funkcjonowania maszyn oferowanych na rynku światowym oraz większe ilości generowanego odpadu niż w przypadku obierania ręcznego.

Z uwagi na brak siły roboczej oraz stale rosnące koszty pracy ludzkiej zauważalna jest potrzeba wprowadzenia na rynek maszyn służących do zmechanizowanego obierania cebuli zapewniających charakterystyki użytkowe ekonomicznie uzasadniające ich użytkowanie.

2. Cele pracy

Podstawowym celem pracy jest sformułowanie odpowiedzi na postawione pytania badawcze mających dostarczyć informacji o wyborze układów zmiennych niezależnych, dla których maszyna osiąga optymalne charakterystyki użytkowe. Charakterystyki te opisywane są przez zmienne zależne: wielkość generowanych start ilościowych X , wydajność W , skuteczność funkcjonowania maszyny S , oraz jednostkowe zużycie energii na realizację procesu obierania E_j .

Obiektem badań jest innowacyjna maszyna, całkowicie zaprojektowana i zbudowana przez autora rozprawy. Innowacyjność konstrukcji maszyny polega przede wszystkim na zastosowaniu układu wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek z cebul obranych niepoprawnie.

Dodatkowym celem pracy jest udzielenie odpowiedzi na pytanie czy zastosowanie dodatkowych, innowacyjnych rozwiązań w istotny sposób przyczyni się do zwiększenia skuteczności funkcjonowania maszyny oraz jak wtedy będą kształtować się wielkości pozostałych zmiennych zależnych.

3. Zakres pracy

Rozprawa składa się z 8 rozdziałów i obejmuje 245 stron.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp, gdzie został określony stan zagadnienia oraz szczegółowo sformułowano cele pracy.

W rozdziale drugim dokonano charakterystyki maszyn do obierania cebuli produkowanych przez światowych liderów w tej dziedzinie. W dalszej części rozdziału znajduje się opis dotychczasowych badań analitycznych i doświadczalnych związanych bezpośrednio z procesami zachodzącymi w czasie maszynowego obierania cebuli. W końcowej części rozdziału zawarte jest podsumowanie przeglądu literatury dotyczącej zagadnienia.

W rozdziale trzecim określone zostały problemy badawcze, których rozwiązanie w założeniu ma dostarczyć nowej wiedzy w zakresie konstruowania i eksploatacji maszyn do przemysłowego obierania cebuli.

Rozdział czwarty zawiera plan i program badań doświadczalnych. Dokonano definicji zmiennych niezależnych i zmiennych zależnych oraz szczegółowo opisano materiał przyjęty do badań oraz warunki prowadzenia eksperymentu.

W rozdziale piątym dokonano szczegółowego opisu konstrukcji oraz sposobu funkcjonowania nowatorskiej konstrukcji maszyny będącej obiektem badań. Zamieszczono schemat moduło-funkcjonalny oraz opisano zasadę działania innowacyjnego układu wizualnej kontroli jakości.

Rozdział szósty stanowi opis metodyki badań. Szczegółowo opisano zarówno sposób przygotowania materiału do badań, jak i sposoby pomiarów wartości poszczególnych zmiennych niezależnych oraz wyznaczania wartości zmiennych zależnych.

W rozdziale siódmym zamieszczona została analiza wyników badań doświadczalnych. Dokonano analizy błędów pomiarowych. Opracowano równania funkcji regresji opisujące kształtowanie każdej zmiennej zależnej w zależności od wartości przyjmowanych przez zmienne niezależne. Przeprowadzono testowanie hipotez mające na celu udzielenie odpowiedzi na pytanie czy zastosowanie nowatorskich rozwiązań w postaci układu wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek w istotny sposób przyczyni się do wzrostu skuteczności funkcjonowania maszyny.

W rozdziale ósmym sformułowano wnioski stanowiące odpowiedzi na pytania badawcze oraz będące bardzo istotnym źródłem wiedzy w zakresie projektowania, konstruowania i użytkowania maszyn do obierania cebuli. W rozdziale tym zaproponowano również możliwe dalsze kierunki badań naukowych związanych z tematyką zagadnienia.

4. Analiza stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

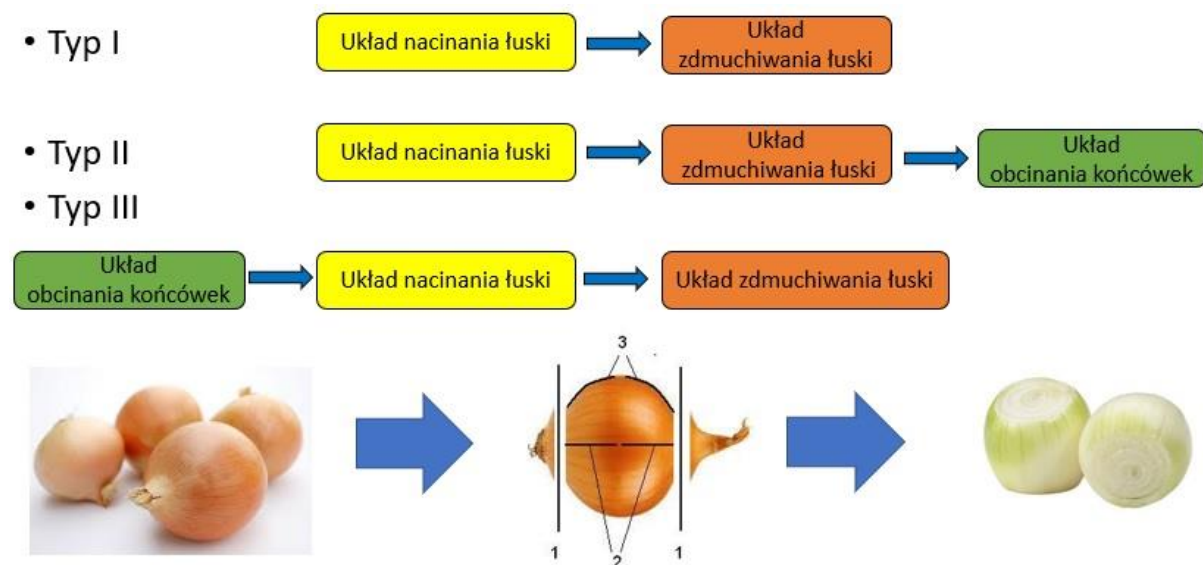
Procesy zachodzące podczas maszynowego obierania cebuli to proces cięcia materiału roślinnego raz proces usuwania naciętych łusek strumieniem sprężonego powietrza.

Literatura krajowa i zagraniczna jest dość bogata zarówno w prace dotyczące opisu analitycznego (Iwaszko, Żeligowski, Goriaczkin), jak i badań empirycznych procesów cięcia warzyw (Opielak, Sykut, Kowalik, Nadulski, Wawryniuk, Guz, Szot, Kęsik, Głowacki, Baran, Marks, Ajayi, Clarke). Jednocześnie zarówno w literaturze krajowej, jak i zagranicznej brak jest

prac związanych z badaniem zarówno fizycznych podstaw, jak i zagadnień technologicznych procesu usuwania łuski strumieniem sprężonego powietrza.

5. Istota konstrukcji maszyn do obierania cebuli

Spośród maszyn obecnych na rynku wyróżnić można trzy zasadnicze schematy budowy (rys.1). Cechą wspólną wszystkich z nich jest zastosowanie sprężonego powietrza do usuwania naciętych łusek, natomiast różnią się one przede wszystkim sposobem wykonywania nacięć łuski oraz kolejnością realizowania zabiegów.



Rys. 1. Schematy budowy najpopularniejszych maszyn do obierania cebuli.

Pierwszy typ maszyn są to maszyny wykonujące nacięcie łusek oraz usunięcie ich przy pomocy sprężonego powietrza. Nie stosuje się tu pozycjonowania cebul, nacięcie łusek występuje w losowych miejscach, a końcówki obcinane są ręcznie przez pracowników po skończonym procesie maszynowego obierania. Maszyny takie cechują się bardzo dużą wydajnością sięgającą 1600kg/h jednak produktem finalnym jest półprodukt, który musi być dalej obrabiany ręcznie, co niesie za sobą konieczność stosowania licznej obsługi. Przykładem takiej maszyny może być maszyna polskiej firmy Projekt (rys.2).

Kolejny typ maszyn stanowią maszyny nie wymagające pozycjonowania cebul, wykonujące nacięcia łusek w losowych miejscach oraz ich zdmuchiwanie sprężonym powietrzem. Po tych zabiegach cebule są pobierane przez operatora z zasobnika międzyzabiegowego i ręcznie pozycjonowane w celu obcięcia końcówek, które następuje w kolejnym układzie maszyny. Bardzo często, jak w przypadku polskiego producenta Imizumi (rys.3) linia taka składa się z dwóch maszyn ustawionych szeregowo. Pierwsza stosowana jest w celu usuwania łuski, druga w celu obcięcia końcówek.



Rys. 2. Maszyna do obierania cebuli Projekt ([maszyna do obierania cebuli projekt – Szukaj w Google](#))

Trzeci typ stanowią maszyny, w których pierwszym zabiegiem jest ręczne pozycjonowanie cebul w celu obcięcia końcówek. Kolejnymi zabiegami są nacięcie łusek oraz usunięcie ich przy pomocy sprężonego powietrza. Maszyny tego typu cechują się największą skutecznością obierania i są najszerszej stosowane w przetwórstwie. Przykładami takich rozwiązań konstrukcyjnych są maszyny producentów takich jak: Dofra (rys. 4), Sormac, M&P.



Rys. 3. Maszyny do obierania cebuli Imizumi ([Oferta | Producent maszyn do obierania cebuli IMIZUNI](#))



Rys. 4. Maszyna do obierania cebuli produkcji holenderskiej Dofra ([FTNON DOFRA prezentuje nową maszynę do obierania cebuli - Maszyny rolnicze - strona 1 \(gospodarz.pl\)](#))

6. Problemy badawcze

W pracy zostały postawione trzy problemy badawcze sformułowane w formie pytań, które brzmią następująco:

1. Jaka zachodzi zależność ilościowa pomiędzy:

- prędkością podawania materiału,
- głębokością nacięć zewnętrznych łusek,
- liczbą dysz powietrznych,
- odległością dysz powietrznych od materiału,
- wartością ciśnienia powietrza urządzenia zdejmującego łuski

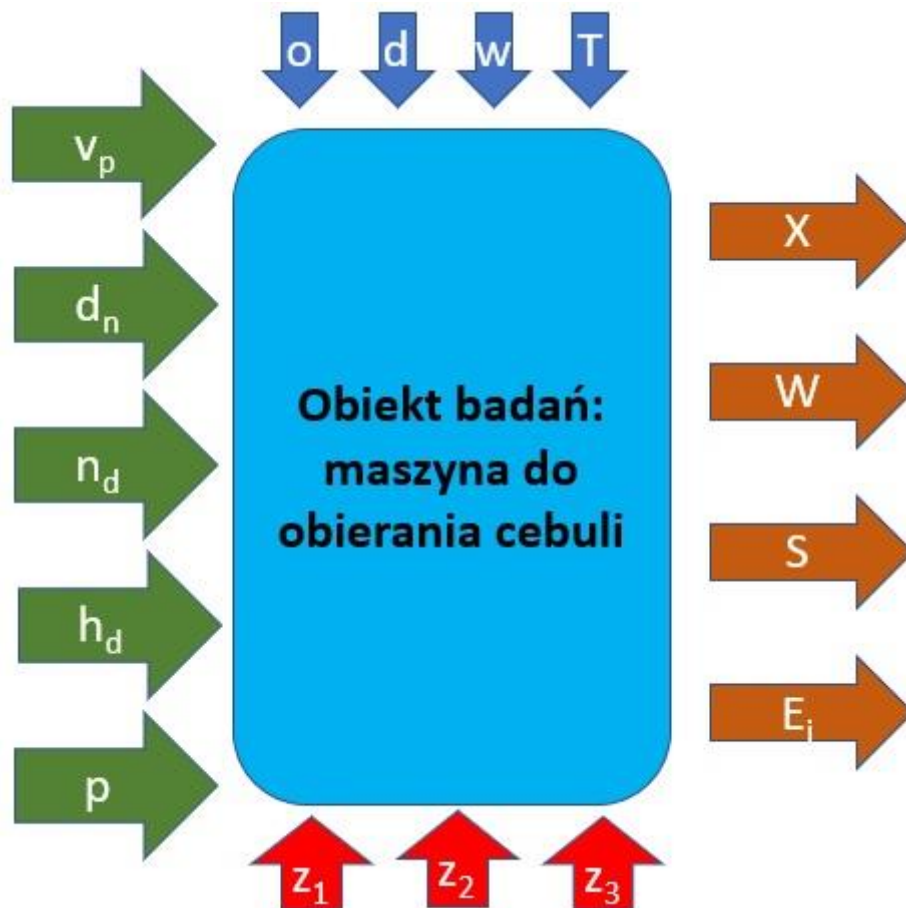
a wydajnością maszyny i jednostkowym zużyciem energii na realizację procesu?

2. Jakie parametry robocze nowej konstrukcji maszyny do obierania cebuli wywierają istotny wpływ na straty ilościowe procesu obierania oraz skuteczność jej funkcjonowania?

3. Czy zastosowanie układu wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek w istotny sposób przyczyni się do podniesienia skuteczności funkcjonowania maszyny? Jak będzie się kształtował jednostkowe zużycie energii i straty ilościowe generowane przez ten układ?

7. Plan i program badań doświadczalnych

W celu znalezienia odpowiedzi na sformułowane pytania badawcze opracowano schemat badań doświadczalnych, w którym oprócz zmiennych niezależnych oraz zmiennych zależnych uwzględniono wpływ czynników stałych takich jak temperatura oraz wilgotność powietrza, odmiana czy średnica cebuli oraz wpływ czynników zakłócających. Schemat badań doświadczalnych przedstawi rys. 5.



Rys. 5. Schemat badań doświadczalnych: zmienne niezależne: v_p – prędkość podawania materiału, d_n – głębokość nacięć zewnętrznych łusek, n_d – liczba dysz powietrznych usuwających łuskę, h_d – odległość dysz usuwających łuskę od materiału, p – ciśnienie powietrza zasilającego układ usuwania łusek, zmienne zależne: X – starty ilościowe, W - wydajność maszyny, S – skuteczność funkcjonowania maszyny, E_j – jednostkowe zużycie energii na realizację procesu obierania cebuli, czynniki stałe: o – odmiana cebuli, d – średnica cebuli, w - wilgotność powietrza, T – temperatura otoczenia, z_1, z_2, z_3 – czynniki zakłócające

Zmienne niezależne przyjęte w programie badań stanowią:

prędkość podawania materiału v_p [$\frac{\text{szt. cebul}}{\text{min}}$] - prędkość przenośnika dostarczającego cebulę do strefy obcinania końcówek i nacinania zewnętrznej łuski,
głębokość nacięć zewnętrznych łusek d_n [mm] - głębokość zagłębienia noży nacinających w materiał,

liczba dysz powietrznych usuwających łuskę n_d [szt.] - liczba czynnych dysz biorących udział z procesie usuwania łusek sprężonym powietrzem,
odległość dysz powietrznych od materiału h_d [mm] - odległość końcówki dyszy zdmuchującej łuskę od powierzchni wałków obracająco-transportujących, co po uwzględnieniu średnicy obrabianej cebuli pośrednio określa odległość końcówki dyszy od powierzchni cebuli,
ciśnienie powietrza zasilającego układ usuwający łuski p [bar] - ciśnienie powietrza zasilającego układ usuwania łusek.

Na podstawie wyników badań wstępnych przyjęto następujący zakres zmiennych niezależnych:

- Prędkość podawania materiału v_p : 30, 45, 60 [$\frac{\text{szt. cebul}}{\text{min}}$],
- Głębokość nacięć zewnętrznych łusek d_n : 1,5; 2,25; 3 [mm],
- Liczba dysz powietrznych usuwających łuskę n_d : 2, 3, 4 [szt.],
- Odległość dysz powietrznych od materiału h_d : 20, 30, 40 [mm],
- Ciśnienie powietrza zasilającego układ usuwający łuski p : 4, 5, 6, 7 [bar]

Zmienne zależne opisujące charakterystyki użytkowe maszyny stanowią:

straty ilościowe X - stosunek masy generowanego odpadu do masy cebuli pobranej przez maszynę do obrabiania w jednostce czasu,

wydajność maszyny W - stosunek masy cebuli opuszczającej maszynę do czasu trwania procesu obrabiania,

skuteczność funkcjonowania maszyny S - stosunek masy cebuli poprawnie obranej do całkowitej masy cebuli opuszczającej maszynę,

jednostkowe zużycie energii na realizację procesu E_j - stosunek sumy energii zużytej do realizacji procesu obcinania końcówek i usuwania zewnętrznych łusek do masy cebuli obranej w jednostce czasu

Badania eksperymentalne prowadzone były dwuetapowo. Pierwszy etap związany był z zebraniem informacji o wpływie wartości zmiennych niezależnych na kształtowanie zmiennych zależnych. Badania wykonane w drugim etapie miały na celu znalezienie odpowiedzi na pytanie czy zastosowanie dodatkowej wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwającego łuski z cebul obranych niepoprawnie wpłynie na wzrost skuteczności funkcjonowania maszyny oraz jak wtedy będą się kształtować wartości pozostałych zmiennych zależnych.

W pierwszym etapie badań pomiary prowadzone były z wyłączoną funkcją wizualnej kontroli jakości oraz modułem dokonującym poprawek. Pojedyncze doświadczenie polegało na pomiarze wartości wszystkich wielkości potrzebnych do wyznaczenia wartości zmiennych zależnych przy zadanej kombinacji zmiennych niezależnych w czasie funkcjonowania maszyny równym 10 minut. Liczba powtórzeń pojedynczego doświadczenia wynosiła 14 i została ona określona na podstawie obliczonych wartości odchylenia standardowego próby, uzyskanych w wyniku przeprowadzenia badań wstępnych przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$ oraz dopuszczalnym błędzie szacunku $d=2\%$

Druga część badań zasadniczych prowadzona była w celu wyznaczenia wpływu układu wizualnej kontroli jakości oraz modułu dokonującego poprawek na kształtowanie skuteczności

funkcjonowania maszyny. W tym etapie badań wykonanych zostało dodatkowych 280 (20 serii po 14 badań) eksperymentów z uruchomionymi oboma układami dodatkowymi. Jako zestawy zmiennych niezależnych w tych badaniach posłużyły układy wyłonione losowo spośród wszystkich 324 kombinacji zmiennych opisujących.

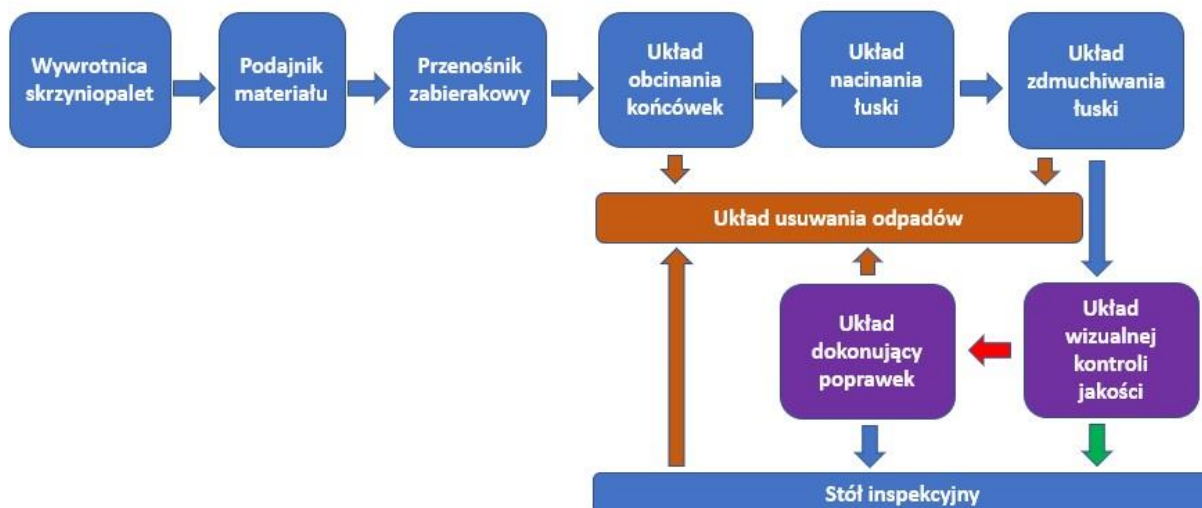
Postępując według wyżej przedstawionego planu badań zasadniczych wykonano 4816 eksperymentów zużywając 235980kg materiału, który stanowiła cebula odmiany Bonus.

8. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze stanowiła skonstruowana i zbudowana przez autora rozprawy maszyna do przemysłowego obierania cebuli (rys. 6), której schemat funkcjonalny przedstawiono na rys. 7.



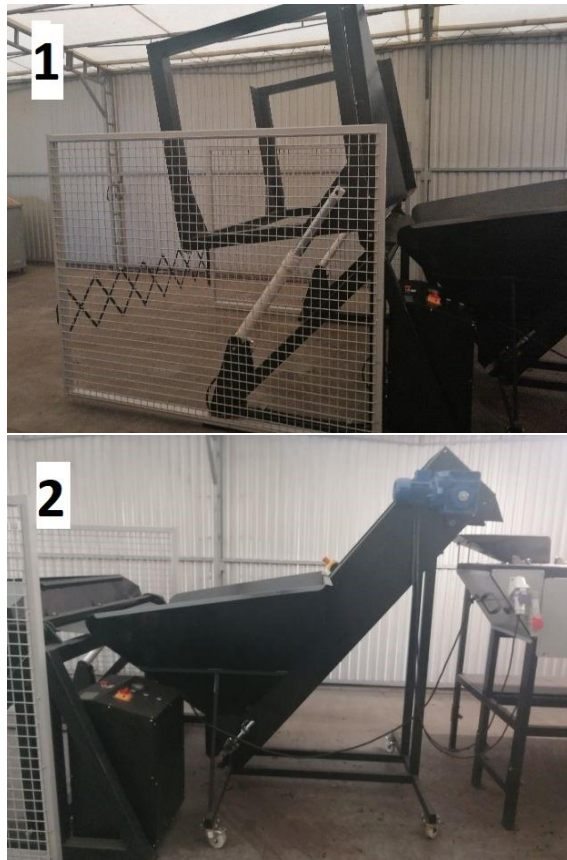
Rys. 6. Stanowisko badawcze – maszyna do obierania cebuli zaprojektowana i zbudowana przez autora rozprawy



Rys. 7. Schemat funkcjonalny maszyny do obierania cebuli będącej obiektem badań: 1- wywrotnica skrzyniopalet, 2 – podajnik materiału, 3 – przeñośnik zabierakowy, 4 – układ obcinania końcówek, 5 – układ nacinania łuski, 6 – układ zdmuchiwania łuski, 7 – układ wizualnej kontroli jakości, 8 – układ dokonujący poprawek, 9 – stół inspekcyjny, 10 – układ usuwania odpadów

Pierwszym, biorąc pod uwagę kolejność przebiegu procesów technologicznych, elementem roboczym stanowiska jest wywrotnica skrzyniopalet (1) umożliwiająca rozładunek dostarczonej do badań cebuli do podajnika (2) wyposażonego w przeñośnik taśmowy z zabierakami (rys. 8). Przeñośnik ten napędzany jest silnikiem indukcyjnym trójfazowym, a jego prędkość regulowana jest za pomocą przemiennika częstotliwości i jest bezpośrednio

powiązana z prędkością głównego przenośnika zabierakowego zadawaną przez operatora bezpośrednio z poziomu panelu operatorskiego.

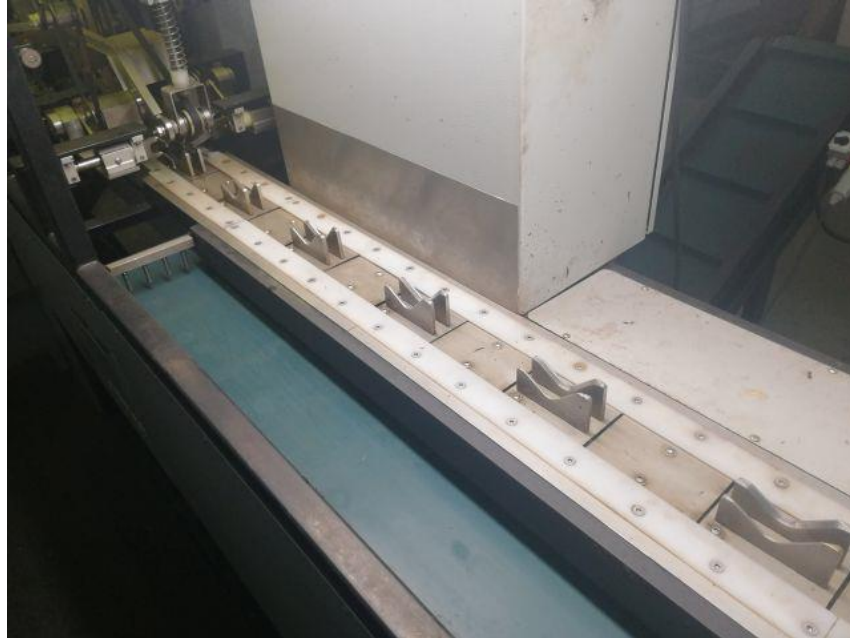


Rys. 8. Elementy składowe stanowiska badawczego: 1- wywrotnica skrzyniopalet, 2- podajnik materiału z zasobnikiem i przenośnikiem

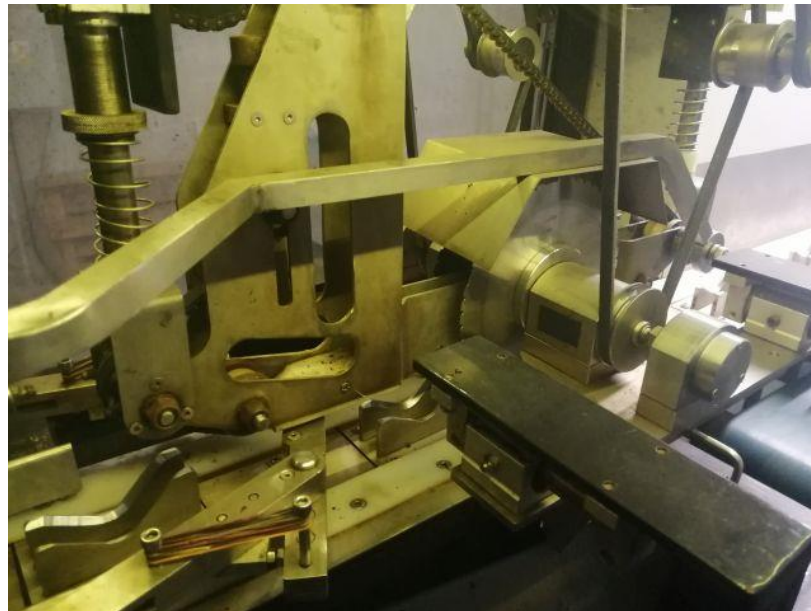
Zadaniem przenośnika jest dostarczenie cebuli na kolejny przenośnik taśmowy z taśmą gładką, skąd jest ona pobierana przez operatora i umieszczana bezpośrednio w zabierakach głównego przenośnika zabierakowego (3) (rys.9). Praca operatora sprowadza się do umieszczenia cebuli w zabierakach przenośnika głównego w odpowiedniej orientacji przestrzennej (oś symetrii cebuli powinna być zorientowana w kierunku poziomym oraz prostopadłym do kierunku przesuwu przenośnika) oraz detekcji i usunięcia cebul nienadających się do obierania (zgnite, uszkodzone mechanicznie).

Po spozycjonowaniu cebuli w zabierakach zostaje ona przetransportowana do strefy obcinania końcówek (4). Układ obcinania końcówek składa się z dwóch noży tarczowych o średnicy 200mm wirujących z prędkością obrotową $2000\frac{\text{obr}}{\text{min}}$ napędzanych silnikiem indukcyjnym trójfazowym (rys. 10). Noże te są zamocowane w sposób umożliwiający ciągłą zmianę ich rozstawu i połączone z aparatem kopiującym rozmiar cebuli. Praca tego układu polega na zapewnieniu samoczynnego dopasowania rozstawu noży obcinających do wielkości cebuli. W celu zapewnienia stałej pozycji materiału w czasie procesu cięcia cebula jest dociskana do zabieraków poprzez układ docisku wyposażony w gumowy pas, którego prędkość liniowa jest równa prędkości przenośnika zabierakowego. Układy napędu przenośnika głównego oraz paska docisku połączone są poprzez układ kół zębatych oraz

przekładnie łańcuchowe co zapewnia synchronizację prędkości podczas zmiany prędkości przenośnika. Zmiana ta dokonywana jest poprzez zmianę obrotów głównego silnika za pomocą potencjometru umiejscowionego na panelu operatorskim sterującego przemiennikiem częstotliwości.



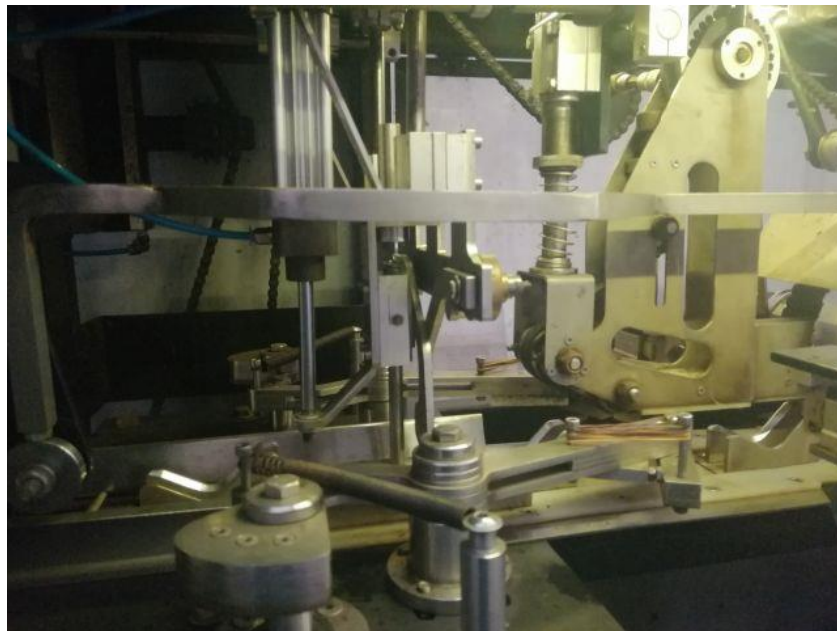
Rys. 9. Główny przenośnik zabierakowy (3)



Rys. 10. Układ obcinania końcówek (4)

Po obcięciu końcówek cebula jest przemieszczana do strefy nacinania łuski (5). Układ odpowiedzialny za realizację tego procesu składa się z dwóch niezależnych podukładów pozwalających w zależności od potrzeb na aktywację jednej lub dwóch par noży nacinających. Podstawowym elementem wykonawczym jest w tym przypadku para noży pracujących

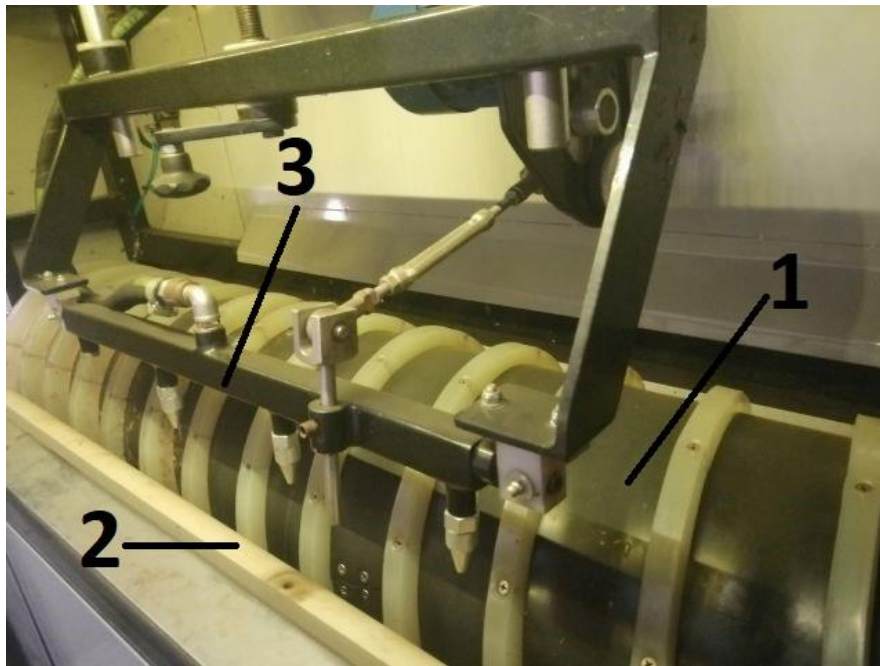
w płaszczyźnie poziomej wykonujących dwa nacięcia zewnętrznych łusek (rys. 11). Praca noży nacinających polega na jednoczesnym rozsuwaniu noży poprzez krzywki układu napędowego oraz materiał znajdujący się na przenośniku. Ruch tych noży jest zsynchronizowany z ruchem głównego przenośnika zabierakowego w celu uniknięcia kolizji z zabierakami w przypadku nieumieszczenia w nim cebuli przez operatora. Niezależnie od pracy noży wykonujących nacięcia zasadnicze możliwa jest aktywacja kolejnej pary noży wykonujących dwa nacięcia w płaszczyźnie pionowej (rys. 11). Układ tych noży zamocowany jest na wózku wykonującym ruch posuwisto-zwrotny zsynchronizowany z ruchem przenośnika głównego za pomocą układu przekładni łańcuchowych. Za wykonanie nacięć odpowiedzialny jest siłownik pneumatyczny sterowany wyłącznikiem krańcowym szczytującym aktualną pozycję głównego przenośnika. Wysterowanie siłownika w odpowiednim czasie pozwala na wykonanie szybkiego ruchu w kierunku materiału znajdującego się w danym momencie pod nożami, wykonanie nacięć oraz powrót do pozycji wyjściowej i zamknięcie cyklu. Sam proces nacięcia realizowany jest poprzez samoczynne rozsuniecie noży na skutek kontaktu z powierzchnią nacinanej cebuli.



Rys. 11. Układ nacinania łusek (5)

Cebula pozbawiona końcówek, z naruszoną ciągłością tkanek łusek zewnętrznych przenoszona jest do układu dokonującego usunięcia łuski przy użyciu sprężonego powietrza (6). Układ ten zbudowany jest z dwóch wałków oraz dysz powietrznych wykonujących ruch wahadłowy. Zadaniem wałków jest wprowadzenie cebuli w ruch obrotowy celem zwiększenia prawdopodobieństwa wniknięcia sprężonego powietrza w nacięcia łuski oraz jednoczesne przemieszczanie jej pod aparatem dokonującym usunięcia łusek. Transport materiału odbywa się poprzez zwój spiralny nawinięty na powierzchni wałka o większej średnicy. Odpowiedni dobór przełożeń przekładni łańcuchowych pozwala na utrzymanie równych prędkości liniowych punktów znajdujących się na powierzchni obu wałków pomimo różnicy ich średnic. Dzięki zastosowaniu tej zależności oraz zgodnego kierunku obrotów możliwe jest wprowadzenie cebuli znajdującej się na wałkach w ruch obrotowy.

W trakcie przemieszczania się wzdłuż osi wałków obracająco-transportujących cebula poddawana jest działaniu sprężonego powietrza. Budowa układu zdmuchiwania łusek pozwala na regulację odległości dysz od materiału oraz zmianę ilości aktywnych dysz. Ruch wahadłowy wykonywany przez dysze podobnie jak ruch obrotowy wałków zastosowany został w celu zwiększenia prawdopodobieństwa wnikięcia sprężonego powietrza w szczeliny nacięć zewnętrznych łusek.

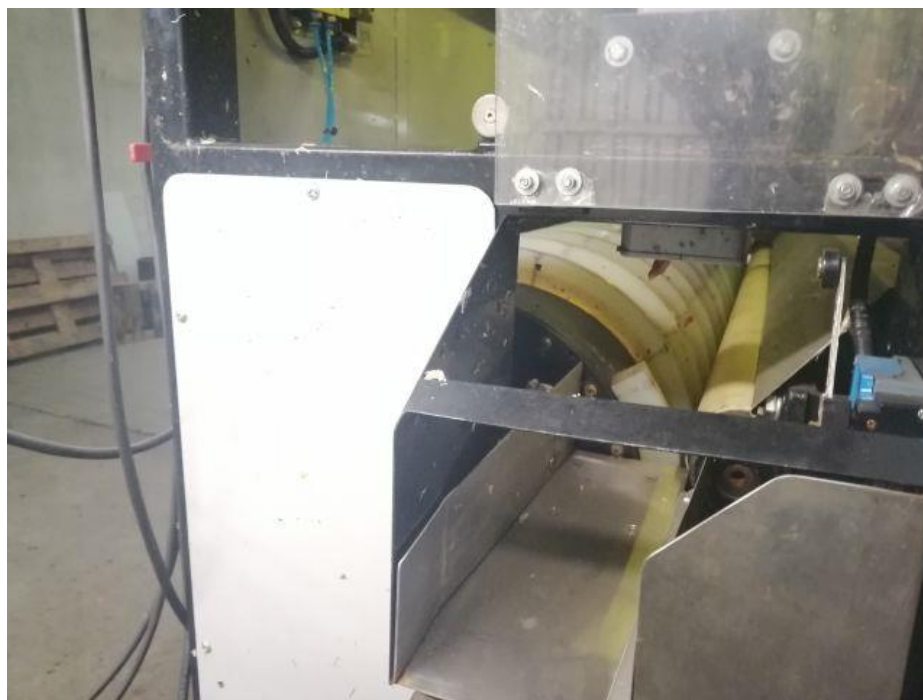


Rys. 12. Układ zdmuchiwania łusek (6): 1 – wałek obracająco-transportujący, 2 – wałek obracający, 3- zespół dysz powietrznych

W celu znalezienia odpowiedzi na pytanie czy wprowadzenie dodatkowego procesu selekcji i obierania cebul niespełniających wymagań jakościowych w istotny sposób przyczyni się do zwiększenia skuteczności funkcjonowania maszyny, bezpośrednio za układem zdmuchiwania łuski zabudowany został układ wizualnej kontroli jakości (7). Układ ten składa się z programowalnego czujnika koloru firmy Sick, który dostarcza sygnał do wejść cyfrowych specjalnie w tym celu skonstruowanego układu sterowania. Elementem wykonawczym tego układu jest ruchoma zastawka umiejscowiona w leju zsypanym cebuli. Praca układu polega na próbkowaniu koloru cebuli, która opuszcza maszynę. W przypadku, gdy cebula nie jest pozbawiona w całości łuski zewnętrznej, układ wysterowuje zastawkę do pozycji uniemożliwiającej przemieszczenie cebuli w kierunku stołu inspekcyjnego. Materiał niespełniający wymóg jakościowych trafia do układu dokonującego poprawek (8).

Funkcjonowanie układu poprawiającego polega na pobraniu cebuli z zasobnika poprzez przenośnik zabierakowy oraz dostarczeniu jej na obrotowe rolki. Po wykryciu przez czujnik obecności cebuli na rolkach następuje dosunięcie dyszy powietrznej, która usuwa pozostałości łusek.

Elementami uzupełniającymi maszyny do obierania cebuli stanowiącej główne stanowisko badawcze są rolkowy stół inspekcyjny (9) oraz układ usuwania odpadów (10) składający się z przenośnika ślimakowego i taśmowego.



Rys. 13. Układ wizualnej kontroli jakości (7)



Rys. 14. Układ dokonujący poprawek (8)

9. Metodyka badań

W celu wyznaczenia wpływu zmiennych niezależnych na kształtowanie charakterystyk użytkowych maszyny opracowano metodykę badań opisującą sposób pomiaru wartości poszczególnych zmiennych.

Zadawanie odpowiedniej prędkości podawania materiału odbywało się bezpośrednio z panelu operatorskiego poprzez nastawienie za pomocą potencjometru odpowiedniej częstotliwości prądu generowanej przez przemiennik częstotliwości zasilający silnik główny maszyny. Zależność prędkości podawania materiału od częstotliwości została wyznaczona wcześniej w trakcie badań wstępnych.

Wyznaczanie głębokości nacięć zewnętrznych łusek odbywało się na podstawie ustawienia odpowiedniej pozycji ogranicznika głębokości nacięć. Pomiaru wartości tej zmiennej dokonywano za pomocą suwmiarki wyposażonej w głębokościomierz.

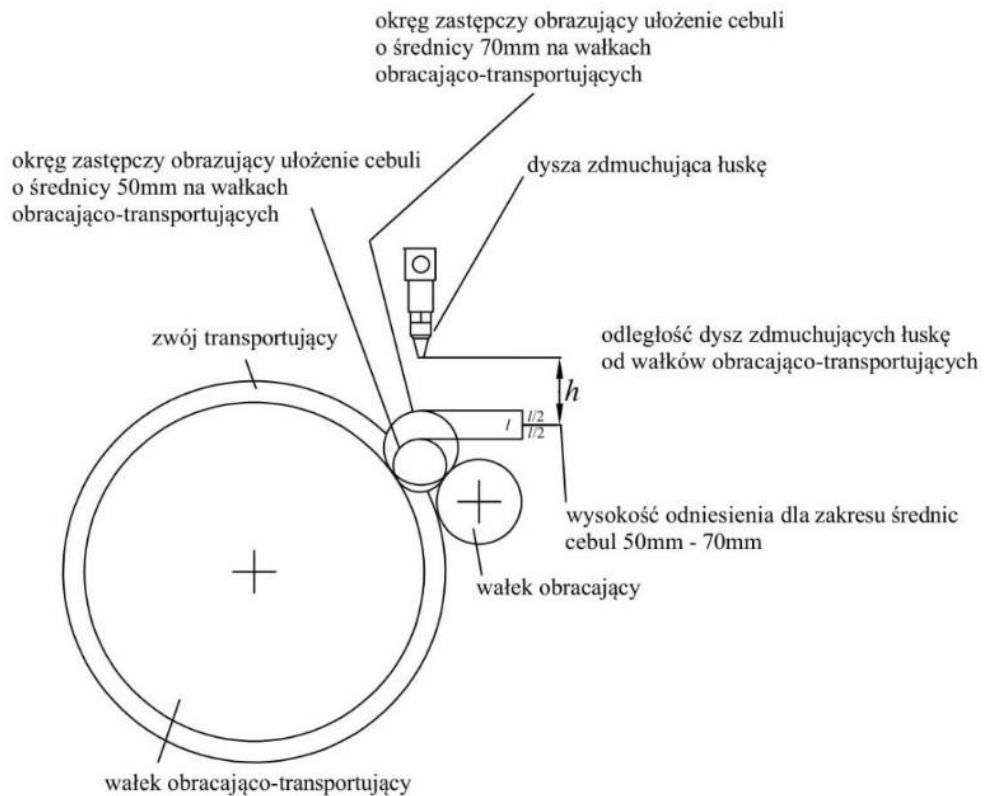


Rys. 15. Sposób wyznaczania głębokości nacięć zewnętrznych warstw łusek

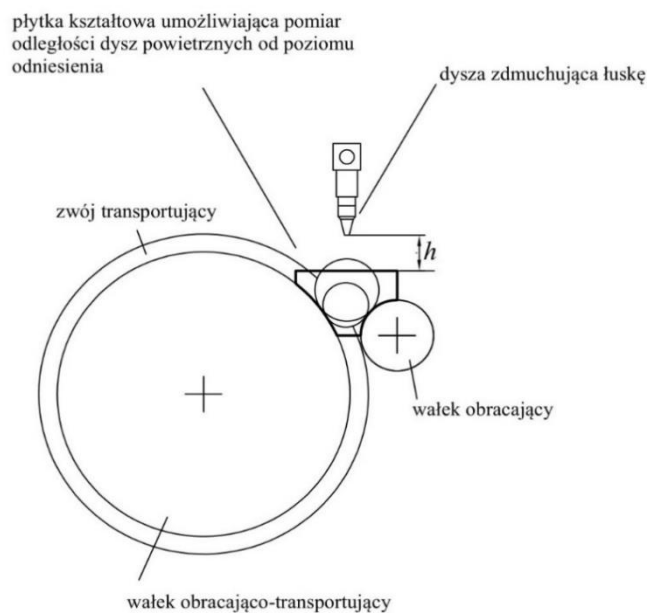
Pomiaru odległości dysz powietrznych od materiału dokonywano pośrednio poprzez pomiar odległości dysz od wałków obracająco-transportujących. Z uwagi, iż próbki przygotowane do badań nie zawierały cebul o ściśle określonej średnicy, lecz składały się z warzyw o rozpiętości zakresu średnic do 20mm, zdefiniowano umowny poziom odniesienia będący podstawą do wyznaczenia średniej odległości dysz od materiału. Sposób wyznaczania wysokości odniesienia został zobrazowany na rys. 16 i opierał się na wyznaczeniu okręgów zastępczych obrazujących ułożenie cebuli o danej średnicy na wałkach obracająco-transportujących.

W celu umożliwienia dokonywania pomiaru odległości dysz od poziomu odniesienia wykonana została pomocnicza płytka kształtowa przestawiona schematycznie na rys. 17. Przyrząd ten zaprojektowany został w ten sposób, aby po osadzeniu części kształtowej na powierzchniach wałków obracająco-transportujących jego górna krawędź wyznaczała poziom odniesienia. Pomiaru odległości końcówki dysz od górnej krawędzi płytki pomocniczej

dokonywano za pomocą suwmiarki elektronicznej. Konstrukcja stanowiska badawczego umożliwiała bezstopniową zmianę odległości dysz powietrznych od materiału.



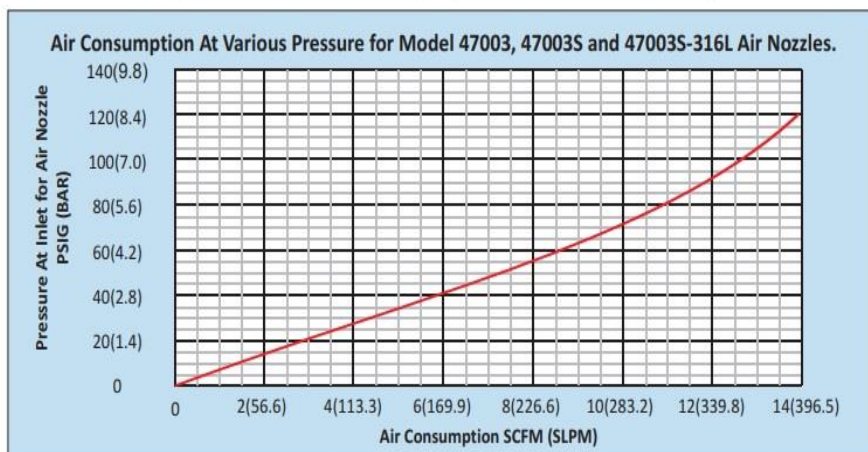
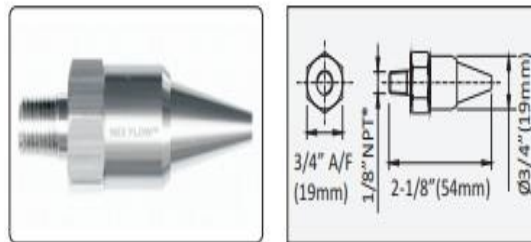
Rys.16. Schemat sposobu wyznaczania poziomego odniesienia w celu pomiaru odległości dysz usuwających łuskę od materiału



Rys. 17. Schemat pomiaru odległości dysz usuwających łuskę od zdefiniowanego poziomego odniesienia

Wartość ciśnienia powietrza zasilającego układ usuwania łusek nastawiana była za pomocą reduktora ciśnienia z manometrem znajdującego się na wejściu do układu usuwania łusek.

Wielkość strumienia powietrza przepływającego przez dysze usuwające łuskę szacowana była na podstawie pomiaru ciśnienia powietrza zasilającego układ oraz charakterystyk dysz dostarczonych przez ich producentów w formie wykresów oraz tabel (rys.18). Układ usuwający łuskę wyposażony był w dysze GreenTec 47003. W układzie dokonującym poprawek zastosowano dysze Silvent MJ5.



Ciśnienie [kPa]	200	400	600	800	1000
Siła [N]	0,7	1,5	2,1	2,9	3,6
Zużycie powietrza [Nm ³ /h]	4,5	7,9	11,4	14,8	18,2
Poziom hałasu [dB(A)]	72,3	77,6	80,7	84,5	86

Rys. 18. Charakterystyki dysz powietrznych stosowanych w układach usuwania łuski

Wyznaczając ilość energii sprężonego powietrza zużytego w procesie usuwania łuski założono proces adiabatycznego sprężania, a do obliczenia wartości tej wielkości użyto wartość energii wewnętrznej zakumulowanej w czasie adiabatycznego sprężania 1Nm³ powietrza do danego ciśnienia, wartość strumienia powietrza przepływającego przez dyszę, liczbę dysz oraz obliczoną wcześniej wydajność maszyny.

Wydajność funkcjonowania i straty ilościowe maszyny określano poprzez pomiar masy cebuli obranej przez maszynę oraz moduł dokonujący poprawek (w przypadku prowadzenia badań z uruchomionym modułem poprawiającym) i masy odpadu przetwarzanych i wytwarzanych w jednostce czasu.

Pomiaru czasu, w jakim obrana została określona wielkość próbki dokonywano licznikiem wyskalowanym w sekundach sterowanym przez stycznik załączający główny napęd stanowiska badawczego. Licznik ten posiadał funkcję generowania sygnału sterującego stycznikiem maszyny w celu zatrzymania stanowiska w momencie osiągnięcia zadanego czasu trwania eksperymentu. Takie rozwiązanie pozwoliło uniknąć błędów pomiaru spowodowanych niejednoczesnym rozpoczęciem i zakończeniem wykonywania eksperymentu oraz pomiaru czasu.

Wydajność maszyny zdefiniowano jako stosunek masy cebuli opuszczającej zespół usuwania łuski (cebula obrana i wymagająca poprawek) do czasu trwania procesu obierania.

Na podstawie przedstawionej wyżej definicji wydajność maszyny można zapisać wzorem.

$$W = \frac{m_i}{t} \quad (1)$$

gdzie:

W – wydajność maszyny,

m_i – masa cebuli opuszczającej układ usuwania łusek,

t – czas trwania eksperymentu

Straty ilościowe powstające w procesie obierania cebuli wyznaczano jako stosunek masy odpadu do masy próbki materiału przeznaczonego do obierania. Ze względów konstrukcyjnych w trakcie prowadzenia badań pomiar masy cebuli pobranej do przeprowadzenia pojedynczego eksperymentu był niemożliwy (pojemność skrzyniopalet, w których dostarczano materiał do badań zapewniała ilość materiału dla kilku eksperymentów) dlatego wielkość tę obliczano sumując masy cebuli opuszczającej układ usuwania łuski i odpadu.

Straty ilościowe wyrażono wzorem:

$$X = \frac{m_j}{m_i + m_j} \quad (2)$$

gdzie:

m_j – masa odpadu generowanego przez maszynę w wyłączonym modułem poprawkowym.

W odniesieniu do badań prowadzonych z uruchomioną funkcją wizualnej kontroli jakości i modułem poprawkowym wydajność maszyny jako całości określano jako:

$$W_1 = \frac{m_k}{t} = \frac{m_i + m_j}{t} \quad (3)$$

gdzie:

m_k – masa cebuli opuszczającej maszynę z włączonym modułem poprawkowym

m_l – masa cebuli opuszczającej moduł poprawkowy.

Straty ilościowe były w tym przypadku wyliczane według wzoru:

$$X_1 = \frac{m_m}{m_k + m_m} = \frac{m_j + m_n}{m_i + m_l + m_j + m_n} \quad (4)$$

gdzie:

m_m – masa odpadu generowanego przez maszynę z włączonym modułem poprawkowym,

m_n – masa odpadu generowanego przez moduł poprawkowy.

Skuteczność funkcjonowania określano poprzez dokonywanie selekcji cebul wymagających dodatkowych zabiegów usunięcia łuski po opuszczeniu maszyny. W przypadku badań funkcjonowania stanowiska z wyłączoną funkcją wizualnej kontroli jakości, selekcji cebul niespełniających wymogów jakościowych dokonywano ręcznie na rolkowym stole inspekcyjnym stanowiącym część składową stanowiska badawczego. Skuteczność funkcjonowania maszyny określano jako stosunek masy cebul poprawnie obranych przez zespół zdmuchujący łuski do masy wszystkich cebul opuszczających stanowisko badawcze.

$$S = \frac{m_o}{m_i} \quad (5)$$

gdzie:

S – skuteczność funkcjonowania maszyny z wyłączoną funkcją wizualnej kontroli jakości i modułem dokonującym poprawek,

m_o – masa cebuli poprawnie obranej przez układ usuwania łusek.

W przypadku badań prowadzonych z włączoną funkcją wizualnej kontroli jakości i modułem dokonującym poprawek, w celu dokonywania selekcji cebul z pozostałością zaschniętej łuski stanowisko badawcze wyposażono w programowalny czujnik koloru CS1-P3611 firmy SICK oraz specjalnie zaprojektowany układ kontrolno-wykonawczy (rys. 19, 20, 21). Funkcjonowanie tak zaprojektowanego układu polegało na detekcji przez czujnik koloru (zabudowany w miejscu wylotu cebuli ze stanowiska badawczego) zaprogramowanego koloru łuski, co powodowało aktywację ruchomej przegrody selekcyjnej (rys. 22) kierującej cebule niespełniające warunków jakościowych do zasobnika modułu dokonującego poprawek.



Rys. 19. Czujnik koloru CS1-P3611 firmy Sick



Rys. 20. Miejsce montażu czujnika CS1-P3611 w obudowie hermetycznej



Rys. 21. Układ sterowania ruchomą przegrodą selekcyjną



Rys. 22. Elementy wykonawcze układu selekcji cebul niespełniających wymagań jakościowych.

Zliczanie cebul niespełniających wymagań jakościowych po opuszczeniu modułu poprawkowego odbywało się na rolkowym stole inspekcyjnym. W tym przypadku skuteczność funkcjonowania została zdefiniowana jako stosunek sumy mas cebul skutecznie obranych

przez zespół zdmuchujący łuskę oraz moduł poprawkowy do masy wszystkich cebul opuszczających zespół usuwania łuski i moduł poprawkowy.

$$S_1 = \frac{m_p}{m_r} = \frac{m_o + m_s}{m_r} \quad (6)$$

gdzie:

S_1 – skuteczność funkcjonowania maszyny z włączoną funkcją wizualnej kontroli jakości i modułem dokonującym poprawek,

m_p – masa cebuli poprawnie obranej przez maszynę z włączonym modułem poprawkowym,

m_r – masa cebuli opuszczającej układ usuwania łusek i moduł dokonujący poprawek,

m_s – masa cebuli skutecznie obranej przez moduł poprawkowy.

Wyznaczając ilość energii sprężonego powietrza zużytego w procesie usuwania łuski założono proces adiabatycznego sprężania, a do obliczenia wartości tej wielkości użyto wartość energii wewnętrznej uzyskanej w czasie adiabatycznego sprężania 1Nm^3 powietrza do danego ciśnienia, wartość strumienia powietrza przepływającego przez dyszę, liczbę dysz oraz obliczoną wcześniej wydajność maszyny.

$$E_{jz} = \frac{E_w q_{pG} n_d}{W} \quad (7)$$

gdzie:

E_{jz} – jednostkowe zużycie energii strumienia sprężonego powietrza przez aparat zdmuchujący łuski $[\frac{kJ}{kg}]$,

E_w – energia wewnętrzna uzyskana w wyniku pracy wykonanej w czasie adiabatycznego sprężania 1Nm^3 powietrza do danego ciśnienia p $[\frac{kJ}{\text{Nm}^3}]$,

q_{pG} – strumień objętościowy powietrza przepływający przez dyszę GreenTec MQL47003 $[\frac{\text{Nm}^3}{\text{min}}]$,

n_d – liczba dysz GreenTec MQL 47003,

W – wydajność maszyny $[\frac{kg}{\text{min}}]$.

Analogicznie postępowano w przypadku wyznaczania jednostkowego zużycia powietrza przez moduł dokonujący poprawek.

$$E_{jm} = \frac{E_w q_{ps} t_{mp} n_{mp}}{W_{mp}} \quad (8)$$

gdzie:

E_{jm} – jednostkowe zużycie energii strumienia sprężonego powietrza przez moduł dokonujący poprawek $[\frac{kJ}{kg}]$,

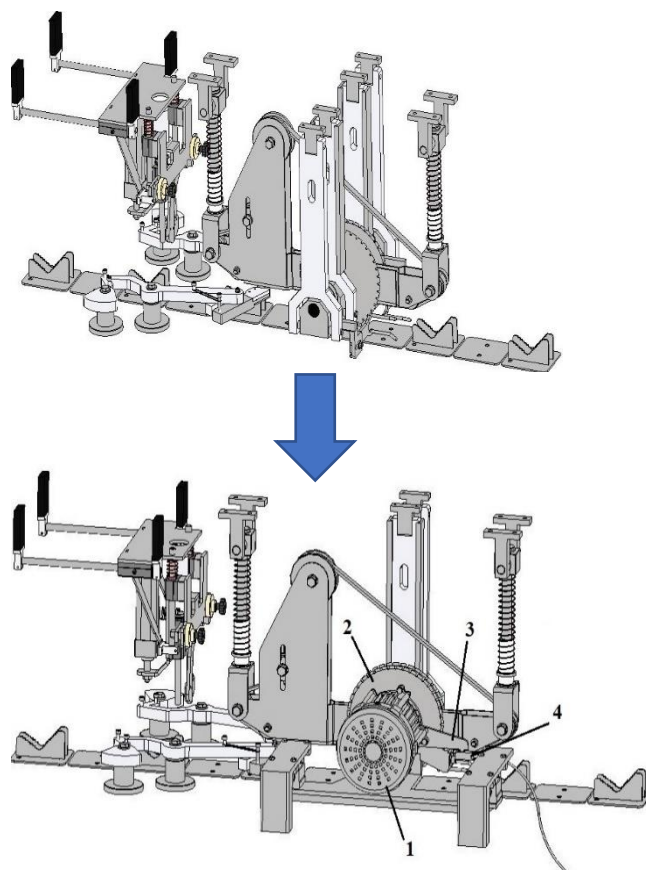
E_w – energia wewnętrzna uzyskana w wyniku pracy wykonanej w czasie adiabatycznego sprężania 1Nm^3 powietrza do danego ciśnienia p $[\frac{kJ}{\text{Nm}^3}]$,

q_{ps} – strumień objętościowy powietrza przepływającego przez dyszę Silvent MJ5 $[\frac{\text{Nm}^3}{s}]$,

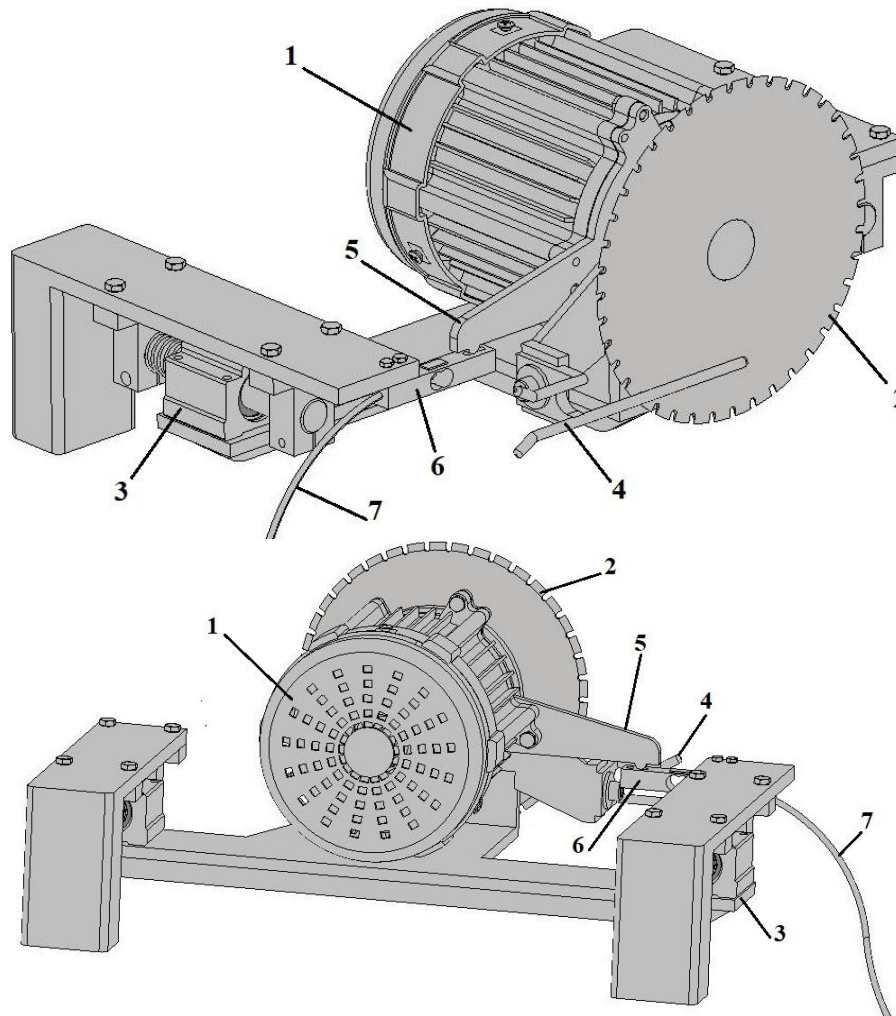
t_{mp} – czas trwania pojedynczego zabiegu odmuchiwanie cebuli z łuski w module dokonującym poprawek [s],

n_{mp} – ilość cebul obranych przez moduł poprawkowy w ciągu minuty

W celu wyznaczenia jednostkowego zużycia energii w procesie obcinania końcówek dokonywano pomiarów wartości momentu obciążającego tarczowe noże wykonujące obcięcie piętkek oraz pozostałości szczypioru. Aby umożliwić wykonanie tych pomiarów dokonano zmian konstrukcyjnych w stanowisku badawczym polegających na zmianie sposobu napędu jednego z noży obcinających (rys. 23). Podczas gdy w trakcie funkcjonowania maszyny w warunkach przetwórczych noże obcinające napędzane są poprzez układ przekładni pasowych przez jeden silnik zabudowany w komorze znajdującej się bezpośrednio nad przestrzenią obcinania końcówek i nacinania łuski, na czas dokonywania pomiaru momentu obrotowego zastosowano odrębny napęd jednego z noży za pomocą dodatkowego silnika indukcyjnego. Zabieg ten polegał na zamocowaniu silnika w sposób umożliwiający swobodny obrót wokół osi będącej osią symetrii wału napędowego. Taki sposób mocowania w trakcie pracy silnika powodował generowanie momentu siły powodującej obrót silnika dookoła osi symetrii wału. Zjawisko to zostało wykorzystane do zmierzenia wartości momentu poprzez przymocowanie do silnika ramienia reakcyjnego o znanej długości (150mm) i pomiarze siły reakcji w miejscu kontaktu ramienia z ramą stanowiska badawczego. W celu wykonania pomiaru momentu siły reakcji wykorzystano belkę tensometryczną SES-09074 oraz zbudowano układ służący do pomiaru wartości tej siły. Układ ten opierał się na wykorzystaniu płytki ARDUINO UNO z mikrokontrolerem ATMEGA328, wzmacniacza/przetwornika sygnału z układem HX711 oraz programu Arduino IDE w wersji 1.8.5



Rys 23. Zmiany konstrukcyjne wprowadzone w układzie obcinania końcówek w celu dokonania pomiaru momentu obciążającego wał silnika napędzającego noże: 1 – silnik indukcyjny, 2 – nóż tarczowy, 3 – ramię reakcyjne, 4 – belka tensometryczna



Rys. 24. Budowa układu służącego do pomiaru momentu obrotowego obciążającego wał silnika napędzającego tarczowe noże obcinające: 1- silnik indukcyjny, 2- nóż tarczowy, 3- układ prowadnic zbudowany z łożysk liniowych i wałków prowadzących umożliwiający kopiowanie kształtu cebuli, 4 – kalibrator kopiujący kształt cebuli, 5 – ramię reakcyjne, 6 – belka tensometryczna, 7 – przewód komunikacyjny łączący belkę tensometryczną z przetwornikiem nacisku HX 711

Mając wyznaczony moment obciążający noże tarczowe, jednostkowe zużycie energii na realizację procesu obcinania końcówek wyznaczano ze wzoru uwzględniającego prędkość obrotową noży oraz wydajność maszyny.

$$E_{jc} = 2 \frac{M_r n}{9550 W} \quad (9)$$

gdzie:

E_{jc} – jednostkowa energia procesu cięcia [$\frac{J}{kg}$],

M_r – moment obciążający zespół tnący równy momentowi reakcji siły [Nm],

n – prędkość obrotowa noży obcinających [$\frac{obr}{min}$],

W – wydajność maszyny [$\frac{kg}{min}$]

Całkowite jednostkowe zużycie energii wyznaczono na podstawie sumy energii zużytej w procesie obcinania końcówek i usuwania łuski.

$$E_j = E_{jc} + E_{jz} \quad (10)$$

$$E_j = \frac{t}{m_i} (E_w q_{PG} n_d + 0,00021 F_r r_r) \quad (11)$$

$$E_{j1} = E_{jc} + E_{jz} + E_{jm} \quad (12)$$

$$E_{j1} = t \left(\frac{E_w q_{PG} n_d + 0,00021 F_r r_r}{m_i} + \frac{E_w q_{PS} t_m n_{mp}}{m_t} \right) \quad (13)$$

Matematyczne opracowanie wyników badań polegało na:

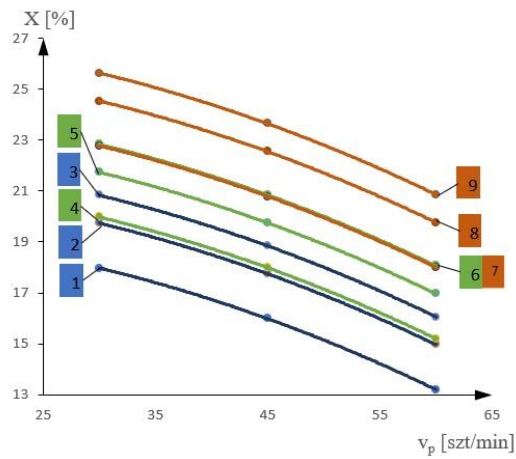
- zgromadzeniu przy użyciu programu CoolTerm na dysku komputera wartości siły reakcji służących do obliczenia momentu obrotowego,
- zgromadzeniu na dysku komputera wyników pomiarów: mas, czasów i ciśnienia sprężonego powietrza odpowiadających poszczególnym doświadczeniom
- obliczeniu wartości momentu obrotowego na podstawie zgromadzonych wyników pomiarów siły reakcji z wykorzystaniem programu MS Excel,
- przeprowadzeniu analizy błędów pomiarowych,
- obliczeniu średnich arytmetycznych wartości generowanych strat ilościowych X , wydajności W , skuteczności funkcjonowania maszyny S i jednostkowego zużycia energii E_j , obliczeniu wartości odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności dla wymienionych wielkości w programie MS Excel,
- sporządzeniu równań regresji wielowymiarowej dla analizowanych zmiennych niezależnych i zależnych

10. Wyniki badań

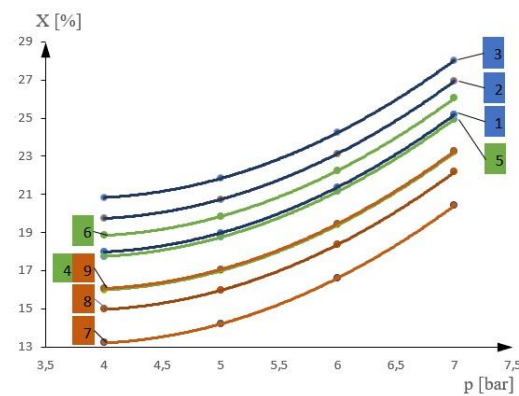
Wyniki pomiarów uzyskane w czasie prowadzonych eksperymentów pozwoliły na opracowanie równań regresji liniowej opisującej wpływ wartości zmiennych niezależnych na kształtowanie zmiennych zależnych. Dla wielkości strat ilościowych generowanych przez maszynę funkcja regresji przyjmuje następującą postać:

$$X = 0,2746 + 0,0456 d_n - 0,053 p - 1,77 \cdot 10^{-5} v_p^2 - 0,0059 d_n^2 + 0,004 n_d^2 - 3,1284 \cdot 10^{-5} h_d^2 + 0,007 p^2 \quad (14)$$

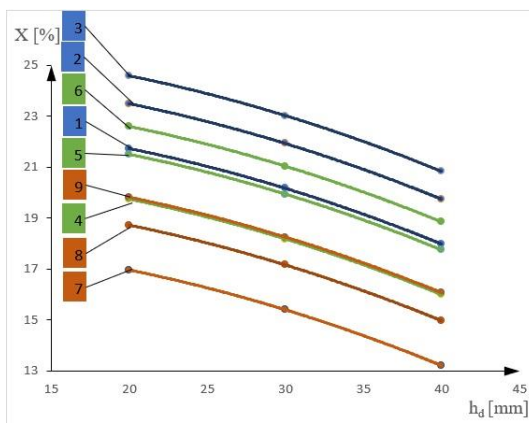
Szczegółowe interpretacje graficzne wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na kształtowanie wielkości zmiennych zależnych zajmują 139 stron rozprawy doktorskiej, w tym miejscu zamieszczono wybrane wykresy prezentujące te zależności.



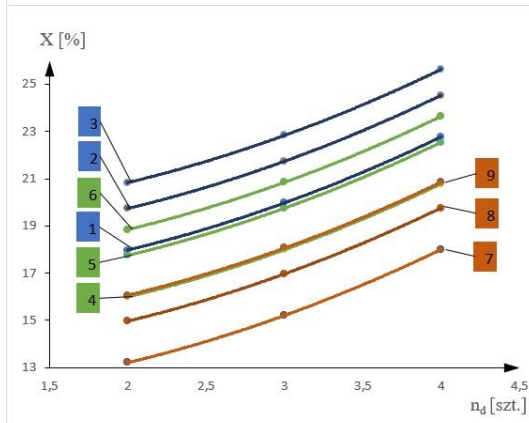
	d_a [mm]	n_d [szt.]	h_d [mm]	p [bar]
1	1,5	2	40	4
2	2,25			
3	3			
4	1,5	3		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	4		
8	2,25			
9	3			



	d_a [mm]	v_p [szt./min]	h_d [mm]	n_d [szt.]
1	1,5	30	40	2
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60		
8	2,25			
9	3			



	d_a [mm]	v_p [szt./min]	p [bar]	n_d [szt.]
1	1,5	30	4	2
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60		
8	2,25			
9	3			

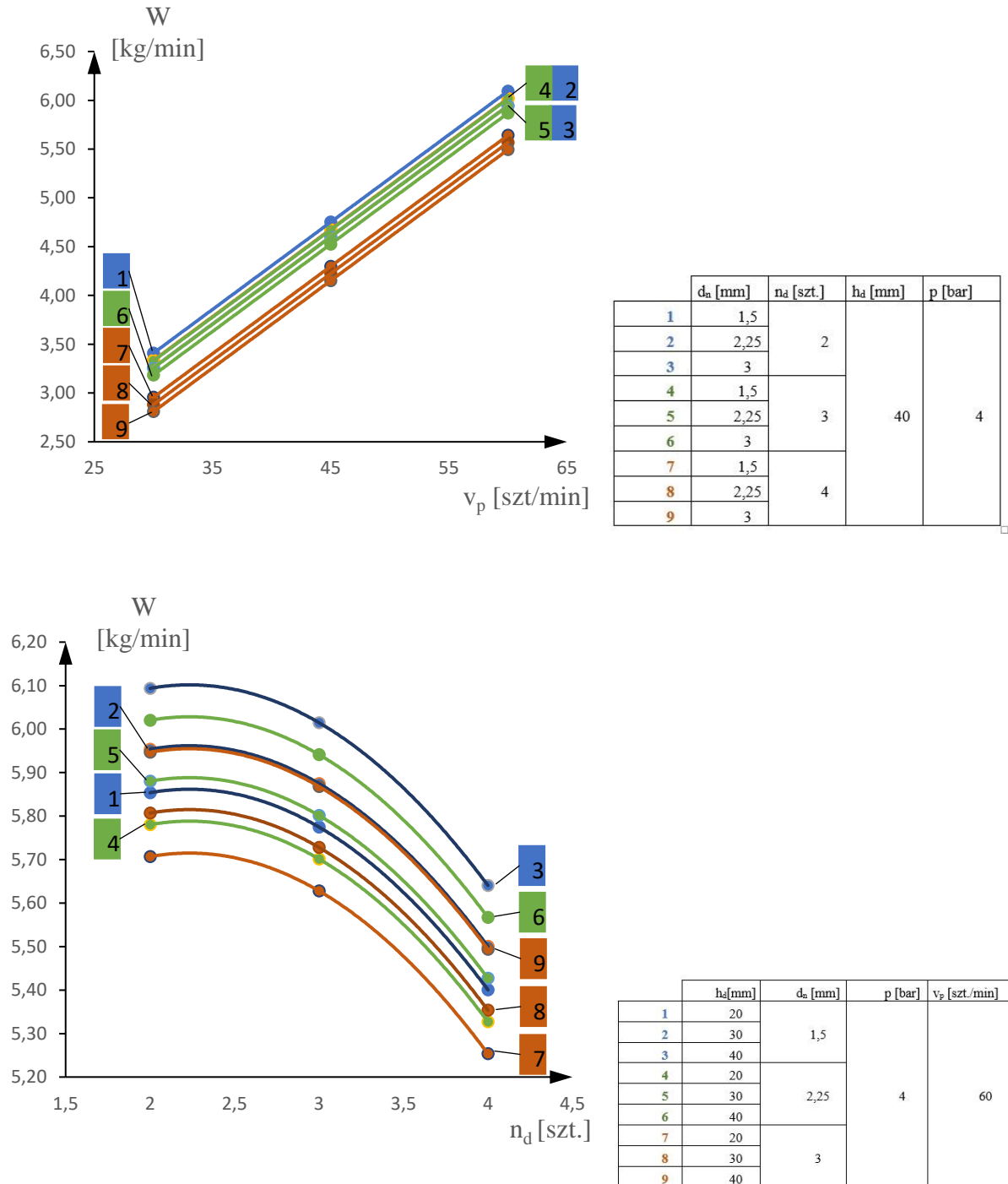


	d_a [mm]	v_p [szt./min]	p [bar]	h_d [mm]
1	1,5	30	4	40
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60		
8	2,25			
9	3			

Rys. 25. Wpływ prędkości podawania materiału, ciśnienia powietrza zasilającego układ usuwania łusek, liczby oraz odległości dysz powietrznych od materiału na kształtowanie wielkości strat ilościowych.

W przypadku wydajności maszyny funkcja regresji przyjmuje następującą postać, a jej przykładowe interpretacje graficzne zostały przedstawione w poniżej:

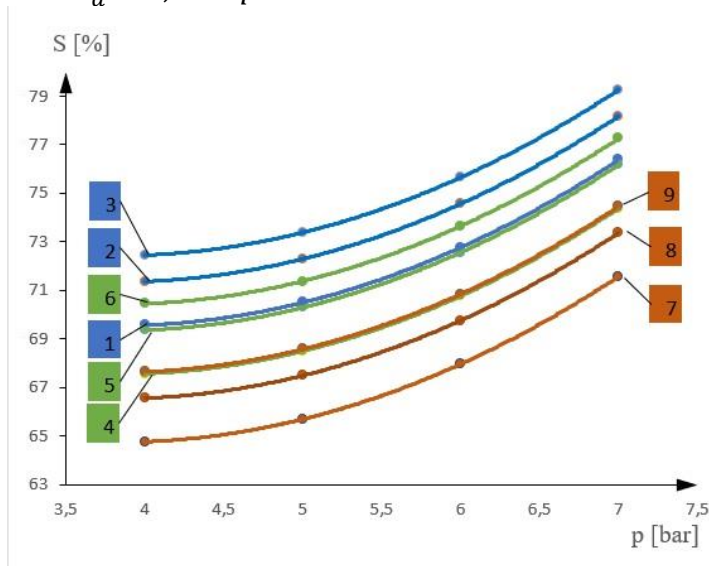
$$W = -0,7357 + 0,0947v_p - 0,3211d_n + 0,1974n_d + 0,3023p + 0,0524d_n^2 - 0,0541n_d^2 + 0,0001h_d^2 - 0,0374p^2 \quad (15)$$



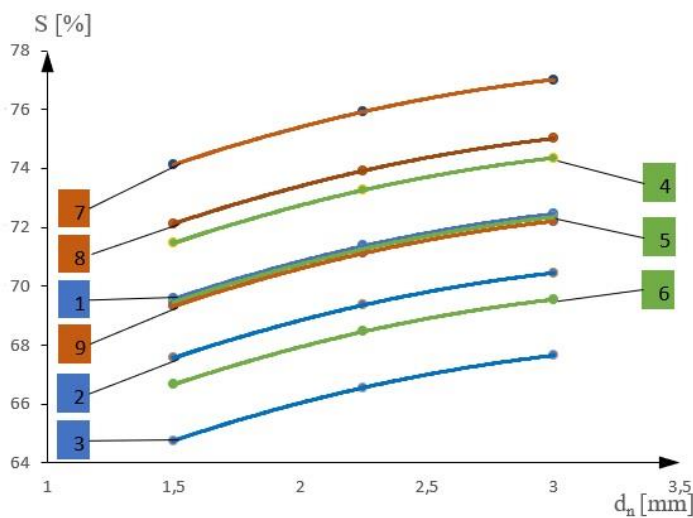
Rys. 26. Wpływ prędkości podawania materiału i liczby dysz powietrznych na kształtowanie wydajności maszyny

Skuteczność funkcjonowania maszyny opisuje funkcja wyrażona poniższym wzorem, w dalszej części również zostały zamieszczone przykładowe wykresy prezentujące kształtowanie tej zmiennej zależnej w zależności od wartości poszczególnych zmiennych niezależnych.

$$S = 0,7851 + 0,0475d_n - 0,051p - 1,78 \cdot 10^{-5}v_p^2 - 0,0063d_n^2 + 0,0038n_d^2 - 3,06 \cdot 10^{-5}h_d^2 + 0,0067p^2 \quad (16)$$



	d_n [mm]	v_p [szt./min]	h_d [mm]	n_d [szt.]
1	1,5	30	40	2
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60	40	2
8	2,25			
9	3			

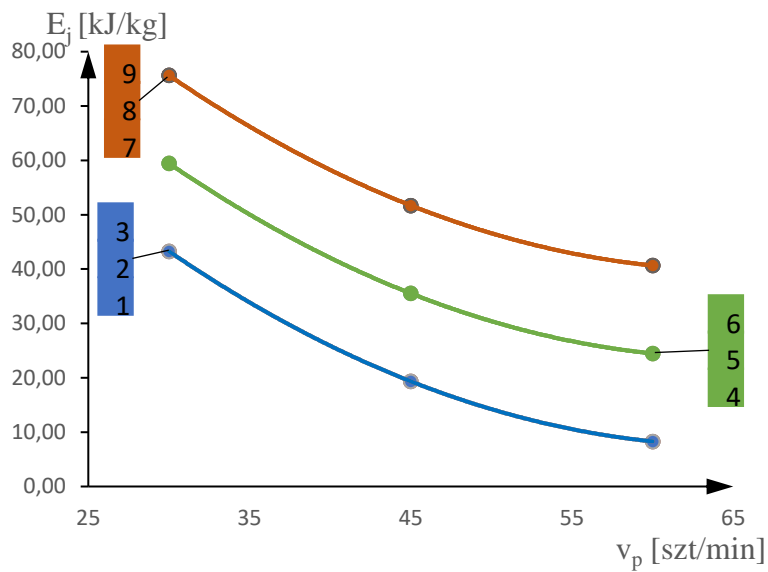


	v_p [szt./min]	n_d [szt.]	p [bar]	h_d [mm]		
1	30	2	4	40		
2	45					
3	60					
4	30	3			4	40
5	45					
6	60	4				
7	30					
8	45	4	4	40		
9	60					

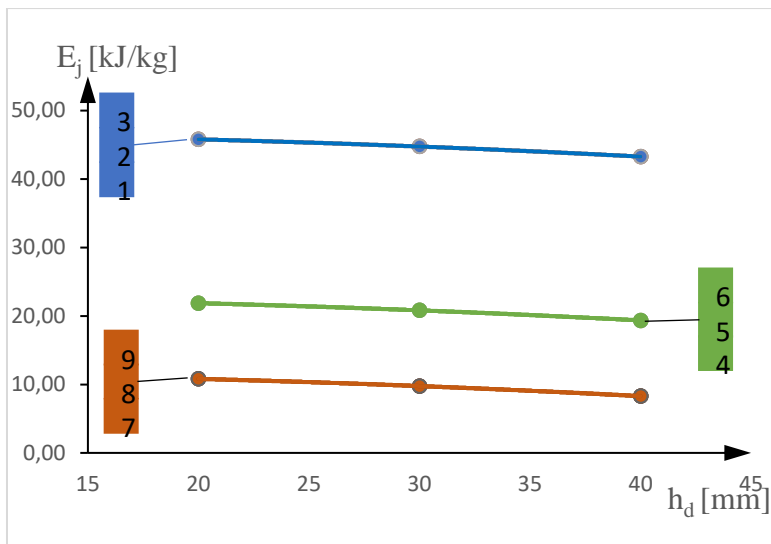
Rys. 27. Wpływ ciśnienia powietrza zasilającego układ usuwania łusek oraz głębokości nacięć łożysk na kształtowanie skuteczności funkcjonowania maszyny

Jednostkowe zużycie energii zostało opisane funkcją regresji o widocznej postaci, a przykładowe interpretacje graficzne opisujące tę wielkość wyglądają następująco:

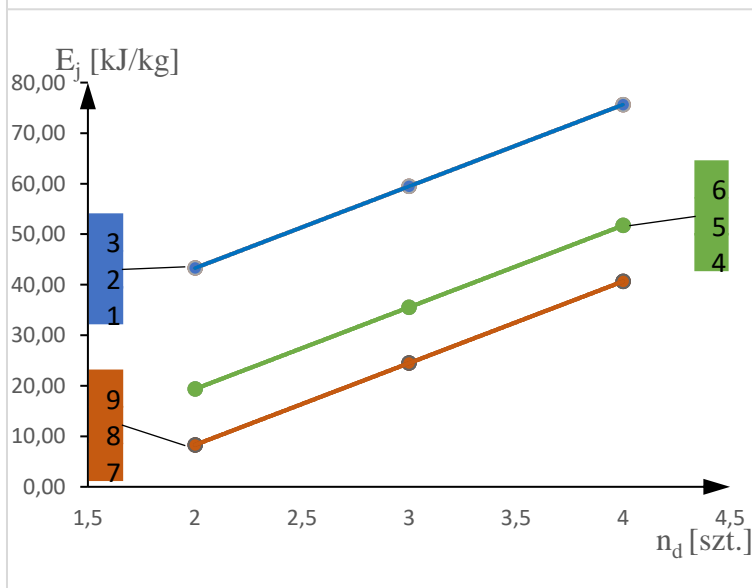
$$E_j = 69,8626 - 3,7402v_p + 16,1797n_d + 0,0286v_p^2 - 0,0021h_d^2 + 1,2353p^2 \quad (17)$$



	d_e [mm]	n_d [szt.]	h_d [mm]	p [bar]
1	1,5	2	40	5
2	2,25			
3	3			
4	1,5	3		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	4		
8	2,25			
9	3			



	d_e [mm]	v_p [szt./min]	p [bar]	n_d [szt.]
1	1,5	30	5	2
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60		
8	2,25			
9	3			



	d_e [mm]	v_p [szt./min]	p [bar]	h_d [mm]
1	1,5	30	5	40
2	2,25			
3	3			
4	1,5	45		
5	2,25			
6	3			
7	1,5	60		
8	2,25			
9	3			

Rys. 27. Wpływ prędkości podawania materiału oraz liczby dysz usuwających łuskę i ich odległości od materiału na kształtowanie jednostkowego zużycia energii

W celu oszacowania wpływu dodatkowych modułów roboczych stanowiska pomiarowego na kształtowanie charakterystyk użytkowych wykonano dodatkowe serie badań. Wyniki tych eksperymentów zostały odniesione do rezultatów badań otrzymanych przy tych samych zestawach zmiennych niezależnych prowadzonych z wyłączoną funkcją kontroli jakości i modułem poprawiającym. Zestawienie wyników badań prowadzonych w różnych konfiguracjach pracy stanowiska badawczego zawiera tabela 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów prowadzonych w różnych konfiguracjach pracy stanowiska badawczego. X_1 , W_1 , S_1 , E_{j1} – wielkości odpowiadające odpowiednio: X , W , S , E_j wyznaczone dla konfiguracji maszyny z włączoną funkcją wizualnej kontroli jakości i modułem poprawiającym

Lp.	v_p [szt./min]	d_n [mm]	n_d [szt.]	h_d [mm]	p [bar]	X	X_1	W [kg/min]	W_1 [kg/min]	S	S_1	E_j [kJ/kg]	E_{j1} [kJ/kg]
1	45	3	2	40	4	0,1894	0,2232	4,1736	3,9995	0,7030	0,9669	19,2049	23,4264
2	60	3	3	20	6	0,2399	0,2652	5,1528	4,9807	0,7566	0,9644	38,0326	42,2541
3	30	1,5	3	30	4	0,2287	0,2541	2,5497	2,4657	0,7462	0,9449	39,7852	41,4738
4	60	3	3	40	5	0,1883	0,2582	5,5545	2,3762	0,7021	0,9430	27,5011	32,5669
5	60	2,25	2	20	6	0,2140	0,2456	5,3885	5,1718	0,7303	0,9675	25,9062	30,9720
6	45	3	2	20	5	0,2347	0,2564	3,8148	3,7070	0,7512	0,9527	26,4843	29,4393
7	30	1,5	4	40	5	0,2195	0,2442	2,5925	2,5105	0,7367	0,9463	69,0028	71,1136
8	45	2,25	3	30	5	0,2286	0,2534	3,9120	3,7862	0,7438	0,9676	36,8312	40,2084
9	60	1,5	4	20	6	0,2238	0,2587	5,0851	3,7067	0,7409	0,9448	49,8089	53,6083
10	30	3	3	30	7	0,3333	0,3450	2,1653	2,1275	0,8396	0,9664	101,4683	102,3126
11	45	1,5	3	20	6	0,2398	0,2616	3,8080	3,6986	0,7552	0,9618	49,8909	52,8460
12	30	2,25	3	30	6	0,2795	0,2993	2,3425	2,2783	0,7926	0,9743	77,8537	79,5424
13	45	2,25	4	30	6	0,2669	0,2858	3,7607	3,6638	0,7805	0,9641	65,6394	68,1723
14	30	3	4	20	5	0,2930	0,3086	2,2584	2,2087	0,8061	0,9594	78,5865	79,8530
15	60	3	4	40	4	0,2290	0,2570	5,0483	3,7916	0,7460	0,9527	28,2274	32,0267
16	45	3	3	20	4	0,2407	0,2630	3,7107	3,6019	0,7575	0,9453	28,8061	31,3390
17	60	2,25	2	30	5	0,1839	0,2169	5,4601	5,2392	0,6966	0,9510	19,8565	25,3444
18	30	2,25	3	20	7	0,3391	0,3540	2,1372	2,0890	0,8443	0,9801	102,7491	103,5934
19	45	2,25	3	40	7	0,2570	0,2769	3,7346	3,6349	0,7734	0,9666	60,9555	63,4884
20	30	2,25	4	30	6	0,2932	0,3131	2,2366	2,1736	0,8049	0,9739	106,6241	107,8905

W celu udzielenia odpowiedzi na postawione pytanie badawcze, czy zastosowanie układu wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek w istotny sposób przyczyni się do podniesienia skuteczności funkcjonowania maszyny utworzono 20 par wyników obserwacji $(S_1, S_{1,1})$, $(S_2, S_{1,2})$... $(S_{20}, S_{1,20})$ wzajemnie niezależnych, przy czym zależnych w parach. Założono, że zmienne losowe postaci:

$$D_i = S_i - S_{1,i} \quad (18)$$

tworzą próbę niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym $N(\mu_D, \sigma_D^2)$.

Sformułowano hipotezę zerową:

$$H_0: \mu_D = 0 \quad (19)$$

twierdzącą, że zastosowanie funkcji wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek nie ma wpływu na wzrost skuteczności funkcjonowania maszyny. W przeciwieństwie do H_0 postawiono hipotezę alternatywną:

$$H_1: \mu_D < 0 \quad (20)$$

twierdzącą, że zastosowanie wspomnianych układów w istotny sposób przyczyni się do podniesienia skuteczności funkcjonowania maszyny.

Celem weryfikacji postawionych hipotez zbudowano statystykę:

$$T = \frac{\bar{D}}{S_D} \sqrt{n} \quad (21)$$

gdzie:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S_{1,i}) \quad (22)$$

oraz:

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((S_i - S_{1,i}) - \bar{D})^2} \quad (23)$$

Utworzono wektor różnic postaci: $D = (-0,26, -0,21, -0,20, -0,24, -0,24, -0,20, -0,21, -0,22, -0,20, -0,13, -0,21, -0,18, -0,18, -0,15, -0,21, -0,19, -0,25, -0,14, -0,19, -0,17)$.

Statystyka testowa obliczona według wzorów przyjęła wartość :

$$T = \frac{\bar{D}}{S_D} \sqrt{n} = \frac{-0,2}{0,0358} \sqrt{20} = -24,98 \quad (24)$$

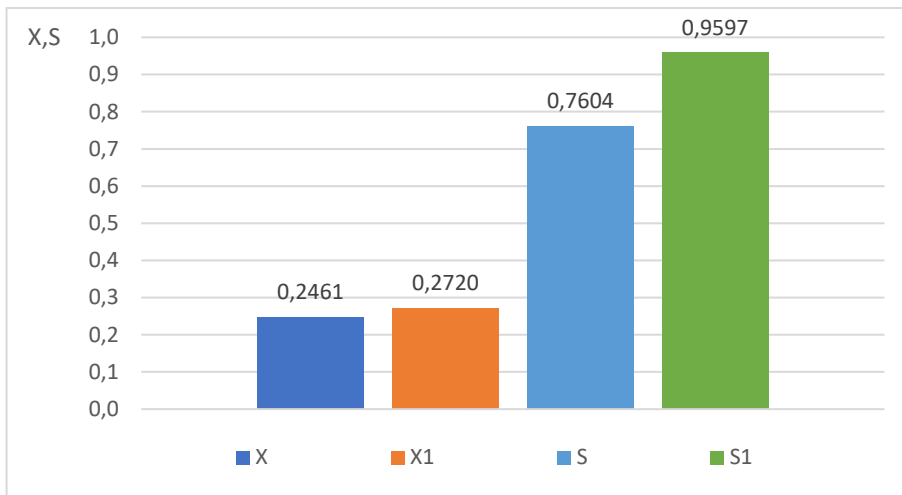
Zakładając poziom istotności $\alpha=0,05$ i porównując uzyskaną wartość statystyki T wartością krytyczną odczytaną z tablic T-Studenta $t_{kr} = t_{0,05(19)} = 1,73$ stwierdzono iż zachodzi zależność:

$$T \in (-\infty, -1,73) \quad (25)$$

W związku z czym istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy H_0 i przyjęcia hipotezy alternatywnej twierdzącej, że zastosowanie wizualnej kontroli jakości i dodatkowego układu usuwania łusek w istotny sposób przyczyni się do zwiększenia skuteczności funkcjonowania maszyny do obierania cebuli.

Wpływ zastosowania dodatkowych układów roboczych nowatorskiej maszyny do obierania cebuli na kształtowanie jej charakterystyk użytkowych został zilustrowany graficznie na wykresach (rys. 28 – 30).

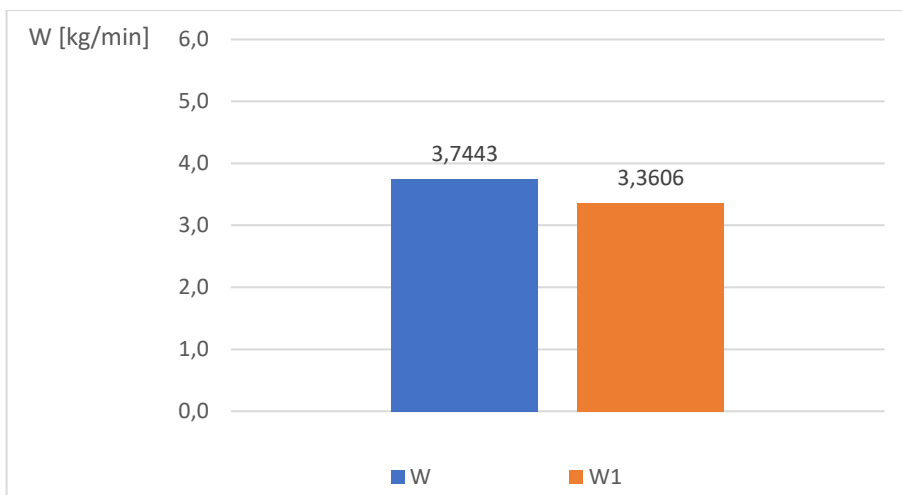
W przypadku 20 losowo wybranych kombinacji zmiennych niezależnych, po zmianie konfiguracji maszyny (włączeniu funkcji kontroli jakości oraz dodatkowego modułu poprawkowego) skuteczność funkcjonowania maszyny wzrosła średnio o 26,21%. Wzrost skuteczności naturalnie wiązał się ze zwiększeniem ilości generowanego odpadu, który wyniósł 10,52% (rys. 28).



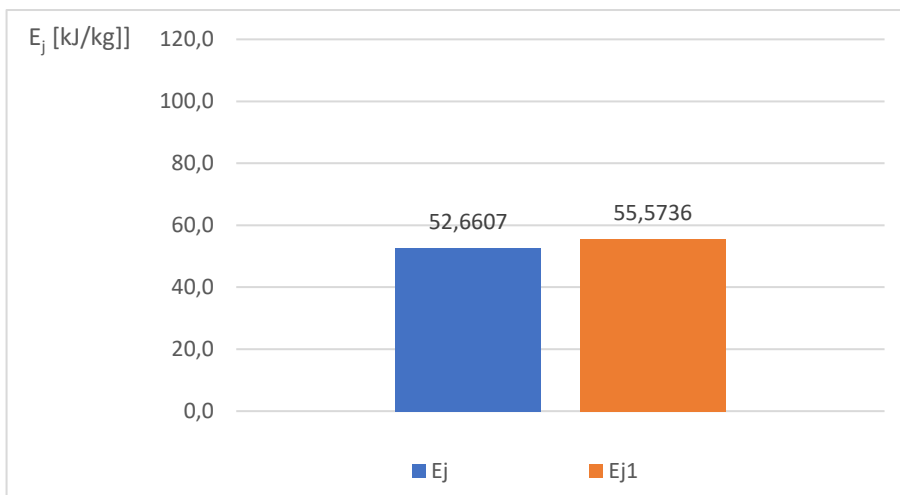
Rys. 28. Wpływ zastosowania wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek na kształtowanie wielkości generowanych strat ilościowych i skuteczności funkcjonowania maszyny

Rys. 29 przedstawia różnice w kształtowaniu wydajności maszyny w zależności od konfiguracji. Średni spadek wydajności o 10,25% był spowodowany wzrostem skuteczności funkcjonowania, a co za tym idzie zwiększeniem ilości generowanych strat ilościowych.

W trakcie 20 przeprowadzonych eksperymentów, maszyna z włączonym dodatkowym modułem usuwającym łuskę generowała jednostkowe zużycie energii na realizację procesu obierania i obcinania końcówek większe o 5,53% niż w przypadku funkcjonowania bez tego modułu (rys. 30).



Rys. 29. Wpływ zastosowania wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek na kształtowanie wydajności maszyny



Rys. 30. Wpływ zastosowania wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwania łusek na kształtowanie jednostkowego zużycia energii

11. Wnioski

Zbudowane równania funkcji regresji pozwoliły na wyłonienie układów zmiennych niezależnych, dla których zmienne zależne przyjmują wartości ekstremalne. Układ tych zmiennych zawiera prezentowana tabela 2.

Tabela 2. Układy zmiennych niezależnych dla najmniejszych i największych wartości zmiennych zależnych

Zmienna zależna		Zmienne niezależne				
Nazwa	Wartość	v_p [szt./min]	d_n [mm]	n_d [szt.]	h_d [mm]	p [bar]
Straty ilościowe X	min	60	1,5	2	40	4
	max	30	3	4	20	7
Wydajność W	min	30	3	4	20	7
	max	60	1,5	2	40	4
Skuteczność funkcjonowania S	min	60	1,5	2	40	4
	max	30	3	4	20	7
Jednostkowe zużycie energii E_j	min	60	-	2	40	4
	max	30	-	4	20	7

Na podstawie danych uzyskanych w trakcie opracowania wyników badań doświadczalnych prowadzonych w celu udzielenia odpowiedzi na sformułowane pytania badawcze sformułowano następujące wnioski:

1. Straty ilościowe X generowane przez maszynę do obierania cebuli, będącą obiektem badań rosną wraz ze wzrostem głębokości nacięć zewnętrznych łusek d_n , liczby dysz powietrznych usuwających łuskę d_n oraz ciśnienia powietrza zasilającego układ usuwania łusek p . Zmniejszenie strat ilościowych powodowane jest zwiększeniem prędkości podawania materiału v_p oraz odległości dysz powietrznych od obieranej cebuli h_d .

2. Wzrost wydajności maszyny W powodowany jest zwiększeniem wartości prędkości podawania materiału v_p oraz odległości dysz usuwających łuskę od materiału h_d . Wzrost wartości

pozostałych zmiennych niezależnych (głębokości nacięć łusek d_n , liczby dysz powietrznych d_n oraz ciśnienia powietrza p) powoduje zmniejszenie wydajności maszyny W .

3. Skuteczność funkcjonowania maszyny S do obierania cebuli zwiększa się wraz ze wzrostem głębokości nacięć zewnętrznych łusek d_n , liczby dysz zdmuchujących łuskę n_d oraz ciśnienia powietrza zasilającego maszynę p . Zwiększenie prędkości podawania materiału v_p oraz odległości dysz powietrznych od obieranej cebuli h_d wywołuje spadek skuteczności funkcjonowania maszyny S .

4. Jednostkowe zużycie energii E_j na realizację procesu obierania cebuli wzrasta wraz z zwiększeniem liczby dysz powietrznych n_d i ciśnienia powietrza zasilającego zespół usuwania łusek p . Wzrost prędkości podawania materiału v_p oraz odległości dysz powietrznych od materiału h_d powoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii.

5. Na podstawie otrzymanych równań funkcji regresji można stwierdzić, że na kształtowanie wielkości strat ilościowych X , wydajności W oraz skuteczności funkcjonowania maszyny S wpływ wywierają wszystkie zmienne niezależne rozpatrywane w programie prowadzenia badań. W przypadku jednostkowego zużycia energii, zmienna niezależna d_n – głębokość nacięć zewnętrznych łusek cebuli nie wywiera wpływu na kształtowanie zmiennej zależnej E_j .

6. Zastosowanie układu wizualnej kontroli jakości oraz dodatkowego układu usuwającego pozostałości zaschniętej łuski w istotny sposób przyczynia się do zwiększenia skuteczności funkcjonowania maszyny S , powodując niewielki wzrost ilości generowanych strat ilościowych X (jest to efektem istoty procesu obierania cebuli) skutkujący nieznacznym zmniejszeniem wydajności maszyny W . Zastosowanie wymienionych dodatkowych zespołów roboczych powoduje stosunkowo mały wzrost jednostkowej energii zużywanej na realizację procesu obierania cebuli E_j .

7. Zastosowanie autorskiej, innowacyjnej w skali światowej konstrukcji maszyny do obierania cebuli o budowie modułowej pozwoliło uzyskać bardzo wysoki, niewystępujący w przypadku maszyn produkowanych seryjnie, oferowanych na rynku stosunek skuteczności funkcjonowania S do wydajności maszyny W . W świetle otrzymanych wyników badań uzasadnione jest prowadzenie prac konstrukcyjnych w kierunku zastosowania dwuetapowego zabiegu usuwania łuski. W zaproponowanej przez autora pracy konstrukcji zabieg ten polega na wstępnym usunięciu naciętych warstw łusek w zespole usuwania łuski połączonym z następującym po nim procesem selekcji cebul zawierających pozostałości zaschniętej łuski. Cebule te kierowane są do oddzielnego modułu, gdzie ze względu na mniejszą ilość cebul poddawanych obróbce istnieje możliwość ekspozycji poszczególnych cebul na działanie sprężonego powietrza przez zwielokrotniony okres czasu bez powodowania zmniejszenia wydajności maszyny. Zakładając prędkość podawania materiału $60 \frac{szt.}{min}$, czas obróbki powietrzem pojedynczej cebuli w module usuwania łuski wynosi 1s. W przypadku zaistnienia okoliczności utrudniających zdmuchnięcie łuski przez strumień sprężonego powietrza (np. niezamierzona zmiana pozycji cebuli w zabieraku podczas obróbki w strefie obcinania końcówek i nacinania łuski czy wystąpienie zmian chorobowych w miejscu nacięcia łuski) może wystąpić pewien procent cebul wymagających zabiegów poprawkowych. Przy założeniu, że 20% cebul wymaga skierowania do dalszej obróbki, czas działania sprężonego powietrza na pojedynczą cebulę w module poprawkowym może być zwielokrotniony pięciokrotnie, co zdecydowanie podnosi prawdopodobieństwo poprawnego obrania cebuli, a więc zwiększa skuteczność funkcjonowania S przy jednoczesnym zachowaniu wydajności maszyny W . Można zatem wysunąć wniosek, że układ usuwania łuski kształtuje wysoką wydajność maszyny W , podczas gdy zastosowanie układu wizualnej kontroli jakości i dodatkowego modułu usuwania łusek wpływa na znaczne podniesienie skuteczności jej funkcjonowania S . Badania doświadczalne wykazały także jednoznacznie, że skrócenie czasu obróbki cebuli powietrzem w układzie usuwania łusek przyczynia się znacznie do zmniejszenia ilości generowanych strat ilościowych (spowodowane jest to uniknięciem zrywania przez sprężone powietrze dodatkowych warstw łusek z cebul poprawnie obranych). Takie rozwiązanie konstrukcyjne jest unikatowe na tle innych konstrukcji, w których zwiększenie skuteczności funkcjonowania osiąga się kosztem zmniejszenia wydajności maszyny i zwiększenia ilości generowanych strat ilościowych.

8. Na podstawie wyników badań uzasadniających wpływ zastosowania układu wizualnej kontroli jakości na zwiększenie skuteczności funkcjonowania maszyny S można rekomendować

zastosowanie optycznych czujników koloru w celu detekcji cebul wymagających skierowania do dalszych zabiegów usuwania łuski. Wyniki badań wstępnych wykazały wysoką skuteczność tego typu detektorów w przypadku obierania białych odmian cebuli. W przypadku obierania odmian czerwonych skuteczność czujników optycznych była mniejsza więc należy zwrócić uwagę na potrzebę dalszych prac naukowych i konstrukcyjnych nad sposobem detekcji cebul odmian czerwonych wymagających dodatkowej obróbki.

9. Rozpatrując wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na kształtowanie wielkości generowanych strat ilościowych X oraz skuteczności funkcjonowania maszyny S należy zauważyć, że takie same układy zmiennych niezależnych powodują osiąganie przeciwnych ekstremów przez wymienione zmienne zależne. Zachowanie takie należy wyjaśnić istotą procesu obierania polegającą na usuwaniu części masy przetwarzanej cebuli. Zwiększenie skuteczności obierania powoduje naturalny przyrost masy odpadu, co w konsekwencji prowadzi także do zmniejszenia wydajności procesu. W takiej sytuacji nie ma możliwości jednoznacznego wskazania układu zmiennych niezależnych zapewniających jednoczesną minimalizację strat ilościowych X i kształtowanie maksymalnej skuteczności funkcjonowania maszyny S . Przeprowadzone badania wstępne posłużyły do wyłonienia zakresu wartości zmiennych niezależnych zapewniających osiągnięcie zadowalających wartości skuteczności funkcjonowania S . Wybór konkretnych wartości tych zmiennych uzależniony jest od wymagań stawianych procesowi obierania oraz aktualnych warunków ekonomicznych (dostępność i koszt zatrudnienia pracowników, stosunek ceny cebuli obranej do ceny cebuli w łusce, kosztów wytworzenia sprężonego powietrza) i polega na takim doborze zestawu zmiennych niezależnych aby w świetle stawianych wymagań osiągnąć zadowalający stosunek uzyskanej wydajności W , skuteczności funkcjonowania S oraz wielkości generowanych strat ilościowych X .

10. Wyniki uzyskane w trakcie prowadzenia badań wstępnych uzasadniają celowość zastosowania tarczowych, napędzanych noży obcinających końcówki cebuli. Czynniki przemawiającymi za zastosowaniem takiego rozwiązania konstrukcyjnego są brak konieczności częstego ostrzenia noży oraz lepsza jakość powierzchni i krawędzi cięcia cebuli. Wadą takiego rozwiązania, w stosunku do stałych noży nienapędzanych jest generowanie większej ilości zanieczyszczeń w strefie obcinania końcówek, co stwarza konieczność częstszego mycia maszyny przy użyciu wody o wysokim ciśnieniu. Sytuacja ta wymaga zapewnienia wysokiej hermetyczności wszystkich mechanizmów na etapie projektowania i wytwarzania maszyny. W efekcie znikomej ilości prac naukowych dotyczących badań procesu cięcia cebuli w warunkach przemysłowych zasadne wydaje się prowadzenie dalszych prac badawczych zmierzających do ściślejszego wyjaśnienia wpływu kształtu narzędzia, parametrów procesu raz technologii cięcia na energochłonność procesu cięcia cebuli.

11. Postacie konstrukcyjne dysz usuwających łuskę zastosowanych w skonstruowanej na potrzeby pracy maszynie do obierania cebuli zostały wyłonione na podstawie wyników badań wstępnych spośród kilkunastu modeli dysz dostępnych na rynku. Wobec całkowitego braku badań naukowych dotyczących usuwania łuski cebuli za pomocą sprężonego powietrza należy zaznaczyć potrzebę badań skierowanych w tym kierunku. Efekty tych badań mogłyby prowadzić do określenia optymalnych cech konstrukcyjnych dyszy o takim zastosowaniu zapewniających minimalizację jednostkowego zużycia energii na realizację procesu obierania cebuli.

12. Porównując jednostkowe zużycie energii na realizację zabiegu obcinania końcówek E_{jc} oraz realizację zabiegu zdmuchiwanie łuski E_{jz} należy zauważyć, że dla badanych przypadków średnia wartość jednostkowego zużycia energii w procesie cięcia E_{jc} stanowi 10,8228% średniej wartości jednostkowego zużycia energii używanej w zabiegu usuwania łuski E_{jz} . Powyższe stwierdzenie prowadzi do wniosku, że dążąc do minimalizacji energochłonności procesu obierania cebuli zasadne wydaje się prowadzenie dalszych prac badawczych skierowanych szczególnie na analizę procesów zdmuchiwanie łuski strumieniem sprężonego powietrza lub szukanie innych sposobów usuwania łuski (np. strumień wody z dodatkiem środków zapobiegających rozwojowi drobnoustrojów).

13. W trakcie prowadzenia badań stwierdzono bardzo silną korelację pomiędzy zmianami wartości czynników stałych takich jak temperatura otoczenia (szczególnie w zakresie poniżej 4°C), wilgotność oraz warunki i długość okresu przechowywania cebuli a wartościami skuteczności

funkcjonowania maszyny S. Wobec powyższych spostrzeżeń celowe wydaje się prowadzenie dalszych prac naukowych zmierzających do wyznaczenia wpływu wymienionych czynników stałych na kształtowanie charakterystyk użytkowych maszyn do obierania cebuli.