

Systemy wizyjne automatu do przedsewnego przygotowania żołądzi

Streszczenie. W przypadku żołądzi przeznaczonych do siewu w szkółkach leśnych powszechnie stosuje się skaryfikację mechaniczną, polegającą na odcięciu od strony znamienia ich końców. Ten pracochłonny zabieg przyspiesza kiełkowanie nasion oraz wyrównuje wschody. Wartością dodaną skaryfikacji jest możliwość wzrokowej oceny zmian mumifikacyjnych żołądzi i odrzucenia nasion nekrotycznych. Autorzy podjęli się opracowania urządzenia do automatyzacji ww. procesów, który został wyposażony w dwa niezależne systemy rozpoznawania i analizy obrazów.

Abstract. In the case of acorns intended for sowing in forest nurseries, mechanical scarification is commonly used, consisting in cutting off their ends. This laborious treatment accelerates seed germination and even out the size of the seedlings. The added value of scarification is the ability to visually assess the mummification changes of acorns and the rejection of necrotic seeds. The authors undertook to develop a device for the automation of the above-mentioned processes, which has been equipped with two independent image recognition and analysis systems. (Machine vision systems for pre-sowing preparation of acorns)

Słowa kluczowe: żołądzie, skaryfikacja, analiza obrazu, automatyzacja
Keywords: acorns, scarification, image analysis, automation

Wprowadzenie

Skaryfikacja polega na uszkodzeniu bądź też osłabieniu okrywy nasiennej, których celem jest zainicjowanie kiełkowania nasion, dzięki ułatwieniu dostępu do nich wody i powietrza. W warunkach leśnych proces skaryfikacji opadłych na glebę nasion przebiega w wyniku zmian temperatury i wilgotności oraz oddziaływania mikroorganizmów glebowych [1]. W przypadku hodowli sadzonek w szkółce leśnej, celem dalszego wykorzystania do sztucznego odnowienia lasu, można prowadzić skaryfikację metodą mechaniczną, uszkadzającą okrywy nasienne poprzez ich ścieranie, zgniatanie lub przecinanie [2]. W odniesieniu do żołądzi ta ostatnia metoda jest stosowana gospodarczo. Polega ona na odcięciu od strony znamienia ok. 20-30% długości żołądzia [3]. Z uwagi na wysoką pracochłonność zabiegu jest on stosowany zwłaszcza w szkółkach kontenerowych o intensywnym modelu hodowli materiału sadzeniowego. W tym przypadku dąży się do sytuacji, aby w każdej komórce kasety był wysiany jeden żołądz, który poddany wcześniejszym zabiegom sortowania będzie źródłem sadzonki o optymalnych parametrach biometrycznych. Przy sortowaniu nasion wykorzystuje się zależność stanu zdrowotnościowego nasion od ich cech rozdzielczych, które są własnościami fizycznymi [4, 5]. Sortowanie nasion podwyższa ogólne koszty hodowli szkółkarskiej, jednak skutkiem wyeliminowania tego zabiegu byłby większy udział sadzonek małych, niespełniających norm branżowych [6]. Zatem gospodarcze i hodowlane korzyści, wynikające ze skaryfikacji żołądzi, to: przyspieszenie wschodów, zwykle o ok. 2 tygodnie, wyrównanie terminu kiełkowania, co skutkuje uzyskaniem jednorodnego materiału sadzeniowego, możliwość oddzielenia nasion zepsutych i nadpsutych, czy też uszkodzonych mechanicznie [7, 8].

Aktualnie w Polsce wysiewa się w szkółkach kontenerowych ok. 6 mln sztuk żołądzi rocznie, jednak liczba skaryfikowanych nasion musi być większa, niekiedy o 30-50% z uwagi na występowanie znacznej ilości nasion nie przydatnych do siewu – uszkodzonych przez owady, gryzonie lub grzyby [9]. Dotychczas skaryfikację niemal w całości wykonuje się ręcznie przy użyciu sekatora. Jest to żmudny i monotony proces, który wymaga zaangażowania od kilku do kilkunastu osób w każdej szkółce, produkującej sadzonki dębowe z bryłką. Zakładając, że czas trwania

cyklu pracy wynosi 2,5 sekundy można określić, że skaryfikacja 1 miliona nasion wymaga ponad 700 godzin pracy (90 dni po 8 godzin dziennie).

Ergonomiczna uciążliwość pracy wynika z powtarzalnego ruchu rąk w następującym cyklu: pobranie z pojemnika jednego lub też kilku żołądzi do dłoni, ustawienie właściwej orientacji i uchwycenie żołądzia w palce, odcięcie fragmentu nasiona, wzrokowa ocena stanu zdrowotnego nasiona na podstawie topografii zmian nekrotycznych oraz jakości wypełnienia okrywy przez liście, wrzucenie nasiona do właściwego pojemnika. Nawet posługiwanie się nowoczesnym sekatorem powoduje zmęczenie układu nerwowo-mięśniowego dłoni i rąk ze względu na ciągłe powtarzanie tych samych czynności [7].

Zasada działania skaryfikatora

Rosnący deficyt robotników skłonnych do wykonywania pracy przy przedsewniej obróbce nasion zachęcił autorów do podjęcia prac nad urządzeniem automatyzującym proces skaryfikacji i sortowania żołądzi. W pełni funkcjonalny model takiego automatu pokazano na rycinie 1. Z kolei na rycinach 2-4 zamieszczono schematy wzajemnego usytuowania kluczowych podzespołów skaryfikatora z uwzględnieniem dwóch niezależnych systemów wizyjnych. W przykładzie wykonania automat jest integralnym systemem mechatronicznym, wykorzystującym do napędów oraz sterowania układy elektromechaniczne oraz elektropneumatyczne.



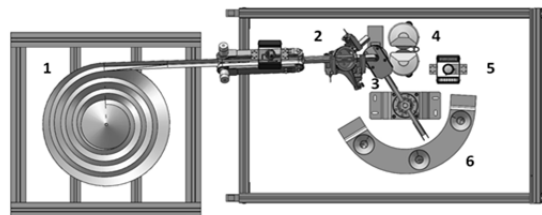
Ryc. 1. Funkcjonalny model skaryfikatora

Automat zbudowany jest ze zbiornika na żołądzie z podajnikiem wibracyjnym, którego działanie zapewnia transportowanie nasion po spiralnej rynnie do miejsca, w którym są pojedynczo upuszczone na przenośnik dwutaśmowy. Nad przenośnikiem umieszczono kamerę, która rejestruje obraz przemieszczającego się żołądzia. Wyszczególniony, komputerowy system wizyjny identyfikuje ich ułożenie oraz dokonuje pomiaru długości. Informacja ta jest później wykorzystywana do określenia miejsca przecięcia żołądzia, aby zapewnić powtarzalne parametry skaryfikacji, niezależnie od dorodności nasion. W sytuacji, gdy żołądz jest transportowany w nieprawidłowym położeniu rotator obraca go o 180°. Następnie następuje jego pochwylenie przez chwytak trójpalcowy napędzany elektromagnetycznie. Miejsce uchwycenia zależy od podparcia żołądzia na krzywce pozycjonera, która podnosi lub opuszcza go w taki sposób, aby miejsce, w którym powinien zostać przecięty, znajdowało się zawsze na właściwej wysokości, niezależnie od różnic w ich długości. Właściwa skaryfikacja jest realizowana przez wirujące przeciwbieżne noże tarczowe. Obcięty żołądz jest poddawany ocenie zdrowotności przy wykorzystaniu kolejnego systemu wizyjnego a następnie poddany procesowi sortowania na trzy kategorie: nasiona zdrowe, przeznaczone do siewu w kontenerach, zepsute do odrzucenia oraz nadpsute, przeznaczone zazwyczaj do siewu w szkółce gruntowej o mniejszej intensywności produkcji. Sortowanie odbywa się w taki sposób, że chwytak upuszcza dane żołądzie nad odpowiednimi kolektorami połączonymi z zasobnikami.

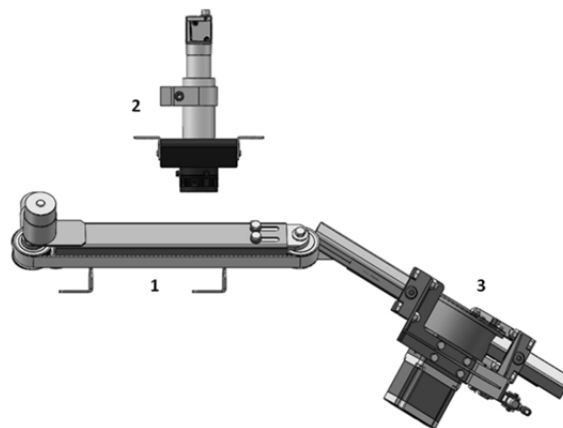
Praca automatu ma charakter cykliczny. Centralnym zespołem jest obrotnica (karuzela), na której ramieniu jest zamontowany chwytak. Zespołami automatu steruje przemysłowy sterownik typu PAC (ang. Programmable Automation Controller), umożliwiający realizację zadań z zakresu pomiarów, rejestracji i sterowania [10]. Konfiguracja sterownika obejmuje moduły: wejść/wyjść analogowych, przetwarzania A/C, wejść/wyjść cyfrowych, komunikacji i przetwarzania sygnałów, mocy (wyjścia PWM) oraz zasilania. Układ sterowania automatem ma kilka pętli sprzężenia zwrotnego najniższego poziomu. Modułowa architektura sterownika sprawia, że zadania są przypisane do poszczególnych modułów. Sterowanie jest realizowane w czasie rzeczywistym i jest gwarantowane przez zegary sprzętowe generujące stosowne przerwy do obsługi zdarzeń. Pierwszy obwód zamyka się w obrębie: karta mocy sterownika, silnik krokowy orientatora, enkoder, karta wejściowa sterownika, algorytm regulatora. Praca tego podsystemu jest wyzwalana sygnałem detektora długości i orientacji oraz barierą optyczną. Osiągnięcie wartości zadanej wyzwała pneumatyczne elementy wykonawcze, działające w otwartej pętli. Podsystem sterowania pozycjonerem w trakcie normalnej pracy funkcjonuje w otwartej pętli. Pętla sprzężenia zwrotnego jest jednak zamykana przez czujnik optyczny podczas inicjalizacji, celem ustalenia początkowego położenia krzywki pozycjonera. Trzeci układ regulacji, obejmujący sterownik, karty wejścia/wyjścia, silnik krokowy obrotnicy oraz jego enkoder odpowiada za ustalenie pozycji chwytaka na etapach: pozycjonowanie, predykcja zdrowotności oraz sortowanie.

Komunikację z systemem sterowania zapewnia interfejs, który umożliwia realizację następujących funkcji: wprowadzanie danych charakteryzujących partię nasion (np. miejsce pochodzenia), sprawdzanie gotowości do pracy (poszczególnych zespołów roboczych oraz całego automatu), uruchamianie procedur wykonawczych elementów roboczych, sygnalizowanie poprawności lub błędów w działaniu, przechowywanie danych o

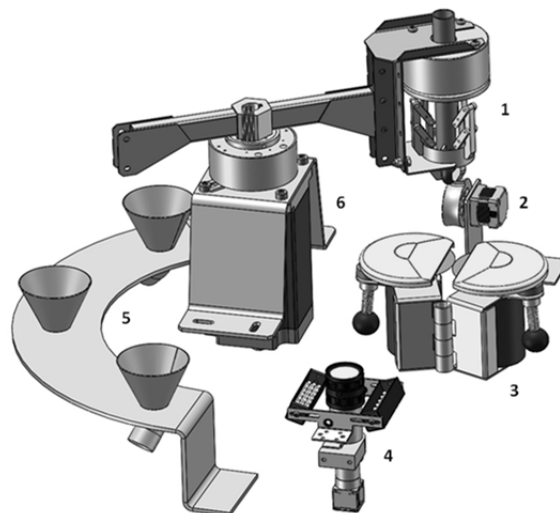
skaryfikowanej partii nasion (np. liczba żołądzi zakwalifikowanych do poszczególnych partii).



Ryc. 2. Model 3D kluczowych zespołów automatu w widoku z góry: 1 – zespół dozujący nasiona, 2 – zespół detekcji długości i orientacji, 3 – zespół pochwytyjący, 4 – zespół skaryfikacji, 5 – zespół detekcji zmian nekrotycznych, 6 – zespół sortera



Ryc. 3. Model 3D zespołu detekcji długości i orientacji żołądzi w widoku z boku: 1 – zespół transporterów taśmowych, 2 – kamera przemysłowa, 3 – rotator

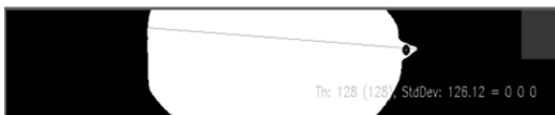


Ryc. 4. Model 3D zespołów skaryfikacji, detekcji zmian nekrotycznych i sortowania w widoku z boku: 1 – chwytak, 2 – pozycjoner ślimakowy, 3 – noże tarczowe, 4 – kamera przemysłowa z oświetlaczem, 5 – kolektory sortownika, 6 – suport z karuzelą

Funkcjonalność systemów wizyjnych

Pierwszy system wizyjny służy do detekcji orientacji przestrzennej każdego z żołądzi oraz pomiaru jego długości. Z uwagi na fakt, że żołądzie zazwyczaj są zaprawione środkiem grzybobójczym o jaskrawo fioletowym kolorze, który charakteryzuje się wysoką adhezją, zarówno w stosunku do okrywy żołądzi, jak i taśm

podajników transportujących, skutkuje to zredukowaniem kontrastu, a tym samym błędnym działaniem algorytmu oceny kształtu żołądki oraz wadliwą oceną ich orientacji i długości. Dlatego też zdecydowano się na pozyskiwanie obrazów żołądki z oświetleniem metodą „back light”. Przy przemieszczaniu żołądki zespołem przenośników taśmowych są one podświetlane od dołu, co powoduje, że za pomocą kamery są rejestrowane obrazy w formie wysoko kontrastowych obiektów, a sam przenośnik oraz jego otoczenie nie przeszkadzają w analizie obrazu. Do wyznaczenia orientacji żołądki wybrano algorytm przy pomocy detektora Harrisa [11]. Charakteryzuje się on wieloma zaletami, a w szczególności odnotowuje się najmniejszą liczbę błędów w porównaniu z rozważanymi metodami. Jego użycie wiąże się jednak z wieloma decyzjami neutralnymi typu „orientacja nieustalona”. W takich przypadkach rotator może całkowicie odrzucić żołądki i skierować go do oddzielnego zasobnika, jako nienadającego się do automatycznej skaryfikacji. W przypadku określenia orientacji jest wysyłany odpowiedni impuls do rotatora. Jednocześnie jest dokonywany pomiar długości żołądki. W omawianym systemie pomiar ten jest wykonywany w możliwie najprostszy sposób. Na obrazie konturu żołądki określa się punkt maksymalnie oddalony od punktu ustalonego jako lokalizacja zarodka, a następnie zlicza się liczbę pikseli w cięciwie, łączącej zarodek i ten najbardziej oddalony od niego punkt (ryc. 5). Na podstawie tej informacji jest obliczany kąt obrotu krzywki zainstalowanej pod chwytakiem.



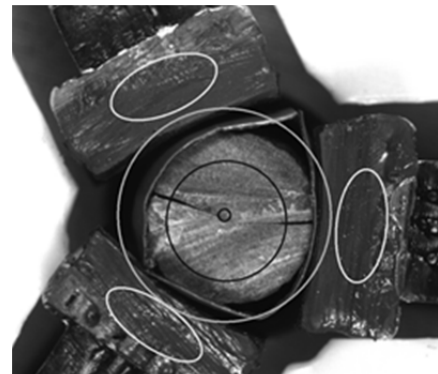
Ryc. 5. Obraz żołądki poddany komputerowej analizie celem detekcji długości i orientacji

Drugi system wizyjny zastosowano do sterowania sortowaniem nasion na podstawie rozpoznania zmian mumifikacyjnych przekrojów żołądki. W rozpatrywanym przypadku nie można zastosować klasycznych metod opartych na analizie kształtu obiektów widocznych na przetwarzanym komputerowo obrazie, ponieważ kształty zmian mumifikacyjnych są nieprzewidywalne i jako takie nie są diagnostycznie istotne. Nie można także odwołać się do tekstury powierzchni, ponieważ na obrazach przekrojów żołądki skaryfikowanych w warunkach roboczych żadnych charakterystycznych i powtarzalnych tekstur nie daje się zidentyfikować.

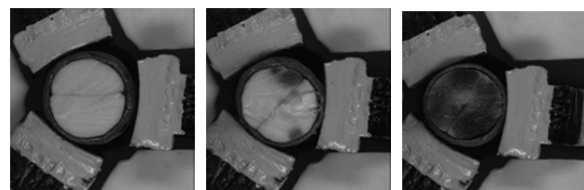
Do budowy wizyjnego detektora zdrowotności żołądki wykorzystano cyfrową kolorową kamerę z matrycowym czujnikiem CMOS o rozdzielczości 1000×2000 pikseli, pozwalającą na łatwą integrację z komputerem przemysłowym. Proces komputerowej analizy obrazów przekrojów skaryfikowanych żołądki jest wieloetapowy i uwzględnia uwarunkowania pracy urządzenia w trybie automatycznym. Algorytm oceny zmian mumifikacyjnych żołądki działa w trybie ciągłym, monitorując pojawienie się chwytaka nad roboczym polem widzenia kamery. Jest określana intensywność obrazu, a przekroczenie wartości progowej oznacza, że ramię obrotnicy znajduje się we właściwym miejscu. Taki prosty sposób wykrywania obecności chwytaka jest możliwy dzięki zamontowaniu jasnej maskownicy, zamocowanej na jego czole. Pozostałe elementy modelu, które znajdują się w większej odległości od kamery nie są w stanie odbić takiej ilości światła, która determinowałaby wykrycie obecności chwytaka. W

kolejnym etapie jest określane położenie oznaczonych końcówek chwytaka. Obszar między nimi traktowany jest jako miejsce obecności przekroju nasiona (ryc. 6).

Kluczową funkcją systemu komputerowej analizy obrazu jest sortowanie nasion pod względem zdrowotności (ryc. 7). Aby zapewnić możliwie trafną klasyfikację przyjęto dwa postępowania. Pierwsze z nich zakłada wzorowanie się na pracy specjalistów, ręcznie klasyfikujących żołądki i wzrokowo oceniających ich stan zdrowotnościowy. Taką metodę można nazwać podejściem a priori, gdyż nie zna się jeszcze efektu, jaki będzie osiągnięty po zakończeniu okresu wegetacji – czy wszystkie nasiona rozpoznane jako zdrowe takimi się okażą w rzeczywistości (wykiełkują i dadzą dobre jakościowo sadzonki). Drugie podejście, a posteriori, zakłada trenowanie klasyfikatora komputerowego bazując na wynikach eksperymentu polowego, w którym wszystkie żołądki o zarejestrowanych przekrojach wysiano, monitorowano ich kiełkowanie i na tej podstawie oceniono ich rzeczywistą zdrowotność. W trakcie prac badawczych założono, że algorytmy klasyfikacji będą oparte na zasadzie uczenia maszynowego. Realizując to założenie, zbudowano i wytrenowano szereg klasyfikatorów do szacowania zdrowotności żołądki na podstawie różnych cech pozyskanych ze zgromadzonych obrazów przekrojów i danych referencyjnych z eksperymentów polowych.



Ryc. 6. Widok przekroju żołądki w chwytaku z obszarami wyznaczonymi metodą widzenia komputerowego: elipsy – znaczniki chwytaka, duży okrąg – znacznik opisujący przekrój nasiona wraz z okrywą nasienną, mały okrąg – znacznik sygnalizujący właściwe pozycjonowanie chwytaka przed kamerą



Ryc. 7. Przykłady żołądki poddanych skaryfikacji o różnej zdrowotności – kolejno od lewej nasiono zdrowe, nadpsute, zepsute

Jako cechy obrazów, będące bazą do ich rozpoznawania, były badane uśrednione komponenty barwne obrazów (zarówno w układzie RGB, jak i w układzie HSV) oraz ich histogramy w poziomach szarości [12, 13]. Dokładność wyników uzyskanych za pomocą wymienionych klasyfikatorów plasowała się w przedziale 65%-87%.

Dyskusja i podsumowanie

W dotychczasowych badaniach dotyczących żołądki wykazano, że gęstość oraz w bardzo ograniczonym stopniu masa, a także własności aerodynamiczne i mechaniczne

korelują z ich żywotnością [5, 8]. Wspomniane cechy rozdzielcze nie dają jednak możliwości prowadzenia efektywnej separacji, czyli wydzielenia wyłącznie nasion zdrowych. Niska efektywność separacji nasion niektórych gatunków drzew leśnych, w tym dębów, przy wykorzystaniu klasycznych cech fizycznych skłania konstruktorów sortowników do poszukiwania innych cech rozdzielczych. Coraz częściej należą do nich własności optyczne. Zwykle chodzi o barwę oraz połysk okrywy nasiennej [13, 14], która niekiedy różnicuje nasiona pod względem zdolności kiełkowania, pozwalając na wydzielenie z mieszaniny ziarnistej zanieczyszczeń i nasion innych gatunków. W przypadku żołądźci analiza własności optycznych skupia się na zmianach nekrotycznych, uwidocznionych na liścieniach [15, 16]. Sam sposób oceny wywodzi się z ustandaryzowanej, ale nie mniej jednak destrukcyjnej metody oceny żywotności nasion, jaką jest krojenie. Polega ona na makroskopowych oględzinach rozwoju zarodka, stanu tkanki liścieni i zawiązków korzonka oraz wewnętrznych uszkodzeń spowodowanych przez grzyby, owady i gryzonie. Jednak w tym przypadku uszkodzenia uwidoczniają się na wzdłużnym przekroju przez tkankę żołądźci, a nie poprzecznym, jak podczas skaryfikacji. W tym ostatnim przypadku system wizyjny ma wgląd wyłącznie w obszar liścieni, co może generować błędy w ocenie zdrowotności i zdolności kiełkowania nasion. Mianowicie żołądźcie ze zmumifikowanymi w płaszczyźnie cięcia liścieniami mogą zostać sklasyfikowane jako zepsute, natomiast w rzeczywistości, będą nasionami nadpsutymi o wysokim potencjale kiełkowania. Może się także zdarzyć, że żołądźcie bez widocznych na przekroju zmian nekrotycznych zostaną zakwalifikowane do siewu, podczas gdy mumifikacja niewidocznego dla systemu optycznego korzonka zarodkowego spowoduje, że nasienie nie wykiełkuje. Jednak niezależnie od opisanych powyżej ograniczeń, zautomatyzowanie sortowania żołądźci oraz wyeliminowanie subiektywnej oceny ich zdrowotności przez pracowników szkółki leśnej może spowodować, że własności optyczne odsłoniętych tkanek żołądźci staną się powszechną, innowacyjną cechą rozdzielczą.

Model automatu charakteryzuje się zadowalającą efektywnością i dużym potencjałem wdrożeniowym. Pełen cykl obróbki przedsiewnej żołądźci od detekcji orientacji do sortowania trwa od 11 do 16 sekund w zależności od sekwencji czynności, którym jest poddawane nasiono. W wersji komercyjnej cykl ten powinien być znacznie skrócony poprzez wprowadzenie równoległego funkcjonowania poszczególnych podzespołów oraz zmultiplikowanie chwytaków z obecnie jednego do sześciu. Istotną jest również powtarzalność parametrów skaryfikacji. Niekorzystne jest bowiem zbyt intensywne skrócenie żołądźci, skutkujące uzyskaniem sadzonek o gorszych cechach biometrycznych. Zabieg skaryfikacji uszkadza bowiem liścienie siewek, które pełnią funkcję spichrzową, wypełniając niemal całe wnętrze okrywy nasiennej [3].

Na zaprezentowany automat do skaryfikacji uzyskano patent krajowy (Patent nr 228904) oraz międzynarodowy (European patent 3172954). Urządzenie było też wielokrotnie dostrzeżone i wyróżnione na targach branżowych oraz konkursach innowacji i nowych technologii, m.in.: Złotym Medalem – 11th International Warsaw Invention Show IWIS 2017; Złotym Medalem – VII Międzynarodowe Targi Rolnicze POLAGRA-PREMIERY 2018; Złotym Medalem „Wybór Konsumentów” – Międzynarodowe Targi Poznańskie 2019; I miejscem w Ogólnopolskim Konkursie SIMP na „Najlepsze osiągnięcie techniczne 2018 r.”

Prace wykonano w ramach projektu PBS3/A8/34/2015 pt. „Funkcjonalny model automatu z systemem wizyjnym do skaryfikacji oraz oceny żywotności żołądźci na podstawie automatycznego rozpoznawania topografii zmian mumifikacyjnych”. Projekt został dofinansowany przez NCBiR w ramach Programu PBS.

Authors: dr hab. inż. Paweł Tylek, prof. UR, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, E-mail: rtylek@cyf-kr.edu.pl; prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz, E-mail: rtad@agh.edu.pl; dr inż. Mirosław Jabłoński, E-mail: mjk@agh.edu.pl; dr hab. inż. Adam Piłat, prof. uczelni, E-mail: ap@agh.edu.pl; dr hab. inż. Zdzisław Kaliniewicz, prof. UWM, E-mail: zdzislaw.kaliniewicz@uwm.edu.pl; dr hab. inż. Florian Adamczyk, E-mail: florian.adamczyk@pimr.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Jakub Klocek, E-mail: optister.krakow@gmail.com

LITERATURA

- [1] Tylkowski T., Przesiewne traktowanie nasion drzew, krzewów, pnączy i krzewinek. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych (2016), Warszawa.
- [2] Grzesik M., et al., Biologiczne i fizyczne metody stosowane w produkcji i uszlachetnianiu nasion. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, (2012), 57(3), 147–152.
- [3] Giertych M.J., Suszka J., Consequences of Cutting Off Distal Ends of Cotyledons of *Quercus robur* Acorns Before Sowing. *Annals of Forest Science*, (2011), 68(2), 433–442.
- [4] Kaliniewicz Z. et al. ., An Analysis of the Physical Properties of Seeds of Selected Deciduous Tree Species. *Baltic Forestry*, (2016), 22(1), 169–174.
- [5] Skrzyszewska K., Banach J., Bownik G., Wpływ sposobu przedsiewnego przygotowania żołądźci i terminu siewu na kiełkowanie nasion i wzrost sadzonek dębu szypułkowego. *Sylvan*, (2019), 163(9), 716–725.
- [6] Shi W. et al., Acorn Size Is More Important than Nursery Fertilization for Outplanting Performance of *Quercus variabilis* Container Seedlings. *Annals of Forest Science*, (2019), 76, 22.
- [7] Tadeusiewicz R. et al. ., Assessment of selected parameters of the automatic scarification device as an example of a device for sustainable forest management. *Sustainability*, (2017), 9(12) article 2370.
- [8] Kaliniewicz Z., Tylek P., Influence of Scarification on the Germination Capacity of Acorns Harvested from Uneven-Aged Stands of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Forests*, (2018), 9, 100.
- [9] Bystrowski C., Wójcik G., Próba użycia insektycydów z grupy neonikotynoidów do ochrony żołądźci na plantacji nasiennej dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) w Nadleśnictwie Leżajsk. *Leśne Prace Badawcze*, (2009), 70(3), 271–275.
- [10] Tadeusiewicz R. et al., Sterowanie napędem zespołu chwytno-pozycjonującego w automacie skaryfikującym nasiona dębu. *Napędy i Sterowanie*, (2017), 11 (223), 82–87.
- [11] Bubiński Z et al., Ocena zdrowotności automatycznie skaryfikowanych żołądźci za pomocą komputerowej analizy obrazów. *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, (2017), Warszawa.
- [12] Adamczyk F. et al. ., Automat do skaryfikacji żołądźci wraz z identyfikacją zmian chorobowych. *Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych*, (2018), Poznań.
- [13] Kaliniewicz Z et al., Analysis of correlations between selected physical properties and color of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seeds. *Technical Sciences*, (2014), 17(3), 259–274.
- [14] Novikov A. et al., Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour. *Forests*, (2019), 10, 1064.
- [15] Jabłoński M. et al. Colour-Based Binary Discrimination of Scarified *Quercus robur* Acorns under Varying Illumination. *Sensors*, (2016), 16(8), 1319.
- [16] Przybyło J., Jabłoński M., Using Deep Convolutional Neural Network for Oak Acorn Viability Recognition Based on Color Images of Their Sections. *Computers and Electronics in Agriculture*, (2019), 156, 490–499.