

Wzór cytowania:

Adamczyk F., Szychta M., Wojciechowski J., Danielak M., Sobocki S., Szaroleta M., Kapela D., Szulc T., Tylek P., Walczyk J., Szewczyk G., Leszczyński K., Sowa J.M., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Bambrowicz M., Nieciąg S. 2022. Automatyzacja procesu sadzenia drzew leśnych z zakrytym systemem korzeniowym na przykładzie modelu badawczego automatycznego robota do zakładania upraw leśnych. *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 2: 25–30.



Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna

Strona internetowa czasopisma: <https://tech-rol.eu/>

Automatyzacja procesu sadzenia drzew leśnych z zakrytym systemem korzeniowym na przykładzie modelu badawczego automatycznego robota do zakładania upraw leśnych

Florian Adamczyk^{a*}, Marek Szychta^a, Jacek Wojciechowski^a, Marek Danielak^a, Sebastian Sobocki^a, Michał Szaroleta^a, Dawid Kapela^a, Tomasz Szulc^a, Paweł Tylek^b, Józef Walczyk^b, Grzegorz Szewczyk^b, Krzysztof Leszczyński^b, Janusz M. Sowa^b, Paweł Kielbasa^c, Tadeusz Juliszewski^c, Ryszard Tadeusiewicz^d, Marek Bambrowicz^e, Sebastian Nieciąg^e

^a Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Poznań

^b Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Kraków

^c Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Inżynierii Produkcji i Energetyki, Kraków

^d Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

^e Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 18.11.2022

Data akceptacji: 16.12.2022

Słowa kluczowe

automatyzacja
odnowienie lasu
sadzonki z zakrytym systemem korzeniowym
sadzenie
urządzenie

Sadzenie sadzonek drzew leśnych, wyprodukowanych w szkółkach kontenerowych w warunkach kontrolowanych, wykonywane jest na ogół ręcznie przy pomocy kostura. Ręczne umieszczenie w glebie tak dużej liczby sadzonek wymaga olbrzymich nakładów robocizny. Istnieje wiele rozwiązań półautomatycznych urządzeń wspomagających proces sadzenia sadzonek drzew leśnych. Znane są również wirtualne lub badawcze koncepcje urządzeń w pełni automatycznych. Praca zawiera krótki przegląd rozwiązań konstrukcyjnych maszyn do automatyzacji procesu zalesiania, opis opracowanego modelu badawczego automatycznego robota do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych oraz rezultaty wstępnych badań zespołu sadzącego automatu. Testy zespołu sadzącego potwierdziły spełnienie przyjętych wymagań użytkowe, wydajność pracy modułu sadzenia wynosiła $14,3 \pm 2,7$ sadzonek/min dla gatunków iglastych i $9,1 \pm 3,2$ szt./min – dla liściastych.

The planting of forest tree seedlings, produced in container nurseries under controlled conditions, is done by hand using a pick. Manually placing such a large number of seedlings in the soil requires an enormous amount of labour. There are many solutions for semi-automatic devices to assist in the process of planting forest tree seedlings. Virtual or research concepts of fully automatic devices are also known. The paper provides a brief overview of design solutions of machines for the automation of the afforestation process, a description of the developed research model of the automatic robot for the establishment of forest crops and afforestation of reclaimed and post-agricultural areas, and the results of preliminary tests of the automatic planting team. Tests of the planting unit confirmed that the accepted performance requirements were met, with a planting module productivity of 14.3 ± 2.7 cuttings/min for coniferous species and 9.1 ± 3.2 cuttings/min for deciduous species.

Artykuł udostępniony na licencji CC BY 4.0:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>.

* Autor do korespondencji: florian.adamczyk@pit.lukasiewicz.gov.pl

1. Wstęp

Wprowadzanie nowoczesnych, zautomatyzowanych systemów technologicznych wychodzi, poprzez eliminowanie pracy ręcznej, naprzeciw postulatam humanizacji pracy w leśnictwie [1]. Stosowanie zaawansowanych technicznie systemów technologicznych jest również wymuszone koniecznością funkcjonowania podmiotów gospodarczych w realiach gry rynkowej i wynikającej z tego konieczności obniżania kosztów produkcji. Sadzenie sadzonek drzew leśnych, wyprodukowanych w szkółkach kontenerowych w warunkach kontrolowanych, wykonywane jest na ogół ręcznie przy pomocy kostura. Ręczne umieszczenie w glebie tak dużej liczby sadzonek wymaga olbrzymich

nakładów robocizny [2, 3, 4]. Dodatkowych nakładów czasu pracy wymaga roznoszenie sadzonek po zalesianej powierzchni [4, 15]. Jest to zatem zabieg o małej wydajności pracy, ponadto wykonywany dużym kosztem biologicznym personelu. W obecnych realiach, znane są zastosowania sadzarek sprzężonych z ciągnikami uniwersalnymi. Sporadycznie wykorzystywane są również moduły sadzarek montowane na nośnikach dużej mocy (np. na koparkach). Funkcjonalnym, stosowanym również rozwiązaniem jest półautomat sadzący, zawieszany na wysięgniku koparki lub platformie ciągnika zrywkowego typu forwarder (rys. 1) [8, 9]. Przy czym we wszystkich tych przypadkach zawsze sadzonki są wyjmowane z kaset ręcznie i wkładane do zasobnika sadzarki [5, 6, 7, 15].



a)



b)

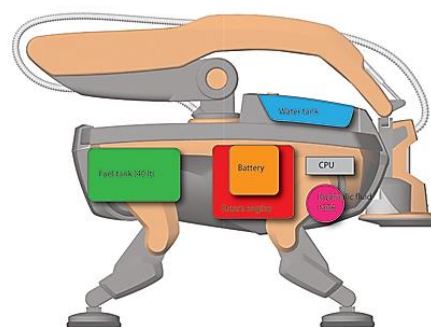
Rys. 1. Półautomatyczne sadzarki: a) głowica sadząca Bracke P11.a, b) maszyna SilvaNova [8, 9]

W zakresie konstrukcji maszyn i urządzeń do automatyzacji procesu sadzenia sadzonek drzew leśnych z zakrytym systemem korzeniowym prace badawcze są prowadzone cały czas. Z uwagi na ilość powierzchni leśnych w krajach nadbałtyckich oraz w Skandynawii,

a szczególnie w Szwecji intensywność tych prac jest duża. Swoje rozwiązania koncepcyjne, na razie w postaci modeli CAD 3D, prezentują na przykład estońska firma Milrem Robotics czy szwedzki koncern Husqvarna [10, 11] (rys. 2).



a)



b)

Rys. 2. Koncepcje rozwojowe automatycznych sadzarek:

a) automat firmy Milrem Robotics, b) rozwiązanie firmy Husqvarna. [10, 11]

Celem pracy jest omówienie autorskiej koncepcji automatycznego robota do zakładania upraw leś-

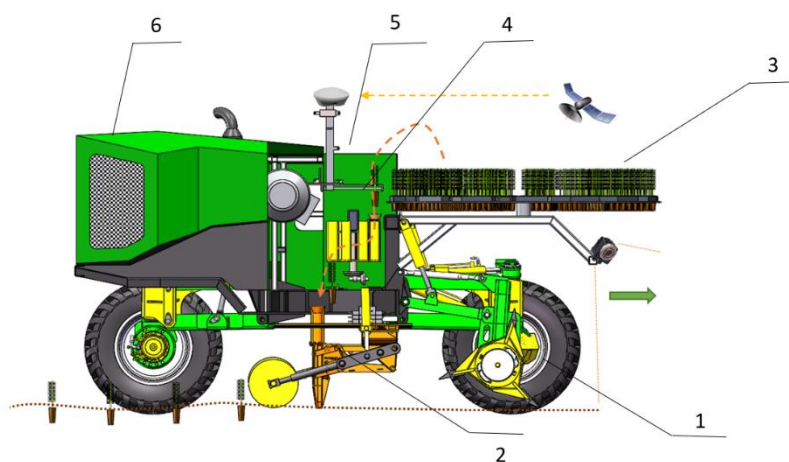
nych oraz przedstawienie efektów badań zespołowych.

2. Autorska koncepcja automatycznego robota do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych

Obecnie powierzchnia lasów w Polsce wynosi ponad 9,2 mln ha, co odpowiada lesistości 29,6 %. Zdecydowana większość to lasy państwowe, z czego ok. 7,3 mln ha zarządzane jest przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe [12]. Polscy leśnicy także chcą iść z postępem w zakresie automatyzacji prowadzenia prac odnowieniowych, dlatego na zlecenie Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych zespół składający się z naukowców i inżynierów z UR w Krakowie,

Łukasiewicz – PIT w Poznaniu, OTL w Jarocinie oraz AGH w Krakowie podjął się zadania opracowania modelu badawczego automatycznego robota oraz innowacyjnej technologii do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych.

W pierwszym etapie prac powstał model koncepcyjny automatycznej, mobilnej sadzarki. Na jego podstawie został opracowany model koncepcyjny, który następnie stał się bazą do wykonania modelu bryłowego oraz opracowania szczegółów rozwiązań węzłów konstrukcyjnych. Efektem realizacji prac jest model konstrukcji mobilnego automatu oraz kilka zgłoszeń patentów do Urzędu Patentowego RP (rys. 3).



Rys. 3. Model CAD3D automatycznego robota do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych. 1) platforma jezdna, 2) zespół sadzący, 3) magazyn sadzonek, 4) zespół buforowy, 5) zespół pobierania i podawania sadzonek, 6) silnik napędowy [źródło: opracowanie własne]

Kolejnym etapem było opracowanie dokumentacji pozwalającej na budowę modelu badawczego urządzenia. Zbudowane wybrane zespoły robocze oraz po kompletacji także model badawczy całego automatycznego robota do zakładania upraw leśnych poddano badaniom laboratoryjnym i eksploatacyjnym. Przebieg procesu technologicznego jest zautomatyzowany od momentu ręcznego załadowania magazynu sadzonek kasetami szkółkarskimi wypełnionymi sadzonkami do posadzenia sadzonki w glebie.

Sadzonki wyhodowane w szkółce kontenerowej w standardowych kasetach, są wysadzane do gleby w systemie automatycznym (bez konieczności ich wcześniejszego wyjmowania, związanego ze szkodliwym przesuszaniem i osypywaniem bryłki korzeniowej). Automatyczny robot posiada własny układ jezdny (1), pozwalający mu na pracę w trudnych warunkach terenowych, mechanizm likwidujący konkurencyjną roślinność wokół miejsca sadzenia (placówki) i spulchniający

glebę w miejscu pracy elementu sadzącego (2) oraz zespół ugniatający glebę wokół sadzonki (3), celem jej stabilizacji i eliminacji kieszeni powietrznych utrudniających przerastanie systemu korzeniowego do calizny. Sadzonki w obręb pracy kostura (urządzenia wysadzającego) (4) są podawane przez zespół chwytania (5) i pobierania sadzonek (6), który wyjmuje sadzonki z kaset według określonego algorytmu, przenosi je i umieszcza w celach podajnika buforowego (7). Z niego są one kolejno wpuszczane do kanału kostura (8). Kostur po otrzymaniu sadzonki jest opuszczany w dół, realizując proces sadzenia w miejscu przygotowanej przez wał placówki. Urządzenie posiada zasobnik kaset (9), przemieszczany w sposób zaprogramowany, celem zastąpienia opróżnionej kasety kolejną pełną. Pozwala to na obsadzenie określonej powierzchni (ok. 3 a) przeznaczonej do zalesienia, bez konieczności ręcznego podawania sadzonek i ciągłego nadzoru nad pracą zespołów roboczych maszyny [13, 14] (rys. 4).



Rys. 4. Model badawczy automatycznego robota do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych [źródło: opracowanie własne]

Parametry modelu badawczego automatycznego robota do zakładania upraw leśnych to:

- szerokość: ok. 2,5 m,
- długość: ok. 4,5 m,
- wysokość robocza: ok. 3 m (\pm 0,4 m),
- masa: ok. 4,5 tony,
- prędkość robocza: 0.1 ÷ 2 km/h,
- prędkość transportowa: 0.1 ÷ 4 km/h.

Zespół sadzący modelu maszyny składa się z:

- wału trójzębnego do przygotowania placówki o szerokości roboczej 0,5 m i o regulowanej głębokości skrawania,
- kostura sadzącego o regulowanej głębokości zagłębienia,
- pary kół dociskowych z mechaniczną regulacją położenia i konta docisku oraz elektroniczną regulacją momentu i siły docisku.

3. Metodyka i przebieg badań zespołu sadzącego

Zespół roboczy mobilnego automatu do sadzenia został eksperymentalnie sprawdzony podczas prób ruchowych przeprowadzonych w 2020 i 2021 roku na terenie Sieć Badawcza Łuksiewicz – Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych w Poznaniu oraz badań pilotażowych na obszarze leśnym Nadleśnictwa Jarocin, w okolicach miejscowości Cielcza. Powierzchnia próbna pod odnowienie została przygotowana trzema technologiami:

1. orką pługiem leśnym LPZ,
2. uprzątnięciem i rozdrobnieniem wierzchniej warstwy za pomocą rozdrabniacza bijakowego,
3. przygotowywaniem pojedynczych placówek Wałem Trójzębnym (WT) do upraw WT.

Wariantami badań był sposób przygotowania powierzchni pozrębowej lub jej nieprzygotowanie sadzonki drzew iglastych (_igl) i liściastych (_lis) sadzono:

- na powierzchni uprzątniętej z pozostałości pozrębowych przygotowanej pługiem leśnym LPZ (oznaczenie na rys. 5: LPZ),
- na powierzchni uprzątniętej z pozostałości pozrębowych przygotowanej wałem bijakowym uniwersalnym (oznaczenie na rys. 5: Mul),
- na powierzchni przygotowanej przez wał trójzębny do upraw WT, w miejscach wykonanych prostokątnych placówek (oznaczenie na rys. 5: WT),
- na powierzchni nieuprzątniętej po zrębie (oznaczenie na rys. 5: N).

Po posadzeniu sadzonek badano prawidłowość zaciśnięcia bryłki korzeniowej oceniając wzrokowo stan posadzonej sadzonki oraz mierząc siłę wydobywania sadzonek ręcznym siłomierzem terenowym firmy Axis, typ FC200, siła max 200 N, $d = 0.05$ N.

Sadzenie prowadzono ze średnią prędkością jazdy ciągnika 0,5 km/h. We wszystkich przypadkach sadzenie przebiegło w sposób ciągły, zakłócany jedynie przerwami na pokonywanie przeszkód w postaci pniaków. Sadzone były gatunki drzew iglastych (sosna, świerk) oraz liściastych (dąb, buk).

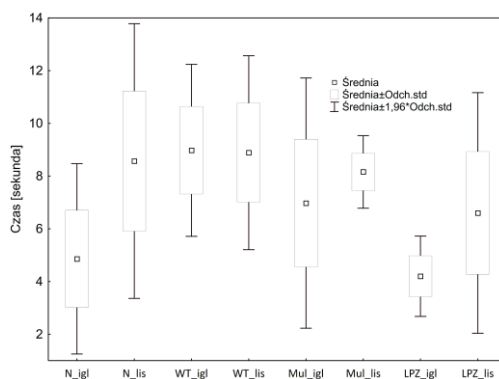
Na powierzchni zoranej oraz przygotowanej przez rozdrabniacz bijakowy sadzenie było prowadzone w systemie automatycznego sterownia ruchami roboczymi, a w przypadku placówek wykonanych wałem WP sadzenie (wyzwalanie ruchów roboczych kostura) drzewek było prowadzone manualnie. Koła dogniatające w tym przypadku nie pracowały ciągle, po dognieceniu sadzonki były unoszone do góry, aby uniknąć nagarniania ziemi na posadzoną sadzonkę przez elementy ich konstrukcji. Model badawczy wysadził wszystkie przygotowane sadzonki (około 150 sztuk). Ciśnienie w układzie hydraulicznym wynosiło od około 16 do 19 MPa.

Ze względu na szybkozmienność obserwowanych czynności w cyklach pracy modułu pomiar czasu trwania poszczególnych czynności i ruchów roboczych został

określony analizami fotochronometrażowymi z zastosowaniem oprogramowania TIMER PRO PROFESSIONAL służącego do analizy materiałów filmowych. Możliwość zatrzymywania filmu oraz wielokrotne poklatkowe przewijanie materiału wydatnie poprawiło dokładność pomiarów, a moment zaistnienia konkretnej czynności został dokładnie opisany w arkuszach kalkulacyjnych wygenerowanych podczas pracy z aplikacją.

4. Wyniki badań i ich analiza

Na rys. 5 pokazano zamiany cyklu sadzenia dla różnych warunków przygotowania podłoża zgodnych z zapisami w metodyce badań.



Rys. 5. Zmienność cyklu sadzenia dla różnych warunków przygotowania podłoża [źródło: opracowanie własne]

Na wykresie przedstawiono średnie wartości czasu sadzenia pojedynczej sadzonki w (s) oraz odchylenie standardowe dla serii pomiarów. Dla każdego z wariantów czas sadzenia badano dla 50 sadzonek. Dłuższe czasy sadzenia dla sadzonek drzew liściastych wynikały z ich większej wysokości i długości bryłki korzeniowej niż w przypadku sadzonek drzew iglastych, co automatycznie wydłużało czas potrzebny na ich posadzenie.

Opracowany model badawczy zespołu sadzącego bardzo dobrze sprawdził się w przypadku sadzonek w zakresie wysokości określonym w założeniach przyjętych wspólnie na początku realizacji projektu. Przyjęto wówczas, że sadzonki nie mogą być wyższe aniżeli 50 cm, z uwagi na uwarunkowania konstrukcyjne urządzenia i uniknięcie intensywnego rozgałęzienia, w szczególności w przypadku sadzonek drzew liściastych. Badania w warunkach rzeczywistych potwierdziły poprawność pracy układu sterowania zespołem sadzącym zarówno w trybie automatycznym jak i manualnym.

Testy zespołu sadzącego pokazały, że jego praca w trybie automatycznym w terenie przygotowanym

(gleba spulchniona, o niskim współczynniku zwężności, powierzchnia dość równa) spełnia przyjęte wymagania poprawności posadzenia (rys. 6) i wysadzania 5÷10 sadzonek w czasie 1 minuty. W przypadku sadzenia sadzonek gatunków iglastych (sosna, świerk) wydajność pracy modułu sadzenia wynosiła 14±3 sadzonek/min. Dla gatunków liściastych (dąb, buk) była niższa i wynosiła 9±3 szt./min. W tym przypadku wydajność charakteryzowała się znacznie większą zmiennością. Wydajność sadzenia wyliczono na podstawie zmierzonych średnich czasów sadzenia pojedynczych sadzonek.

Bardzo optymistycznie przedstawiają się wyniki analizy procesu zaciskania bryłki korzeniowej w glebie. Siła wydobywania sadzonek nie powinna być mniejsza od 16-21 N. W każdym wariantcie doświadczenia uzyskane wartości średnie spełniają ten warunek. Stwierdzono niewielką liczbę sadzonek zbyt słabo związanych z podłożem, jednak zawsze dotyczyło to sadzonek umieszczonych zbyt płytko.



Rys. 6. Sadzonki kontenerowe buka oraz świerka posadzone przez automat (źródło: opracowanie własne)

5. Podsumowanie i wnioski

Rezultaty przeprowadzonych badań podstawowych i prac badawczo-rozwojowych dają szeroką możliwość dalszych działań aplikacyjnych, a zgłoszony do opatentowania model funkcjonalny automatu jest gotowy do podjęcia prac przedwdrożeniowych i wdrożeniowych.

Przeprowadzone badania modelu zespołu sadzącego pozwoliły na wysnucie następujących wniosków:

1. Praca zespołu w trybie automatycznym w terenie przygotowanym (gleba spulchniona, o niskim współ-

czynniku zwężłości, powierzchnia dość równa) spełnia wymagania użytkowe. W przypadku sadzenia sadzonek gatunków iglastych (sosna, świerk) wydajność pracy modułu sadzenia wynosiła $14,3 \pm 2,7$ sadzonek/min. Dla gatunków liściastych (dąb, buk) była niższa i wynosiła $9,1 \pm 3,2$ szt./min.

2. Siła wydobywania sadzonek nie powinna być mniejsza od 16–21 N. W każdym wariantcie doświadczenia uzyskane wartości średnie spełniają ten warunek.

Literatura

- [1] Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Kielbasa P., Jabłoński M., Pawlik P., Piłat A., Walczyk J., Szczepaniak J., Juliszewski T., Szaroleta M. 2017. Automation of the Acorn Scarification Process as a Contribution to Sustainable Forest Management. Case Study: Common Oak. Sustainability 9, 2276. doi:10.3390/su9122276.
- [2] Józefaciuk J., Nowacka W. 1993. Ćwiczenia z ergonomii i ochrony pracy. SGGW Warszawa, 14-36.
- [3] Sowa J.M., Kulak D. 2000. Związki techniki pracy z poziomem techniki z poziomem wydatku energetycznego operatorów pilarek spalinowych. [W:] Stan i perspektywy badań z zakresu użytkowania lasu. III Konferencja Leśna. Sękocin Las., red. Suwała M., Rządkowski S., IBL Warszawa, 425-432.
- [4] Grzywiński W. 2007. Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, 128 p.
- [5] Rantala, J., Harstela, P., Saarinen, V-M., Tervo, L. 2009. A techno-economic evaluation of Bracke and M-Planter tree planting devices. Silva Fennica 43(4): 659–667.
- [6] Ersson B. T., Bergsten U., Lindroos O. 2014. Reloading mechanized tree planting devices faster using a seedling tray carousel. Silva Fennica vol. 48 no. 2 article id 1064. <https://doi.org/10.14214/sf.1064>
- [7] Ersson B.T., Sundblad L.-G., Manner J. (2022). Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: a case study from southern Sweden. Silva Fennica vol. 56 no. 2, article id 10663. 17 p. <https://doi.org/10.14214/sf.10663>
- [8] www.forestry.com/editorial/plantma-x-old-planting-concept-new-suit/
- [9] www.brackeforest.com/
- [10] Oliveira, L.F.P.; Moreira, A.P.; Silva, M.F. Advances in Forest Robotics: A State-of-the-Art Survey. Robotics 2021, 10, 53. <https://doi.org/10.3390/robotics10020053>
- [11] www.tuvie.com/tree-planting-robot-is-designed-to-help-reforestation-reach-an-environmentally-friendly-plant-process/
- [12] <https://www.lasy.gov.pl/pl/nasza-praca/zasoby-lesne>
- [13] Adamczyk F., Wojciechowski J., Tylek P., Sowa J., Walczyk J. Tadeusiewicz R. (2019): The concept of construction of a mobile automatic device for forest regeneration tasks and afforestation of former farmland and reclaimed areas. Symposium Proceedings Edited by Lorencowicz E., Uziak J., Huyghebaert B. from X International Scientific Symposium “Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture”, Lublin, Poland, 20 – 22 November 2019, p. 13 – 18. DOI: 10.24326/fmpmsa.2019.1
- [14] Tylek P., Wojciechowski J., Adamczyk F., Szychta M., Walczyk J., Szweczyk G., Kielbasa P., Kormanek M., Mateusiak Ł. 2021. Drive and hydraulic control of the planting module of the automatic forestry planter. [W:] Mobilné energetické prostriedky – Hydraulika. Životné prostredie–Ergonómia mobilných strojov Vedecký recenzovaný zborník. Mobile energy systems - hydraulics - environment - ergonomics of mobile machines. Peer – reviewed Proceedings. Editori: Jozef Krilek, Tomáš Kuvik, 242 –250.
- [15] Ersson B. T. 2010. Possible concepts for mechanized tree planting in Southern Sweden – an introductory essay on forest technology. Arbetsrapport 269. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resushushållning. 51 p.