

ŁUKASZ WARGUŁA, KONRAD J. WALUŚ, PIOTR KRAWIEC

Warunki pracy mobilnych maszyn rozdrabniających drewno w aspekcie innowacyjnych systemów sterowania napędem

Working conditions of mobile wood chipping machines in the aspect of innovative drive control systems

ABSTRACT

Warguła Ł., Waluś K. J., Krawiec P. 2019. Warunki pracy mobilnych maszyn rozdrabniających drewno w aspekcie innowacyjnych systemów sterowania napędem. Sylwan 163 (9): 765-772. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2019036>.

The effectiveness of agrocultural processes in wooded areas depends, *inter alia*, on the kind of machines used. Mobile machines chopping branches with low power engines are characterized by limited adaptation of the drive unit to the operating conditions. This results in increased fuel consumption and increased exhaust emissions. In order to develop innovative control systems that reduce fuel consumption, it is required to determine the conditions of use of such machines. The article characterizes the periodic-variable cycle of chopping wood machines, depending on the frequency of branch delivery. The research was carried out at the following distances of the branch stack from the chipper: 0.5 m; 1.5 m and 2.5 m, indicating the characteristics of changes in the throttle angle (signalling the change in system load). The share of idle and active work time in the process of the waste chopping depending on the distance between the chipper and the pile of branches was determined and described. It was proved that at a distance of about 0.5 m, idle operation accounts for about 22% of the chopping process time, and at a distance of 2.5 m, the share of idle labour increases to ca. 35%. These distances, due to the topography of the terrain in real operating conditions, can be much larger. This suggests that carrying out work on reducing energy consumption and emissions of harmful exhaust compounds, depending on the operating conditions, is justified because the idle operation of the grinding machine can account for even more than 50% of the entire operation of the device. Benefits resulting from the development of innovative control systems for drive units of machines chopping branches are particularly important due to the limitation of the quantitative impact of exhaust emissions on the natural environment and machine operators.

KEY WORDS

wood waste processing, non-road mobile machinery drives, innovative control systems

ADDRESSES

Łukasz Warguła – e-mail: lukasz.wargula@put.poznan.pl

Konrad J. Waluś – e-mail: konrad.walus@put.poznan.pl

Piotr Krawiec – e-mail: piotr.krawiec@put.poznan.pl

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Poznańska; ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Wstęp

Drzewa na terenach leśnych, rolnych oraz miejskich poddawane są wycinaniu lub przycinaniu. Odpady w postaci gałęzi są przetwarzane przez maszyny robocze, co polega na ich rozdrabnianiu w celu ułatwienia dalszych procesów transportu, magazynowania, kompostowania [Skłodowski 2010; Kwaśna i in. 2015] lub pozyskiwania energii [Gendek i in. 2018]. Dostępne w literaturze prace dotyczące energochłonności procesów przetwarzania odpadów drzewnych w lasach wykazują, że obecnie stosowane metody zbioru, rozdrabniania i transportu biomasy leśnej w postaci wiórów są bardzo wydajne z punktu widzenia bilansu energetycznego. Jednak wydajność tę można zwiększyć poprzez lokalizację miejsca ścinki bliżej elektrowni [Gałęzia 2013]. Autorzy wskazują, że w takich przypadkach energia zużyta na rozdrabnianie byłaby prawdopodobnie najważniejszym wkładem [Gałęzia 2013]. Innym zagadnieniem jest globalna oraz lokalna ochrona środowiska, gdzie ograniczenie oddziaływania maszyn na operatorów [Baldauf i in. 2006] lub na infrastrukturę lasu [Stańczykiewicz i in. 2015] jest korzystne. Maszyny rozdrabniające zasilane silnikami małej mocy stosowane są najczęściej do oczyszczania dróg leśnych [Piekutin i in. 2015] lub szlaków turystycznych [Bajor i in. 2018]. Maszyny te są napędzane przez silniki spalinowe, które zużywają nieodnawialne źródła energii oraz emitują szkodliwe gazy spalinowe [Czerwinski i in. 2014; Lijewski 2015; Merkisz i in. 2016; Liu i in. 2016; Dimou i in. 2017; Hooper i in. 2017]. Liberalne przepisy dotyczące emisji spalin tych maszyn [Waluś i in. 2018] przekładają się na niskie zaawansowanie techniczne tego typu jednostek napędowych [Warguła i in. 2018a]. Naukowym trendem wyprzedającym technologicznie konstrukcje spełniające europejskie przepisy o emisji [Regulation... 2016] jest wykorzystywanie jednostek napędowych z elektronicznym wtryskiem paliwa [Warguła i in. 2018b], zasilanych paliwami alternatywnymi [Szpica, Czaban 2014] oraz adaptujących się do warunków eksploatacji [Warguła i in. 2017a]. W celu opracowania innowacyjnych systemów sterowania w maszynach rozdrabniających niezbędne jest określenie warunków eksploatacji tych maszyn.

W procesie rozdrabniania odpadów drzewnych występuje okresowo zmienny cykl pracy. Wynika to głównie z częstotliwości dostarczania odpadów (gałęzi) do członu roboczego maszyny rozdrabniającej. Klasyczne napędy mobilnych maszyn rozdrabniających pracują w trybie jałowym z prędkością obrotową umożliwiającą uzyskanie maksymalnego momentu obrotowego lub pod obciążeniem wywołanym przez obiekt rozdrabniania. Ponieważ maszyny tego typu zazwyczaj są wyposażone w gaźnikowy układ zasilania paliwem, procesy sterowania nie są mechatroniczne. Ze względu na brak elektronicznego sterowania układem wtryskowo-zapłonowym, a więc brak sensorów rejestrujących parametry napędu, nie spotyka się publikacji na temat stanów eksploatacji tych maszyn, w przeciwieństwie do maszyn roboczych, takich jak np. koparki czy ładowarki, których napędy są wyposażone w układ EOBD (ang. European On Board Diagnostic). Wyniki tych badań mogą wesprzeć globalną oraz lokalną ochronę środowiska, ograniczyć oddziaływanie maszyn na operatorów oraz wspomóc szacowanie kosztów i wydajności zabiegów agrokultury na terenach zadrzewionych [Więsik 1988; Kusiak i in. 2012]. Przebieg procesu rozdrabniania odpadów drzewnych jest zależny od: rodzaju drewna, rodzaju prac, w wyniku których powstały odpady, rodzaju maszyny rozdrabniającej, sposobu sterowania napędem, topografii terenu, liczby operatorów oraz ich stanu psychofizycznego. Opis warunków eksploatacji umożliwi modelowanie efektywności wybranych metod sterowania napędem rębaka oraz ich ocenę.

Celem badań była analiza i ocena warunków eksploatacyjnych rębaka w aspekcie innowacyjnego adaptacyjnego systemu sterowania jego napędem.

Materiał i metody

Badania realizowano z wykorzystaniem rębaka walcowego Red Dragon RS-100 Standard z jednostką napędową German GX 390 ze zmodernizowanym układem wtryskowo-zapłonowym [Warguła i in. 2017a, b, 2019] oraz doposażonym w adaptacyjny bezobsługowy układ sterowania napędem zgodny ze zgłoszeniem patentowym P.423369 [Warguła i in. 2017d] (ryc. 1). Zastosowana elektroniczna jednostka sterująca pracą silnika spalinowego (EMU ECU MASTER) umożliwiła między innymi pomiar prędkości obrotowej napędu, stosunku paliwa do powietrza w gazach spalinowych, czasu trwania sygnału otwarcia wtryskiwacza oraz kąta uchylenia przepustnicy powietrza. Na podstawie informacji o zmianie położenia kłapy przepustnicy powietrza silnika spalinowego można szacować czas pracy czynnej i biernej maszyny. Zmiana położenia kłapy przepustnicy jest aktywowana przez sygnał z czujników detekcji w kanale podawczym maszyn rozdrabniającej. Przykładowy fragment oscylogramu z badań przedstawia rycina 2.

Wykonano 3 próby badawcze powtarzane 10-krotnie. Obejmowały one obiekty rozdrabniania położone od rębaka w odległości 0,5 m (około 1 kroku), 1,5 m (około 3 kroków) oraz 2,5 m (około 5 kroków). Średni czas trwania próby wynosił około 15 min. Rozdrabniane obiekty to gałęzie orzecha *Juglans regia* tuż po ścięciu w styczniu. Ze względu na niekontrolowane ruchy gałęzi (części nieznajdującej się w kanale podawczym) podczas procesu rozdrabniania urządzenie obsługiwał jeden operator.

Czas całego procesu pracy rębaka t_{pn} w zależności od jego odległości od stosu gałęzi l_{rsn} jest sumą czasu pracy podczas rozdrabniania t_{prn} oraz czasu pracy jałowej napędu t_{pjn} . Łączny czas pracy rębaka z adaptacyjnym systemem sterowania opisuje równanie:

$$t_{pn}(l_{rsn}) = \sum t_{prn} + \sum t_{pjn} \quad [1]$$

gdzie:

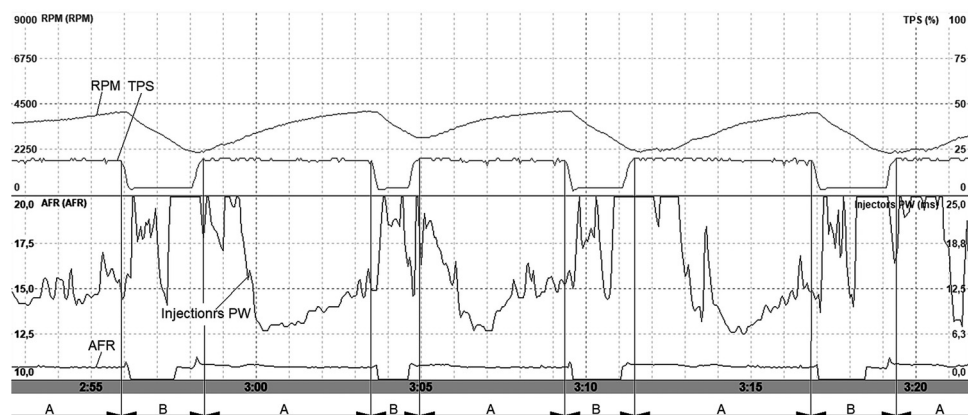
n – warunki eksploatacji w zależności od odległości rębaka od stosu drewna.

Początek procesu rozdrabniania jest sygnalizowany przez zmianą wartości kąta uchylenia przepustnicy. Uchylenie jest aktywowane przez czujnik detekcji obiektu umieszczony na początku



Ryc. 1.

Rębak z adaptacyjnym systemem sterowania
Chipper with an adaptive control system



Ryc. 2.

Oscylogram warunków eksploatacji napędu rębaka uzyskany z użyciem programu Ecumaster EMU Classic Clinet

Oscillogram of operating conditions of the chipper drive obtained using the Ecumaster EMU Classic Clinet program

RPM – prędkość obrotowa silnika, AFR – stosunek paliwa do powietrza, Injectors PW – czas trwania sygnału otwarcia wtryskiwacza, TPS – uchylenie przepustnicy powietrza, A – praca czynna, B – praca bierna
 RPM – engine rotational speed, AFR – fuel-to-air ratio, Injectors PW – injector opening time, TPS – tilting of the air damper, A – active work, B – idle operation

kanalu podawczego. Informację o zakończeniu procesu stanowi zmiana kąta uchylenia przepustnicy do wartości przyjętej podczas pracy jałowej. Chociaż sygnały te nie są informacjami o rzeczywistym rozpoczęciu i zakończeniu procesu rozdrabniania (który następuje wcześniej), to przyjmuje się, że czas między nimi jest czasem procesu rozdrabniania. W celu zapewnienia pełnego rozdrabniania obiektu wprowadzono w procesie sterowania podtrzymanie czasowe procesu t_s . Wartość ta jest stała i programowana manualnie. Uwzględniając liczbę cykli w procesie n_c , można określić czas pracy rozdrabniania i czas pracy jałowej rębaka z klasycznym systemem sterowania:

$$t_{pn}(I_{rsn}) = (\sum t_{prn} - (n_c \cdot t_s)) + (\sum t_{pjn} + (n_c \cdot t_s)) \quad [2]$$

Wyniki

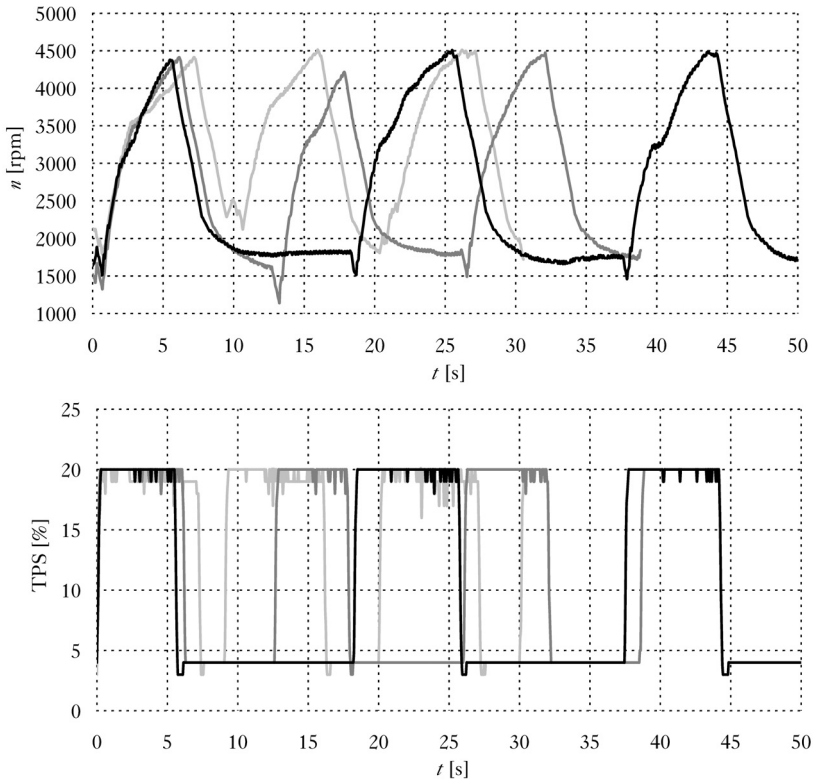
Szczegółową charakterystykę zmian prędkości obrotowej napędu rębaka w funkcji czasu i w zależności od jego odległości od stosu gałęzi w rzeczywistych warunkach eksploatacji przedstawiono na rycinie 3. Udział pracy jałowej w całym cyklu pracy w zależności od odległości między stosem gałęzi a rębakiem (ryc. 4) opisuje wzór:

$$t_{pjn} = 6,5 \cdot l_x + 18,917 \quad [3]$$

gdzie:

l_x – odległość między stosem gałęzi a rębakiem.

Rejestracja czasu pracy rębaka z wydzieleniem czasu pracy czynnej (rozdrabnianie) i biernej (praca jałowa) umożliwia analizę warunków eksploatacji napędu rębaka. Dzięki uwzględnieniu w tym procesie systemu sterowania można symulować i oceniać efektywność opracowanych układów i algorytmów sterowania w porównaniu ze sterowaniem klasycznym. Określenie wpływu odległości między stosem gałęzi a rębakiem dodatkowo wspomaga tę ocenę. Gdy odległość wynosi około 0,5 m, wówczas praca jałowa stanowi około 22% procesu rozdrabniania, a przy odległości 2,5 m udział pracy jałowej rośnie do około 35% (tab.). Odległości te, ze względu na

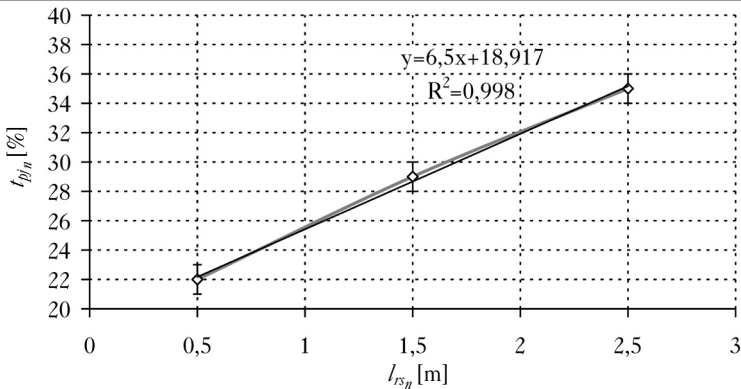


Ryc. 3.

Zmiany prędkości obrotowej (n) i kąta uchylenia przepustnicy (TPS) napędu rębaka w funkcji czasu w zależności od odległości między stosem gałęzi a rębakiem w rzeczywistych warunkach eksploatacji

Changes in rotational speed (n) and in throttle angle (TPS) of the chipper drive as a function of time depending on the distance between the stack of branches and chipper in real operating conditions

jasnoszary – 0,5 m, ciemnoszary – 1,5 m, czarny – 2,5 m
light grey – 0.5 m, dark grey – 1.5 m, black – 2.5 m



Ryc. 4.

Udział czasu pracy jałowej t_{pj_n} w całym cyklu użytkowania w zależności od odległości między stosem gałęzi a rębakiem l_{rs_n}

Fraction of idle time t_{pj_n} in the whole use cycle depending on the distance between the pile of branches and the wood chipper l_{rs_n}

Tabela.

Udział [%] czasu pracy jałowej w procesie rozdrabniania odpadów w zależności od odległości między rębakiem a stosem gałęzi podczas sterowania adaptacyjnego

Fraction [%] of idle time in the process of chopping waste depending on the distance between the chipper and the stack of branches during adaptive control

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	M
0,5 m	22	20	25	23	24	22	20	21	22	21	22
1,5 m	29	31	28	27	28	29	27	30	32	28	29
2,5 m	34	32	35	36	31	37	33	35	38	35	35

M – średnia; mean

topografię terenu w rzeczywistych warunkach eksploatacji, mogą być znacznie większe. Wynika stąd, że prowadzenie prac nad ograniczeniem zużycia energii i emisji szkodliwych związków podczas pracy jałowej jest uzasadnione, gdyż stanowi ona co najmniej 22%, a może wynosić nawet ponad 50% całego procesu eksploatacji urządzenia.

Na podstawie charakterystyki prędkości obrotowej (ryc. 3) można wskazać ewentualne wytyczne do opracowania algorytmów adaptacyjnych. Ze względu na procesy sterowania napędem spalinowym istotne jest, że badania wskazują również liczbę stanów nieustalonych silnika oraz charakter ich zmian. Sterowanie silnikami ze sprzężeniem zwrotnym opartym na pracy czujnika zawartości tlenu w gazach spalinowych jest możliwe w stanach ustalonych procesu, przy stałej prędkości obrotowej i stałym obciążeniu. Wynika stąd, że ze względu na ten parametr, czyli stabilne warunki pracy silnika spalinowego, odległość między stosem gałęzi a rębakiem wynosząca powyżej 1,5 m umożliwi korzystną eksploatację rębaka z układem adaptacyjnym, gdyż zapewni stabilną pracę jałową z małą prędkością obrotową podczas pracy jałowej. Gdy stos gałęzi znajduje się bliżej, praca w tym stanie charakteryzuje się brakiem sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, jednak należy pamiętać, że podczas opóźniania ruchu czas wtrysku przez większość tego stanu eksploatacji jest równy zeru, dzięki czemu nie dochodzi do zużycia paliwa i szkodliwych emisji spalin. Szacować można, że niezależnie od odległości stosu gałęzi od rębaka układ uwzględniający sterowanie zależne od warunków eksploatacji (dostarczania obciążenia układu) jest korzystny w aspekcie ekologiczno-ekonomicznym.

Wnioski

- ✦ Rozwiązania prawne związane z eksploatacją maszyn wykorzystywanych w gospodarce leśnej nie wymuszają najwyższych standardów ochrony środowiska i operatorów maszyn. Dostępne są rozwiązania techniczne umożliwiające ograniczenie oddziaływania na środowisko, jednak nie są one powszechnie stosowane przez producentów maszyn, gdyż nie wymagają tego przepisy homologacyjne.
- ✦ Zasadne są prace nad rozwojem systemu sterowania jednostkami napędowymi maszyn rozdrabniających, ukierunkowane na uwzględnienie wpływu warunków eksploatacji.
- ✦ Czas pracy biernej podczas procesów rozdrabniania może wynosić ponad 22% całkowitego czasu użytkowania, a w zależności od wielu zmiennych czas ten może przekraczać nawet połowę czasu użytkowania maszyny.
- ✦ Wyniki badań warunków eksploatacji maszyn rozdrabniających mogą wspomóc szacowanie kosztów i wydajności zabiegów agrokultury na terenach zadrzewionych.
- ✦ Rozwój jednostek napędowych maszyn rozdrabniających powinien być ukierunkowany na wyposażenie ich w elektroniczne układy wtryskowe z możliwością rozbudowy o układy adaptacyjne.

Literatura

- Bajor P., Trynkos M., Skłodowski J. W. 2018. Śmiertelność fauny na szlakach turystycznych w zależności od ich szerokości i położenia. *Sylwan* 162 (4): 325-332. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2018010>.
- Baldauf R., Fortune C., Weinstein J., Wheeler M., Blanchard F. 2006. Air contaminant exposures during the operation of lawn and garden equipment. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 16: 362-370. DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500471>.
- Czerwinski J., Kurzwart M., Mayer A., Comte P. 2014. Particle Emissions of Modern Handheld Machines. SAE Technical Paper. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-32-0036>.
- Dimou V., Anezakis V., Demertzis K., Iliadis L. S. 2017. Comparative analysis of exhaust emissions caused by chainsaws with soft computing and statistical approaches. *International Journal of Environmental Science and Technology* 3-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1555-0>.
- Gałęzia T. 2013. Bilans energetyczny oraz czasochłonność wybranych elementów w łańcuchu technologicznym pozyskiwania biomasy leśnej. *Sylwan* 157 (6): 419-424. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2012100>.
- Gendek A., Malatak J., Velebil J. 2018. Wpływ technologii pozyskania i składu zrębków leśnych na ich wartość opałową i zawartość popiołu. *Sylwan* 162 (3): 248-257. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2017125>.
- Hooper B., Parker R., Todoroki C. 2017. Exploring chainsaw operator occupational exposure to carbon monoxide in forestry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 14 (1): D1-D12.
- Kusiak W., Moliński K., Walkowiak R. 2012. Model zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna sosnowego. *Sylwan* 156 (3): 218-224. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2011039>.
- Kwaśna H., Łakomy P., Gornowicz R., Mikiciński A., Borowczyk-Behnke J., Gałązka S. 2015. Struktura zbiorowisk grzybów i bakterii w glebie 1-roczonej uprawy i 10-letniego młodnika w zależności od sposobu przygotowania gleby. *Sylwan* 159 (1): 71-81. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2014061>.
- Lijewski P. 2015. Exhaust emissions measurements from non-road vehicles. *Journal of Mechanical and Transport Engineering* 67 (1): 37-46.
- Liu S., Han W., Zeng J., Wang J. 2016. Analysis of combustion and emission characteristics of electronic controlled low pressure injected small gasoline engine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 32 (18): 92-97. DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.012>.
- Merkisz J., Lijewski P., Pielecha J. 2016. PEMS-based investigations into exhaust emissions from non-road and rail vehicles. *Combustion Engines* 166 (3): 46-53. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2016-339>.
- Piekutin J., Kłapeć B., Orzechowski M. 2015. Gęstość sieci dróg leśnych – ekonomiczny punkt widzenia. *Sylwan* 159 (3): 179-187. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2013117>.
- Regulation 2016/1628/UE of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016. On requirements for emission limit values of gaseous and particulate pollutants and type-approval with respect to internal combustion engines for mobile machines non-road, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013 and amending and repealing Directive 97/68/WE.
- Skłodowski J. 2010. Zgrupowania biegonozowych jako zoonidatory różnych sposobów przygotowania gleby na zrębach oraz ich zagospodarowania. *Sylwan* 154 (9): 625-638. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2010003>.
- Stańczykiewicz A., Sowa J. M., Leszczyński K., Kulak D., Szewczyk G. 2015. Uszkodzenia drzew i odnowienia w wyniku pozyskania drewna z użyciem urządzeń agregowanych z ciągnikami rolniczymi w trzebieżowych drzewostanach świerkowych. *Sylwan* 159 (3): 201-210. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2014070>.
- Szpica D., Czaban J. 2014. Operational assessment of selected gasoline and LPG vapour injector dosage regularity. *Mechanika* 20 (5): 480-489.
- Waluś K. J., Warguła Ł., Krawiec P., Adamiec J. M. 2018. Legal regulations of restrictions of air pollution made by non-road mobile machinery – the case study for Europe: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 25 (4): 3243-3259.
- Warguła Ł., Krawiec P., Waluś K. J. 2017d. Układ i sposób sterowania prędkością obrotową napędu rębaka do drewna. Zgłoszenie patentowe P.423369. Politechnika Poznańska.
- Warguła Ł., Krawiec P., Waluś K. J., Kukla M. 2017b. Conceptual design of adaptation of the mechanical fuel injection unit assembly for electronic control. *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 12: 1381-1386.
- Warguła Ł., Waluś K. J., Krawiec P. 2018b. Small engines spark ignited (SI) for non-road mobile machinery – review. *Transport Means 2018: Proceedings of the 22nd International Scientific Conference*. October 03-05, 2018, Trakai, Lithuania. Part 2: 585-591.
- Warguła Ł., Waluś K. J., Krawiec P. 2019. The problems of measuring the temperature of the small engines (SI) on the example of a drive for non-road mobile machines. *MATEC Web of Conferences* 254: 04004.
- Warguła Ł., Waluś K. J., Krawiec P., Kukla M. 2017c. Research of the ignition advance angle characteristics on the example of a German GX 390 combustion engine. *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 12: 1387-1391.

- Warguła Ł., Waluś K. J., Krawiec P., Polasik J. 2018a.** Electronic control injection-ignition systems in propulsion of non-road mobile machinery. *Journal of Mechanical and Transport Engineering* 70 (1): 61-78.
- Warguła Ł., Wojtkowiak D., Waluś K. J., Krawiec P., Wieczorek B. 2017a.** The analysis of the efficiency of the control system of Wood chipper's driver with spark-ignition engine based on Skoda combustion engine 1.4 59kW., *Transport Means 2017: Proceedings of the 21st International Scientific Conference*. September 20-22, 2017, Juodkrante, Lithuania. Part 2: 452-458.
- Więsik J. 1988.** Analiza wykorzystania maszyn i zużycie paliwa w nadleśnictwach. *Sylwan* 132 (2): 9-19.