

prof. dr hab. inż. Ryszard Michalski (ryszard.michalski@uwm.edu.pl)

mgr inż. Jarosław Gonera (jaroslaw.gonera@uwm.edu.pl)

mgr inż. Michał Janulin (michal.janulin@uwm.edu.pl)

Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn

Wydział Nauk Technicznych

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Ul. Oczapowskiego 11

10-736 Olsztyn

MODEL SYMULACYJNY ZMIAN ZUŻYCIA PALIWA CIĄGNIKA KOŁOWEGO W ASPEKCIE USZKODZEŃ

Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr N N504513740

Słowa kluczowe: ciągnik kołowy, model symulacyjny, uszkodzenie, zużycie paliwa.

Streszczenie: Stosowane obecnie elektroniczne systemy w ciągnikach kołowych służą do monitorowania i optymalizacji efektów pracy pod kątem jego wydajności i efektywności, natomiast brak jest systemów monitorujących zużycie paliwa w aspekcie uszkodzeń. Uszkodzenie można rozpatrywać na różnych poziomach złożoności maszyny, np. układów, zespołów węzłów konstrukcyjnych lub elementów. W pracy przyjęto klasyfikację uszkodzeń ze względu na ich skutki. Wyróżniono następujące klasy uszkodzeń: uszkodzenia funkcjonalne, emisyjne, zagrażające bezpieczeństwu, pogarszające dynamikę, którym przyporządkowano określone skutki. W pracy przygotowano model symulacyjny ciągnika kołowego, w którym uwzględniono charakterystyki trakcyjne opisujące zjawiska fizyczne związane z funkcjonowaniem ciągnika i mające wpływ na proces jego degradacji w określonych cyklach obciążeń. Przygotowano algorytm służący do określania zmian zużycia paliwa przy symulowanych uszkodzeniach ciągnika kołowego. Większość z uszkodzeń ciągnika kołowego ma wpływ na zużycie paliwa. Zużycie paliwa może być jednym z podstawowych parametrów diagnostycznych podczas oceny stanu technicznego pojazdu. W zależności od rodzaju uszkodzenia zmiany zużycia paliwa mogą być różne. W pracy przedstawiono przykładowe przebiegi symulacyjne niektórych uszkodzeń ciągnika kołowego na zużycie paliwa.

1. Wprowadzenie

Ciągnik rolniczy jest ciężkim pojazdem, który wykorzystywany jest do różnych zadań od uprawy do transportu w różnych warunkach. Niezależnie od realizowanych zadań, jednym z najważniejszych aspektów jest zapewnienie bezpieczeństwa pracy oraz minimalizacja kosztów [8]. Statystyczne dane obrazują, że wypadki związane z ciągnikami rolniczymi powodują około 300 ofiar śmiertelnych rocznie [17].

W pracy podjęto próbę opracowania modelu symulacyjnego zorientowanego na uszkodzenia elementów ciągnika kołowego i ocenę ich skutków.

Model symulacyjny ciągnika kołowego powinien pozwolić ocenić:

- stan spełniania funkcji w procesie realizacji zadań transportowych i operacyjnych,
- parametry efektywnej pracy,
- bezpieczeństwo w ruchu drogowym i polowym,
- emisyjność spalin w trakcie użytkowania.

Utrzymanie ciągnika w ciągłej zdatności jest niezwykle istotne w realizacji zadań sezonowych w rolnictwie i leśnictwie. Właściwe diagnozowanie stanu ciągnika pozwala m.in. na uzyskanie znacznej dyspozycyjności, obniżenie kosztów napraw oraz zmniejszenie przestojów. Dotychczas tworzone systemy służyły do monitorowania i optymalizacji parametrów pracy ciągnika pod kątem jego wydajności i efektywności, bądź ograniczały się do monitorowania pracy silnika i diagnostyki polegającej na odniesieniu wartości zmierzonych parametrów do wartości wzorcowych [1,16,18].

W pracy przyjęto, że diagnostyka uszkodzeń ciągnika kołowego obejmie procesy wykrywania, wyodrębniania i określania postaci uszkodzeń

- detekcję uszkodzenia (określa chwile wystąpienia)
- lokalizację uszkodzenia (określa rodzaj i miejsce wystąpienia)
- identyfikację uszkodzenia (określa rozmiaru i charakter zmienności parametrów diagnostycznych w czasie)

Właściwości fizyczne, chemiczne i mechaniczne gruntów uprawnych w Polsce północno-wschodniej są mocno zróżnicowane. Z tych względów wydajność mocy ciągnika jest ważnym i złożonym zagadnieniem. Wydajność ciągnika jest określana

przez wiele dynamicznych funkcji wejściowych, które zmieniają się w czasie. W chwili obecnej nie istnieją żadne metody ciągłego monitorowania wydajności ciągników kołowych, które odpowiadają za wszystkie straty energii. W celu optymalizacji wydajności ciągnika, powyższe wskaźniki muszą być określone on-line [7].

Wydajność ciągnika w rzeczywistych warunkach gleby różni się znacząco od wyników badań laboratoryjnych. Opory wynikające z ruchu pojazdu oraz przyczepność kół różnią się w zależności od nawierzchni, a ciągłe zmiany terenu oraz siły uciągu generują zmiany w dynamicznym obciążeniu na każdym kole [3].

Właściwości trakcyjne ciągników kołowych w dużej mierze zależą od współpracy pomiędzy kołem, a podłożem. Optymalne wykorzystanie pojazdu polega na zapewnieniu maksymalnej efektywności koła, nie przekraczając dopuszczalnych wartości poślizgu kół i uzyskaniu maksymalnej siły uciągu [15,19].

W związku z ochroną środowiska oraz z ograniczeniem zużycia oleju napędowego konieczne jest wprowadzenie nowego podejścia do symulacji eksploatacji pojazdów kołowych. Emisja szkodliwych substancji przez ciągniki kołowe ma ogromny wpływ na produkcję roślinną oraz środowisko i stwarza duże zagrożenia [4,5,9].

Inteligentne systemy diagnozowania maszyn są intensywnie rozwijane w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Złożoność nowoczesnych ciągników kołowych wymusza konieczność monitorowania w czasie rzeczywistym ich stanu oraz wprowadzenie automatycznego wykrywania niezdatności [6].

2. Klasyfikacja uszkodzeń ciągników kołowych

Uszkodzenie występuje wówczas, gdy co najmniej jedna z przyjętych mierzalnych lub niemierzalnych cech charakteryzujących stan ciągnika przestaje spełniać wymagania niezbędne do poprawnego jego funkcjonowania [14].

Zatem uszkodzenie określa utratę zdolności ciągnika kołowego do wypełniania wymaganych funkcji [PN-93/N-50191]. Uszkodzenie można rozpatrywać na różnych poziomach złożoności maszyny, np. układów, zespołów węzłów konstrukcyjnych lub elementów [12].

W diagnostyce uszkodzeń ciągnika kołowego przyjęto klasyfikację uszkodzeń ze względu na ich skutki [10]:

- uszkodzenia funkcjonalne (uf), powodujące ograniczenie efektywności pracy (mocy momentu, siły uciągu, prędkości roboczej, zużycia paliwa),

- uszkodzenia emisyjne (ue) wywołujące wzrost emisji związków toksycznych (oraz hałasu) i zużycie paliwa spowodowane niezdatnością elementów układu zasilania, układu spalania silnika ZS i zespołów przekazania napędu,
- uszkodzenia zagrażające bezpieczeństwu ruchu (us) ciągnika występujące w takich układach jak: hamulcowy, zawieszenia, kierowniczy lub oświetlenia.
- uszkodzenia pogarszające dynamikę (ud) ciągnika kołowego, które pogarszają parametry ruchu ciągnika takie jak: zmniejszenie przyśpieszenia, opóźnienie reakcji na zmianę ruchu, nierównomierność lub znaczny spadek mocy, momentu siły napędowej itp.

Podczas monitorowania stanu pracy wystąpienie poszczególnych uszkodzeń powinno zostać zasygnalizowane, operator powinien otrzymać informację jaki jest to rodzaj niezdatności i jakiego rodzaju elementu dotyczy.

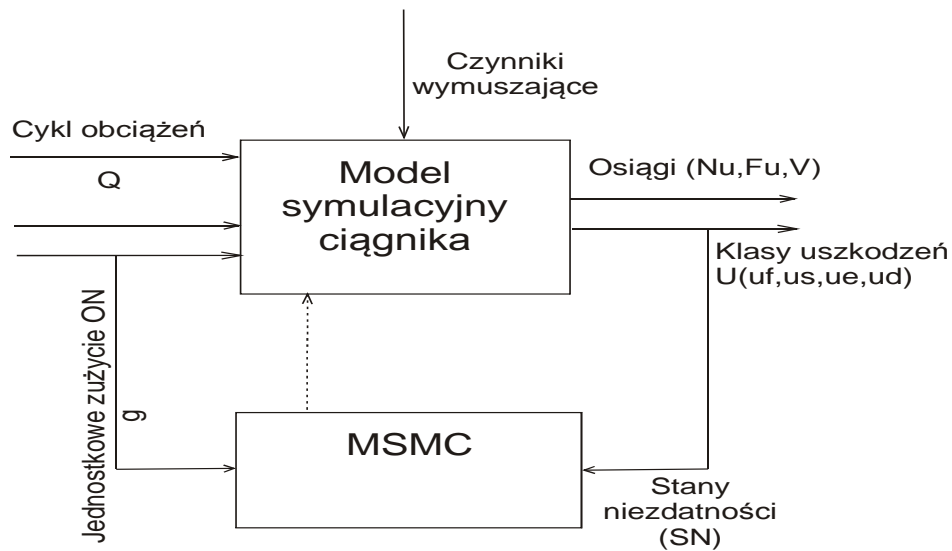
W ciągnikach kołowych przyjętym klasom uszkodzeń przyporządkowano następujące skutki:

- **skutki uszkodzeń funkcjonalnych (uf):** przegrzewanie się bądź ślizganie sprzęgła ciernego, nadmierne obciążenie skrzyni przekładniowej powodujące jej przegrzewanie, nadmierne zużycie węzłów łożyskowych skrzyni przekładniowej powodujące wzrost temperatury układu, nadmierne obciążenie reduktora powodujące jego przegrzewanie, nadmierne zużycie węzłów łożyskowych reduktora powodujące wzrost temperatury układu, nadmierne obciążenie przekładni głównej powodujące jej przegrzewanie i zacieranie satelitów w mechanizmie różnicowym, uszkodzenia ułożyskowania wałka atakującego i koła talerzowego powodujące wzrost temperatury układu, nadmierne obciążenie zwolnic kół tylnych powodujące ich przegrzewanie, pęknięcie obudowy zwolnicy, nadmierne zużycie łożysk powodujące wzrost temperatury układu, niekontrolowane ubytki powietrza w kołach przedniej i tylnej osi, nieszczelności w układzie dolotowym, zużycie turbosprężarki, przegrzewanie się silnika, uszkodzenia układu chłodzącego, przegrzewanie się silnika, praca pod zbyt dużym obciążeniem, zużycie tulei cylindrowych, zużycie pierścieni tłokowych, nieszczelności gniazd i zaworów, zużycie silnika, nierównomierności zużycia występujące w poszczególnych cylindrach, spadek wydatku pompy olejowej, niewłaściwe ciśnienie podawane przez pompę olejową, znaczne luzy na panewkach układu korbowo-tłokowego, nieprawidłowy spadek ciśnienia oleju w układzie smarowania silnika.

- **skutki uszkodzeń emisyjnych (ue):** ubytki oleju przekładniowego, pęknięcie obudowy przekładni, ubytki oleju przekładniowego, pęknięcie obudowy reduktora, ubytki oleju przekładniowego, pęknięcie obudowy przekładni głównej, niekontrolowane ubytki powietrza w kołach przedniej i tylnej osi, nieszczelności w układzie dolotowym, przegrzewanie się silnika, awarie układu chłodzącego, ubytek płynu chłodzącego, zużycie pierścieni tłokowych, nieszczelności gniazd i zaworów, zużycie silnika, nierównomierności zużycia występujące w poszczególnych cylindrach, zalewanie przez któryś z wtryskiwaczy, nieprawidłowości przebiegu procesu spalania, nieprawidłowe rozpylanie dawki paliwa, zużycie końcówki wtryskiwacza, ubytki oleju silnikowego, spalanie oleju silnikowego przez silnik.
- **skutki uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu (us):** nadmierne luzy w układzie kierowniczym, uszkodzenia żarówek w układzie oświetlenia, uszkodzenia wycieraczek, uszkodzenia sygnału dźwiękowego, ubytki płynu hamulcowego, zbyt mała siła hamowania, zbyt małe ciśnienie w układzie hamulcowym, zapowietrzenie układu hamulcowego, spadek wydatku pompy hamulcowej, zużyte okładziny cierne, niekontrolowane ubytki powietrza w kołach przedniej i tylnej osi, przebicie opon, nieszczelności wentyli, usterki pompy olejowej
- **skutki uszkodzeń pogarszających dynamikę (ud):** przegrzewanie się bądź ślizganie sprzęgła ciernego, ścięcie zębów skrzyni przekładniowej, ścięcie zębów w reduktorze, ścięcie zębów przekładni głównej, ścięcie zębów zwolnic, nieszczelności w układzie dolotowym, uszkodzenia turbosprężarki, zużycie tulei cylindrowych, zużycie pierścieni tłokowych, nieszczelności gniazd i zaworów, zużycie silnika, nierównomierności zużycia występujące w poszczególnych cylindrach, zalewanie przez któryś z wtryskiwaczy, nieprawidłowości przebiegu procesu spalania, nieprawidłowe rozpylanie dawki paliwa, zużycie końcówki wtryskiwacza.

3. Model symulacyjny uszkodzeń ciągnika kołowego

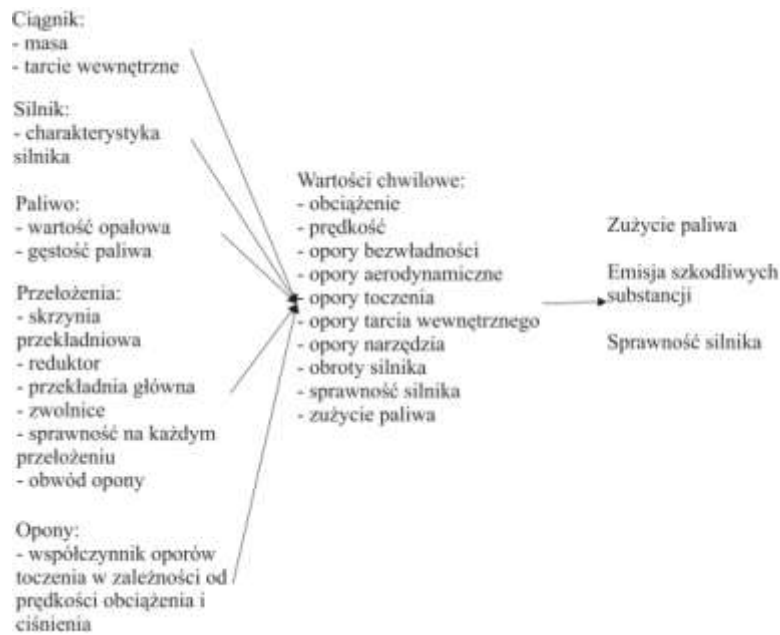
Istota systemu symulującego uszkodzenia ciągnika kołowego w odniesieniu do zużycia oleju napędowego (ON) dla sklasyfikowanych uszkodzeń: (u_f), (u_e), (u_s) i (u_d). W przyjętym modelu ciągnika kołowego uwzględniono charakterystyki trakcyjne opisujące zjawiska fizyczne związane z funkcjonowaniem ciągnika i mające wpływ na proces jego degradacji w określonych cyklach obciążeń (rys.1.).



Rys.1. Schemat badania stanu ciągnika z wykorzystaniem projektowanego mechatronicznego systemu monitorowania jego stanu (MSMC) gdzie: g - jednostkowe zużycie paliwa; N_U - moc uciągu; F_U - siła uciągu; V - prędkość; S_N - stany niezdatności, Q - obciążenia; u - klasy uszkodzeń. [13]

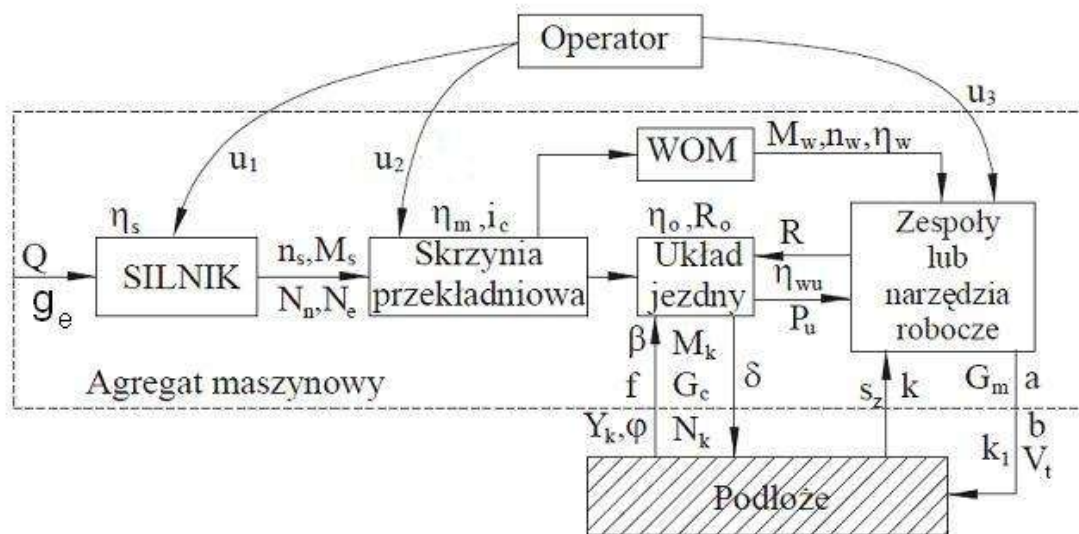
Zatem stan pracy ciągnika uzależniony jest od: prędkości jazdy, oporów ruchu (własnych i narzędzi), masy, przełożeń w układzie napędowym, konstrukcji układu napędowego, promienia dynamicznego kół napędowych itp. Z kolei na intensywność uszkodzeń elementów ciągnika kołowego w eksploatacji mają wpływ: rozkład i intensywność obciążeń cyklu pracy oraz wytrzymałość materiału elementów konstrukcyjnych.

Jako podstawę do budowy modelu symulacyjnego ciągnika przyjęto następujący układ zależności funkcyjnych podany na rysunku 2.



Rys.2. Układ powiązań parametrów technicznych ciągnika w modelu symulacyjnym uszkodzeń

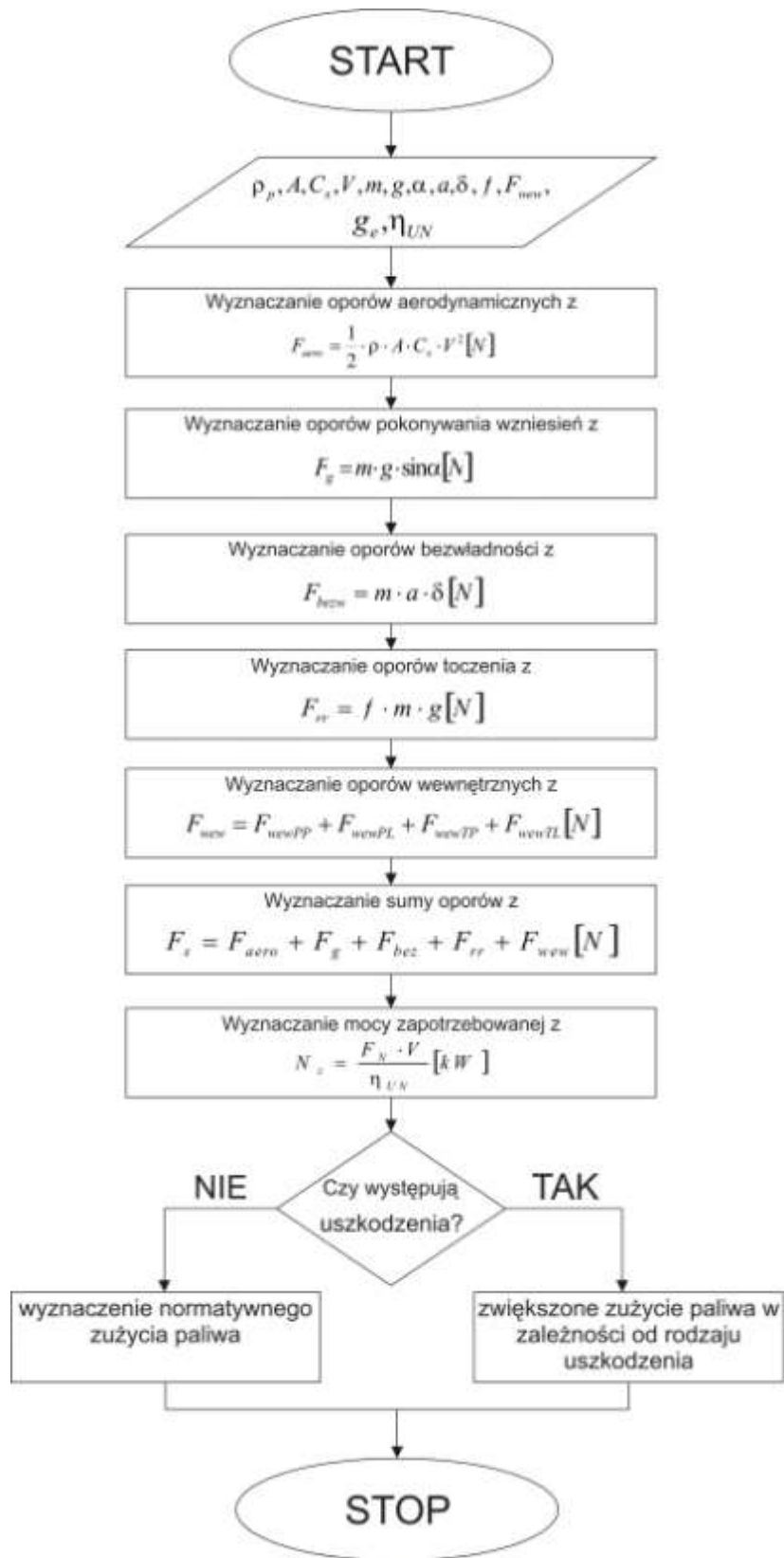
Na rysunku 3 przedstawiono schemat funkcjonalny ciągnika kołowego.



Rys.3. Schemat funkcjonalny ciągnika kołowego w procesie monitorowania parametrów pracy obiektu [11]: β - nachylenie terenu (pochyłość), δ - poślizg kół napędowych, φ - współczynnik przyczepności kół, η_m - sprawność mechaniczna, η_o - sprawność trakcyjna (ogólna), η_s - sprawność silnika, η_{wu} - współczynnik wykorzystania siły uciągu, a - szerokość elementu roboczego, b - głębokość elementu roboczego, f - współczynnik oporu toczenia ciągnika, M_w - moment obrotowy na WOM, n_w - prędkość obrotowa na WOM, η_w - sprawność WOM, g_e - jednostkowe zużycie paliwa, G_c - masa ciągnika, G_m - masa maszyny, i_c - przełożenie całkowite danego biegu, k - opór jednostkowy gleby, k_1 - opór jednostkowy narzędzia, M_k - moment na kołach napędowych, M_s - moment obrotowy na wale silnika, N_e - moc efektywna, N_k - moc na kołach napędowych, N_n - moc nominalna silnika, n_s - prędkość obrotowa silnika, P_u - siła uciągu, Q - czasowe zużycie paliwa, s_z - poziom zakamienienia pola, u_1 - dawka podawanego paliwa, u_2 - dysponowany zakres przełożeń skrzyni biegów, u_3 - wybór sposobu pracy

agregatu, Y_k – obciążenie kół napędowych, V_t – prędkość robocza agregatu R - opory narzędzi, R_0 – opory w układzie napędowym, WOM – wałek odbioru mocy.

Na rysunku 4 przedstawiony jest algorytm wykorzystywany do określania zużycia paliwa przy symulowanych uszkodzeniach ciągnika kołowego.



Rys.4. Algorytm wykorzystywany do określania zużycia paliwa przy symulowanych uszkodzeniach ciągnika kołowego g_e – jednostkowe zużycie paliwa; ρ_p – gęstość paliwa; ρ – gęstość powietrza; A – powierzchnia czołowa ciągnika; C_x – współczynnik aerodynamiczny; V – prędkość; m –

masa; g – przyspieszenie ziemskie; α – kąt nachylenia drogi; a – przyspieszenie; δ – współczynnik mas wirujących; f – współczynnik oporów toczenia; F_{wew} – oporu wewnętrzne poszczególnych kół; η_{UN} – sprawność układu napędowego.

Model symulacji uszkodzeń ciągnika kołowego pozwala identyfikować uszkodzenia w zależności od skutków (zużycia paliwa), co przedstawiono zależnością:

$$G_V = \frac{g_e}{1000 \rho_p} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_x \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot a \cdot \delta + f \cdot m \cdot g + F_{wewPP} + F_{wewPL} + F_{wewTP} + F_{wewTL} \right) \cdot \frac{V}{\eta_{UN}} \quad (1)$$

Na podstawie analizy zależności określonych wzorem (1) można stwierdzić wpływ określonych oporów ruchu (aerodynamicznych, wynikających z nachylenia drogi, bezwładności, toczenia oraz oporów wewnętrznych kół) na zmiany zużycia paliwa.

Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na wprowadzenie do ciągników kołowych systemów automatycznego sterowania, które zastępują operatora pojazdu w procesie kierowania. Pozwala to w dużym stopniu wybrać najbardziej efektywną eksploatację pojazdu, ograniczając zużycie paliwa i lepiej wykorzystując, niezbędny do wykonania zadania rolniczego, moment obrotowy i moc silnika. Także w chwili pojawienia się niezdatności pojazdu układ elektroniczny wykryje je bardzo szybko i nie dopuści do długotrwałego wzrostu zużycia paliwa oraz rozwoju uszkodzenia ciągnika kołowego [2].

4. Ocena wpływu uszkodzeń na zużycia ON przez ciągnik kołowy z wykorzystaniem modelu symulacyjnego

Większość z uszkodzeń ciągnika kołowego ma wpływ na zużycie paliwa. Zużycie paliwa może być jednym z podstawowych parametrów diagnostycznych podczas oceny stanu technicznego pojazdu. W zależności od rodzaju uszkodzenia zmiany zużycia paliwa mogą być różne. Pewne klasy uszkodzeń ciągników kołowych powodują intensywny wzrost zużycia paliwa np.: nieszczelności w układzie dolotowym, awaria turbosprężarki, nieprawidłowości przebiegu procesu spalania, uszkodzenia wtryskiwaczy. Można wyróżnić również uszkodzenia powodujące średni wzrost zużycia paliwa jak np.: przegrzewanie się silnika. Uszkodzeniami powodującymi niewielki wzrost zużycia paliwa są np.: niewłaściwe ciśnienie podawane przez pompę olejową, znaczne luzy na panewkach układu korbowo-tłokowego, ubytki oleju

przekładniowego. Występują również uszkodzenia, które wpływają na wzrost zużycia paliwa, lecz w sposób zmienny w zależności od obciążenia silnika, np.: zużycie pierścieni tłokowych, nieszczelności gniazd i zaworów, niezdatności pompy olejowej, przegrzewanie się bądź ślizganie sprzęgła ciernego. W tej części pracy przedstawiono przykładowe przebiegi symulacyjne niektórych uszkodzeń ciągnika kołowego na zużycie paliwa.

Ścięcie zębów skrzyni przekładniowej może być identyfikowane na podstawie następujących symptomów: obniżenia sprawności skrzyni przekładniowej, obniżenia sprawności układu napędowego oraz wzrostu zużycia paliwa przy próbie zachowania tego samego momentu na kołach oraz tych samych osiągów (rys. 5 i 6).

$$\eta_{UN} = \eta_{sprz.} \cdot \eta_{skrz.pl.} \cdot \eta_{skrz.przek.} \cdot \eta_{red.} \cdot \eta_{przek.gl.} \cdot \eta_{zwol.}$$

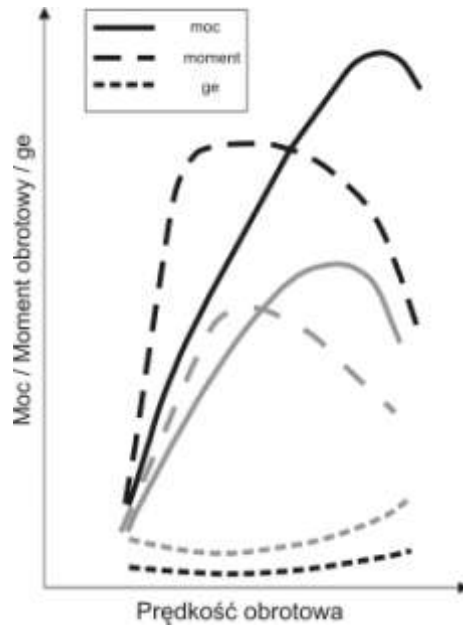
$$G_V = \frac{g_e}{1000 \cdot \rho_p} (F_{aero} + F_g + F_{bez} + F_{rr} + F_{wew}) \cdot V \cdot \eta_{UN}$$

Rys.5. Wzór przedstawiający wpływ ścięcia zębów skrzyni przekładniowej na zmianę zużycia paliwa



Rys.6. Symptomy diagnostyczne ścięcia zębów skrzyni przekładniowej

Nieszczelności w układzie dolotowym, uszkodzenie turbosprężarki są identyfikowane na podstawie następujących symptomów: spadku mocy, obniżenia wartości momentu obrotowego, wzrostu jednostkowego zużycia paliwa oraz wzrostu zużycia paliwa przy próbie zachowania tego samego momentu na kołach oraz tych samych osiągow (rys. 7-9).



Rys.7. Wykres przedstawiający wpływ nieszczelności w układzie dolotowym oraz uszkodzenia turbosprężarki na charakterystykę silnika (kolorem czarnym zaznaczono przebieg charakterystyki silnika sprawnego, kolorem szarym – silnika niesprawnego)

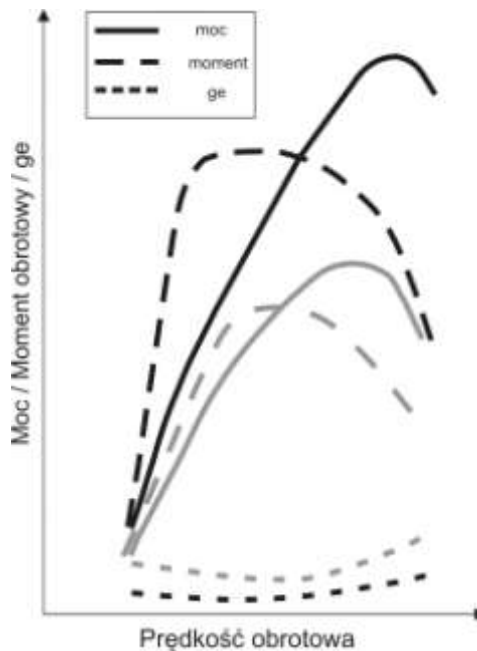
$$G_V = \frac{g_e}{1000 \cdot \rho_p} (F_{aero} + F_g + F_{bez} + F_{rr} + F_{wev}) \frac{V}{\eta_{UN}}$$

Rys.8. Wzór przedstawiający wpływ nieszczelności w układzie dolotowym oraz uszkodzenia turbosprężarki na zmianę zużycia paliwa



Rys.9. Symptomy diagnostyczne nieszczelności w układzie dolotowym oraz uszkodzenia turbosprężarki

Nieprawidłowe rozpylenie dawki paliwa można identyfikować na podstawie następujących symptomów: spadku mocy, obniżenia wartości momentu obrotowego, wzrostu jednostkowego zużycia paliwa, wzrostu zużycia paliwa przy próbie zachowania tego samego momentu na kołach oraz tych samych osiągow (rys. 10 i 11).

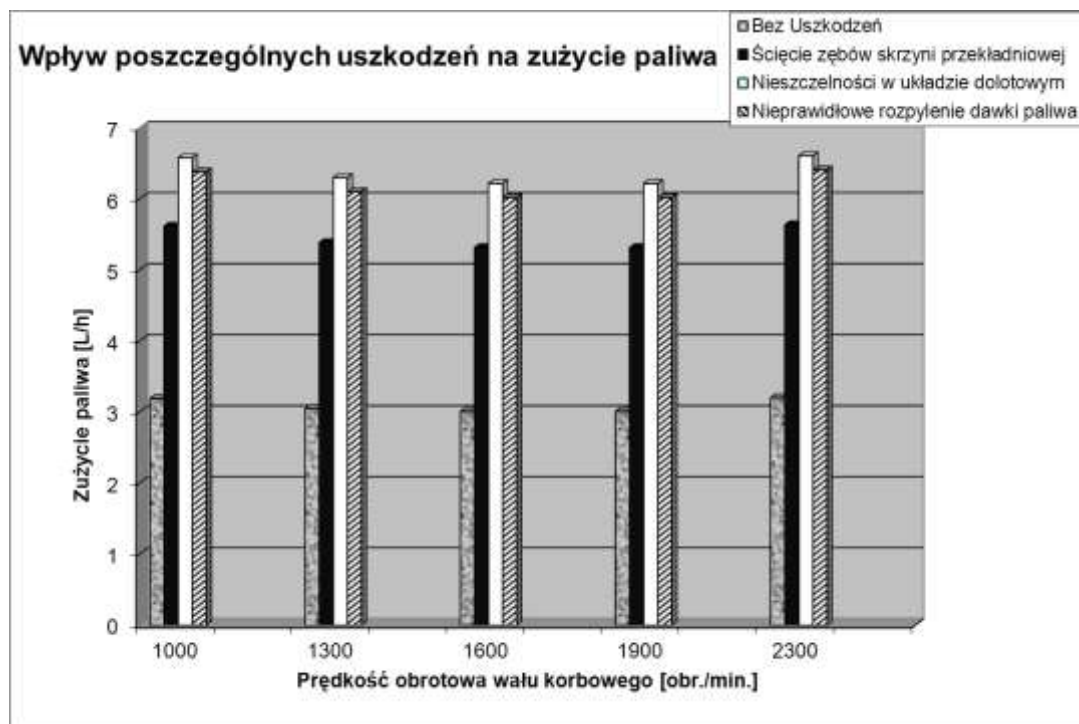


Rys.10. Wykres przedstawiający wpływ nieprawidłowego rozpylenia dawki paliwa na charakterystykę silnika (kolorem czarnym zaznaczono przebieg charakterystyki silnika sprawnego, kolorem szarym – silnika niesprawnego)



Rys.11. Symptomy diagnostyczne nieprawidłowego rozpylenia dawki paliwa

Zmiany godzinowego zużycia paliwa w odniesieniu do ustalonych wartości prędkości obrotowej silnika przy symulowanych uszkodzeniach zaprezentowano na wykresie (rysunek 12).



Rys.12. Wykres przedstawiający zależność zmian zużycia od symulowanych uszkodzeń: Ciągnik kołowy nie posiadał uszkodzeń, Ścięcie zębów skrzyni przekładniowej, Nieszczelności w układzie dolotowym, Nieprawidłowe rozpylenie dawki paliwa.

6. Podsumowanie

Model symulacyjny stanowi podstawę do opracowania systemu diagnostycznego ciągnika kołowego zorientowanego na określone cztery klasy uszkodzeń.

Przy wykorzystaniu modeli symulacyjnych istnieje możliwość identyfikacji uszkodzeń funkcjonalnych, emisyjnych, zagrażających bezpieczeństwu oraz pogarszających dynamikę ciągnika kołowego. Potwierdzają to przykładowe symulacje, które zostały przedstawione w pracy.

Opracowany model diagnostyczny umożliwia identyfikację stanu technicznego ciągników kołowych poprzez określenie zmian zużycia paliwa co może być wykorzystywane do sterowania procesem eksploatacji pojazdu. Zużycie paliwa jest podstawowym parametrem diagnostycznym podczas identyfikacji stanu technicznego pojazdu.

Model symulacyjny pozwoli na właściwy dobór softwaru i hardware'u do systemu diagnostycznego ciągnika kołowego.

7. Literatura

1. Alvarez I, Huet S. Automatic diagnosis of engine of agricultural tractors: The BED experiment. *Biosystems Engineering* 2008:100.
2. Carrera González A, Alonso García S, Gómez Gil J. Design, Development and Implementation of a Steering Controller Box for an Automatic Agricultural Tractor Guidance System, Using Fuzzy Logic. *Technological Developments in Education and Automation* 2010.
3. Catalan H, Linares P, Mendez V. Tractor_PT: A traction prediction software for agricultural tractors. *Computers and Electronics in Agriculture* 2008 Vol. 60.
4. Dyer J, Desjardins R. Carbon Dioxide Emissions Associated with the Manufacturing of Tractors and Farm Machinery in Canada. *Biosystems Eng.* 93 2006: 107-118.
5. Dyer J, Desjardins R. Simulated Farm Fieldwork, Energy Consumption and Related Greenhouse Gas Emissions in Canada. *Biosystems Eng.* 85 2003: 503-513.

6. Gao L, Ren Z, Tang W, Wang H, Chen P. Intelligent Gearbox Diagnosis Methods Based on SVM, Wavelet Lifting and RBR. *Sensors* 2010.
7. Kolator B, Białobrzewski I. A simulation model of 2WD tractor performance. *Computers and Electronics in Agriculture* 2011 Vol. 76.
8. Kumar A, Pandey K P. A device to measure dynamic front wheel reaction to safeguard rearward overturning of agricultural tractors. *Computers and Electronics in Agriculture* 2012 Vol. 87.
9. Lindgren M. A Transient Fuel Consumption Model for Non-road Mobile Machinery *Biosystems Eng.* 91 2005: 139-147.
10. Michalski R, Gonera J, Janulin M, Arendt R. Structural analysis of a wheeled tractor oriented towards damage diagnostics. *Monografie, studia, rozprawy* 2012: M29.
11. Michalski R, Gonera J. Monitoring the operation of a wheeled tractor. *Zeszyty naukowe Nauki Techniczne – Budowa i eksploatacja maszyn* 2012: 17.
12. Michalski R, Janulin M. Analiza diagnostyki użytkowej ciągników kołowych. *Monografie, studia, rozprawy* 2012: M29.
13. Michalski R. Mechatroniczny system monitorowania stanu ciągnika kołowego. *Biuletyn WAT* 2011: Vol. LX, nr 1.
14. Michalski R. pod red. *Diagnostyka maszyn roboczych* 2004.
15. Pranav P K, Pandey K P, Tewari V K. Digital wheel slipmeter for agricultural 2WD tractors. *Computers and Electronics in Agriculture* 2010: 73.
16. Pranav P K, Tewari V K, Pandey K P, Jha K R. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors. *Computers and Electronics in Agriculture* 2012: 84.
17. Rautiainen R H, Reynolds S J. Mortality and morbidity in agriculture in the United States. *Journal Agricultural Safety Health* 2002: Vol. 8 (3).
18. Singh C D, Singh R C. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field. *Journal of Terramechanics* 2011: 48.
19. Żebrowski J. Traction efficiency of a wheeled tractor in construction operations. *Automation in Construction* 2010: Vol. 19.