



## Modele relacji diagnostycznych w diagnozowaniu ciągnika kołowego

RYSZARD MICHALSKI, MICHAŁ JANULIN, JAROSŁAW GONERA

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych,  
Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn,  
10-719 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 2, ryszard.michalski@uwm.edu.pl,  
jaroslaw.gonera@uwm.edu.pl, michal.janulin@uwm.edu.pl

**Streszczenie.** Wprowadzane do produkcji nowoczesne ciągniki kołowe posiadają układy elektryczne i elektroniczne nowej generacji do sterowania pracą zespołów wykonawczych. Wymaga się również opracowania pokładowego systemu monitorowania w czasie rzeczywistym rozwoju uszkodzeń funkcjonalnych, emisyjnych, bezpieczeństwa i dynamiki ruchu. Ma to szczególne znaczenie dla odzworowania rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych przez mechatroniczny system diagnostyczny ciągnika, w określonych sytuacjach eksploatacyjnych przy bieżącej dostępności informacji.

W procesie diagnozowania uszkodzeń ciągników metody inżynierii wiedzy nie zostały jeszcze opracowane, a ich możliwości zdają się być wręcz nieograniczone. Definiując pojęcie uszkodzenia, jako zdarzenia wpływającego negatywnie na efektywność funkcjonowania maszyn, które powinno być wykryte wraz z określeniem rodzaju, miejsca i czasu występowania oraz rozmiaru i charakteru zmienności w czasie, można ogólnie stwierdzić, że wiedza diagnostyczna jest symbolicznym opisem przedmiotu, charakteryzującym empiryczne relacje, a na ich podstawie tworzone są procedury diagnostyczne.

Tworzenie relacji diagnostycznych na podstawie różnych metod i źródeł informacji pozwoli na ustalenie zarówno wiarygodnej wiedzy deklaratywnej w postaci faktów, relacji diagnostycznych stan–symptom, jak i wiedzy proceduralnej, na podstawie której opiera się wnioskowanie w systemach diagnostycznych.

W celu określenia relacji diagnostycznych symptom–uszkodzenia konieczne jest stworzenie bazy wiedzy zawierającej uszkodzenia poszczególnych zespołów i podzespołów ciągnika kołowego, które mogą wystąpić. Bazę wiedzy diagnostycznej można stworzyć na podstawie zidentyfikowanych relacji diagnostycznych, uzyskanych m.in. w badaniach symulacyjnych uszkodzeń.

Jednym z istotnych elementów budowy mechatronicznego systemu diagnostycznego ciągnika kołowego było ustalenie odpowiednich relacji diagnostycznych pomiędzy uszkodzeniami a parametrami diagnostycznymi. Uznano, że każdemu uszkodzeniu ciągnika kołowego może być przyporządkowany

tylko jeden zbiór symptomów diagnostycznych, pozwala to dokładnie i szybko ustalić, które uszkodzenie wystąpiło w danej chwili. Symptomy diagnostyczne są identyfikowane przy pomocy zestawu czujników po przekroczeniu założonych progów pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, ciągnik kołowy, relacje diagnostyczne

## 1. Wstęp

W większości eksploatowanych na terenie Polski ciągników starszej generacji nie jest prowadzona diagnostyka w czasie rzeczywistym i nie są monitorowane parametry pracy. Natomiast kontrola stanu technicznego przeprowadzana jest tylko podczas okresowych przeglądów technicznych, które dla ciągników odbywają się co dwa lata na stacjach kontroli pojazdów.

Wprowadzane do produkcji nowoczesne ciągniki kołowe posiadają układy elektryczne i elektroniczne nowej generacji do sterowania pracą zespołów wykonawczych. Wymaga się również opracowania pokładowego systemu monitorowania on-line rozwoju uszkodzeń funkcjonalnych, emisyjnych, bezpieczeństwa i dynamiki ruchu. Ma to szczególne znaczenie dla odwzorowania rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych przez system diagnostyczny ciągnika w określonych sytuacjach eksploatacyjnych przy bieżącej dostępności informacji.

W pracy przedstawiono sposób tworzenia relacji diagnostycznych systemu diagnostyki ciągnika kołowego z wykorzystaniem komputerowego symulatora uszkodzeń.

## 2. Budowa relacji diagnostycznych

W procesie diagnozowania uszkodzeń ciągników metody inżynierii wiedzy nie zostały jeszcze opracowane, a ich możliwości zdają się być wręcz nieograniczone. Definiując pojęcie uszkodzenia, jako zdarzenia wpływającego negatywnie na efektywność funkcjonowania maszyn, które powinno być wykryte wraz z określeniem rodzaju, miejsca i czasu występowania oraz rozmiaru i charakteru zmienności w czasie, można ogólnie stwierdzić, że wiedza diagnostyczna jest symbolicznym opisem przedmiotu, charakteryzującym empiryczne relacje, a na ich podstawie tworzone są procedury diagnostyczne.

Wiedza ta składa się z faktów, relacji i procedur. W ujęciu matematycznym zagadnienie diagnozowania można przedstawić jako zagadnienie poszukiwania relacji  $R$  (stosunków) między „uszkodzeniami (stanami niezdatności) a symptomami diagnostycznymi” o ich określonych własnościach. W tym przypadku istnieje zależność przyczynowo-skutkowa pomiędzy stanami niezdatności  $f_i \subset F$  określonych elementów maszyn a symptomami  $s_j$  reprezentowanymi przez zbiór  $S$ . Tak więc można wyróżnić następujące postacie relacji:

$R: \{s_j\} \Rightarrow f_i$  — relacja jednoznaczna (zbiór symptomów identyfikuje konkretny stan);

$R: \{s_j\} \Rightarrow \{f_i\}_{jk}$  — relacja wieloznaczna.

Charakterystyczną cechą metody inżynierii wiedzy jest posługiwanie się symboliczną reprezentacją wiedzy (dziedziczną i ekspertową) oraz wykorzystywanie mechanizmów automatycznego wnioskowania.

Wykorzystywane są tutaj modele numeryczne, wiedza niepewna, niepełna, rozmyta czy też jakościowa. Wspólnym łącznikiem metod inżynierii wiedzy diagnostycznej jest logika matematyczna ze szczególnym uwzględnieniem teorii relacji.

Najczęściej w literaturze problem tworzenia relacji diagnostycznych sprowadza się do dialogu między ekspertem w danej dziedzinie a tzw. inżynierem wiedzy. Tymczasem liczba możliwych źródeł wiedzy będących do dyspozycji jest znacznie większa. Takie podejście do procesu pozyskiwania wiedzy, w sensie tworzenia relacji diagnostycznych, obejmuje wybór metod na podstawie:

- specjalistycznych informacji technicznych producenta i eksploatorów maszyn,
- badań eksperymentalnych symptomów niezdatności i uszkodzeń maszyn,
- badań ekspertowych symptomów (objawów) uszkodzeń maszyn,
- modeli fizycznych układów mechanicznych zorientowanych na symptomy niezdatności,
- zidentyfikowanych modeli matematycznych zorientowanych na uszkodzenia.

Tworzenie relacji diagnostycznych na podstawie różnych metod i źródeł informacji pozwoli na ustalenie zarówno wiarygodnej wiedzy deklaratywnej w postaci faktów, relacji diagnostycznych stan–symptom, jak i wiedzy proceduralnej, na podstawie której opiera się wnioskowanie w systemach diagnostycznych.

Przyjmując, że wiedza to uporządkowany zbiór informacji, zatem przez pozyskiwanie wiedzy (diagnostycznej) należy rozumieć zarówno proces pozyskiwania informacji diagnostycznej (zbioru informacji), jak i proces tworzenia modelu jej efektywnego wykorzystania (uporządkowanie tego zbioru).

Informację diagnostyczną o stanie ciągnika kołowego można przedstawić w postaci:

$$f_i \Rightarrow U_\rho; U_i = \{u_{n,i}\}, \quad (1)$$

gdzie:  $U_i$  — zbiór cech  $i$ -tego stanu niezdatności;

$u_{n,i}$  —  $n$ -ta cecha  $i$ -tego stanu niezdatności (uszkodzenia).

Na iloczynnie kartezjańskim zbiorów  $F$  i  $X$  można określić relacje  $R_{XF}$ :

$$R_{XF} \subset X \times F, \quad (2)$$

gdzie:  $X$  — zbiór zmiennych procesowych;  
 $F$  — przestrzeń stanów maszyny.

Istotą procesu diagnozowania w tym przypadku jest odwzorowanie przestrzeni wartości zmiennych procesowych  $X$  w przestrzeni stanów  $F$  maszyny.

W diagnostyce maszyn wykorzystuje się różne rodzaje relacji pomiędzy stanami (uszkodzeniami) a ich symptomami, które zasadniczo można sprowadzić do dwóch klas:

- relacje równoważne  $R_R$ , zwane klasycznymi, które mają cechy relacji zwrotnej, symetrycznej i przechodniej o funkcji charakterystycznej  $\mu_R \in [0, 1]$ ,

$$\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } (x_1, \dots, x_n) \in R \\ 0 & \text{gdy } (x_1, \dots, x_n) \notin R \end{cases}, \quad (3)$$

tzn. relacja całkowitego przyporządkowania  $\leq$ .

- relacje rozmyte o funkcji charakterystycznej rozszerzonej do przedziału  $[0, 1]$  jako par

$$\mu_R(x_1, \dots, x_n) / (x_1, \dots, x_n). \quad (4)$$

Wówczas:

$$R = \sum \mu_R(X, f) / (X, f) \quad (5)$$

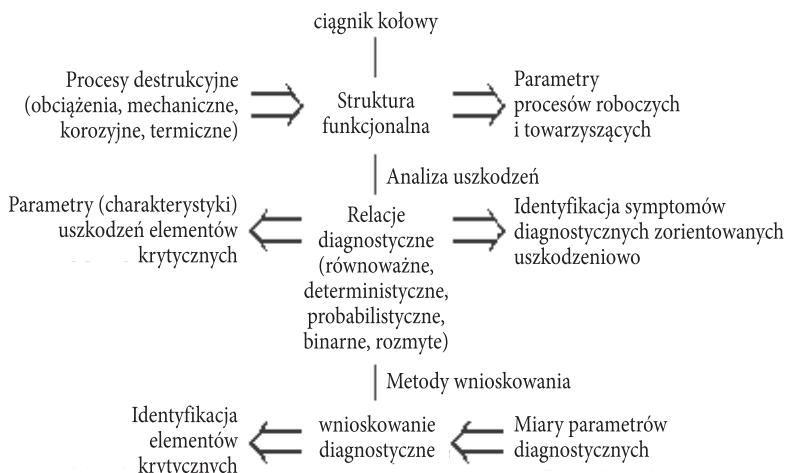
jest relacją różnej funkcji przynależności ( $\subseteq$  częściowego porządku) spełniającej dwie pierwsze cechy relacji równoważnej (zwrotne i symetryczne). Klasyczne pojęcie relacji jest szczególnym przypadkiem relacji rozmytej, gdy stopnie przynależności są równe tylko 0 i 1.

Słabość klasycznych technik ilościowych przy opisywaniu zjawisk złożonych została wykorzystana w zasadzie niespójności sformułowanej przez L. Zadeha. Do tej klasy zagadnień należy z pewnością inżynieria wiedzy diagnostycznej oparta na relacjach „uszkodzenie–symptom”.

$$R \subset \left[ (x_{i,1}, U_i) \wedge (x_{i,2}, U_2) \dots (x_{i,n}, U_i) \Rightarrow (f_i, y_{i,w}) \right], \quad (6)$$

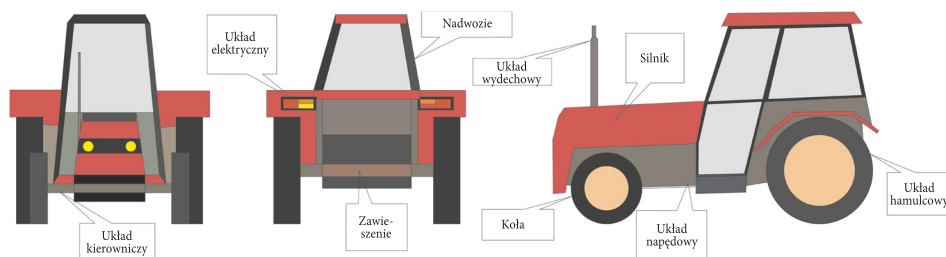
gdzie:  $R$  — zbiór relacji;  
 $U_n$  — zbiór cech  $n$ -tej zmiennej;  
 $x_{i,n}$  —  $n$ -ty element zbioru zmiennych procesowych  $i$ -tego stanu niezdatności;  
 $f_i$  —  $i$ -ty stan maszyny;  
 $y_{i,w}$  — ocena  $i$ -tego stanu wg przyjętych kryteriów.

Na rysunku 1 podano podstawowe zależności pomiędzy rodzajami uszkodzeń a odpowiadającymi im parametrami diagnostycznymi.



Rys. 1. Zależności między podstawowymi elementami monitorowania parametrów pracy (stanu) ciągnika kołowego a parametrami diagnostycznymi

Doboru relacji diagnostycznych ciągnika kołowego dokonano dla wyróżnionych układów i zespołów na rysunku 2.



Rys. 2. Podzespoły ciągnika kołowego wymagające objęcia systemem diagnostycznym

W celu określenia relacji diagnostycznych symptomy–uszkodzenia konieczne jest stworzenie bazy wiedzy zawierającej możliwe do wystąpienia uszkodzenia poszczególnych zespołów i podzespołów ciągnika kołowego. Bazę wiedzy diagnostycznej można stworzyć na podstawie zidentyfikowanych relacji diagnostycznych uzyskanych m.in. w badaniach symulacyjnych uszkodzeń.

Jako podstawę do budowy modelu symulacyjnego ciągnika przyjęto następujący układ zależności funkcyjnych podany na rysunku 3.



Rys. 3. Układ powiązań parametrów technicznych ciągnika w modelu symulacyjnym uszkodzeń

Wzór wykorzystywany do symulowania wpływu uszkodzeń na zużycie paliwa:

$$G_V = \frac{g_e}{1000 \cdot \rho_p} \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_x \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot a \cdot \delta + f \cdot m \cdot g + F_{wewPP} + F_{wewPL} + F_{wewTP} + F_{wewTL} \right) \cdot \frac{V}{\eta_{UN}} \quad (7)$$

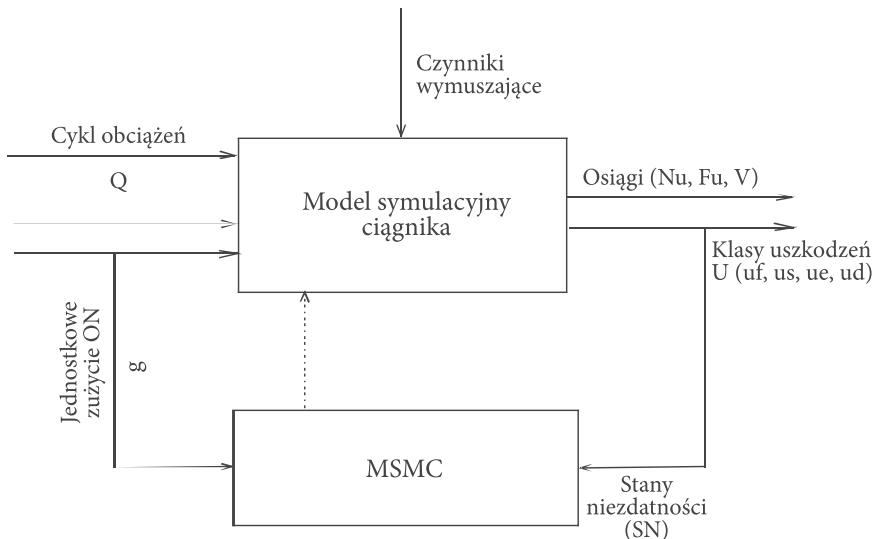
gdzie:  $g_e$  — jednostkowe zużycie paliwa;  
 $\rho_p$  — gęstość paliwa;  
 $\rho$  — gęstość powietrza;  
 $A$  — pole powierzchni czołowej ciągnika;  
 $c_x$  — współczynnik oporu powietrza ciągnika;  
 $V$  — prędkość ciągnika;  
 $m$  — masa ciągnika;  
 $g$  — przyspieszenie ziemskie;  
 $\alpha$  — kąt nachylenia wzniesienia;  
 $a$  — przyspieszenie ciągnika;  
 $\delta$  — współczynnik mas wirujących;  
 $f$  — współczynnik oporu toczenia;  
 $F_{wew}$  — opory wewnętrzne poszczególnych kół ciągnika;

$\eta_{UN}$  — sprawność układu napędowego;  
 $G_V$  — godzinowe zużycie paliwa.

$$G_V \left[ \frac{dm^3}{h} \right].$$

### 3. Symulator uszkodzeń ciągnika kołowego

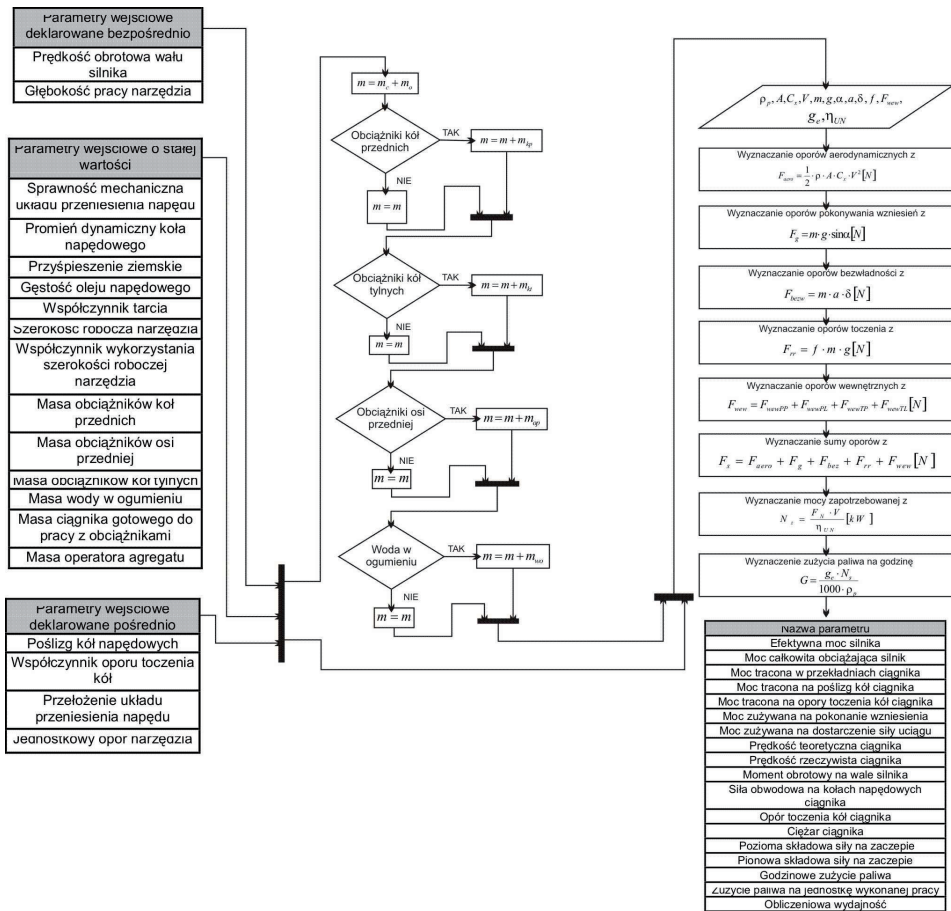
Istota działania symulatora uszkodzeń ciągnika kołowego polega na zadawaniu pewnych wymuszeń eksploatacyjnych w odniesieniu do zużycia ON.



Rys. 4. Schemat badania stanu ciągnika z wykorzystaniem projektowanego mechatronicznego systemu monitorowania jego stanu (MSMC), gdzie:  $g$  — jednostkowe zużycie paliwa;  $S_N$  — stany niezdatności,  $u$  — klasy uszkodzeń

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: obciążenia cyklu pracy i wytrzymałość materiału elementów konstrukcyjnych.

Algorytm funkcjonowania symulatora ciągnika kołowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Algorytm funkcjonowania symulatora ciągnika kołowego

#### 4. Przykładowe relacje diagnostyczne

Relacje diagnostyczne tworzono w oparciu o badania symulacyjne na komputerowym symulatorze uszkodzeń ciągnika i analizę funkcji zespołów i układów ciągnika kołowego. W tabeli 1 został przedstawiony zbiór przykładowych relacji diagnostycznych ciągnika kołowego utworzonych na podstawie badań symulacyjnych.

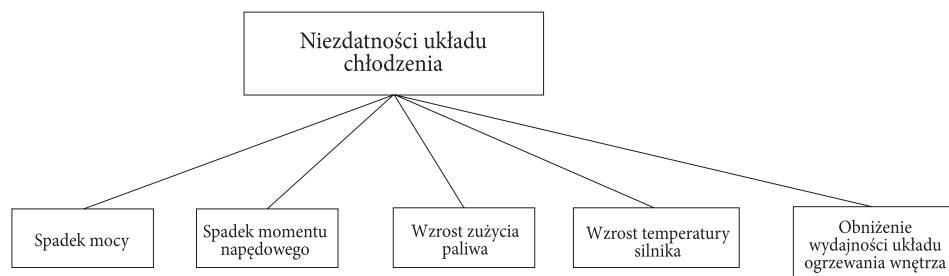
Przedmiotowy program badań został określony na podstawie przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych z wykorzystaniem modelu symulatora uszkodzeń ciągnika kołowego. Na podstawie badań symulacyjnych opracowano zbiór relacji diagnostycznych oraz przyporządkowanych im symptomów mających na celu diagnozowanie uszkodzeń najważniejszych układów ciągnika kołowego. Poniżej



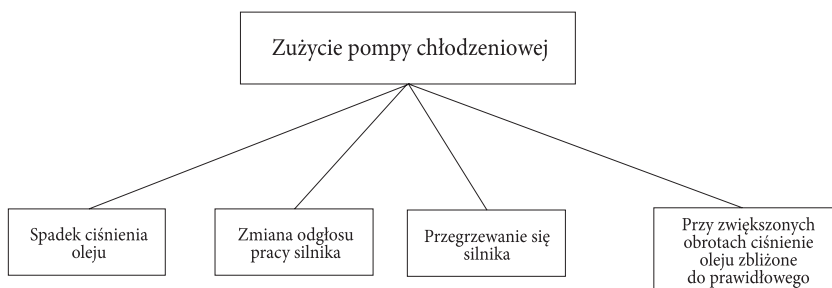
na rysunkach 6-9 przedstawiono przykładowe symptomy i relacje diagnostyczne systemu diagnostyki ciągnika.

TABELA 1  
Zbiór przykładowych relacji diagnostycznych ciągnika kołowego utworzonych na podstawie badań symulacyjnych

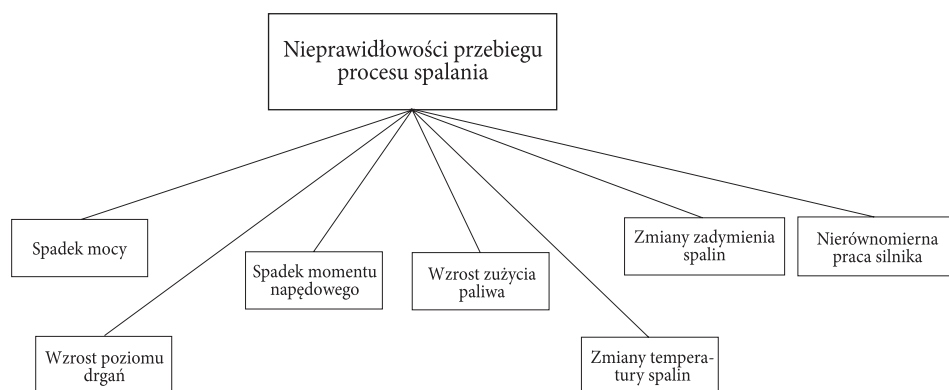
Lp.	Nazwa podzespołu	Nazwa stanów technicznych	Nazwa parametru diagnostycznego $X(t)$
1	Silnik	Niezdalny układ chłodzenia  Niezdalny układ smarowania  Nieprawidłowy przebieg procesu spalania	$T_{ch}$ — temperatura płynu chłodzącego — wysoka — jeżeli $T_{ch} > T_{ch\ max}$ $T_{ols}$ — temperatura oleju silnikowego — wysoka $p_{ol}$ — ciśnienie oleju — niskie $p_{ol} < p_{ol\ min}$ $T_{kw1}$ — temperatura spalin na I cylindrze $T_{kw2}$ — temperatura spalin na II cylindrze $T_{kw3}$ — temperatura spalin na III cylindrze $T_{kw4}$ — temperatura spalin na IV cylindrze Pomiary wykonywane czujnikami zamontowanymi w kolektorze wydechowym przy każdym z cylindrów. Jeżeli $T_{kwi} > 1,15 \cdot T_{kws}$ lub $T_{kwi} < 0,85 \cdot T_{kws}$ , gdzie $T_{kws} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j T_{kwi}$ , wówczas wystąpiło uszkodzenie układu wtryskowego lub ciśnienie sprężania na $i$ -tym cylindrze odbiega od normy.
2	Skrzynia przekładniowa	Niezdadności skrzyni przekładniowej	$a_{spr}$ — poziom drgań skrzyni przekładniowej i reduktora $T_{sp}$ — temperatura skrzyni przekładniowej
3	Reduktor	Niezdadności reduktora	$a_{spr}$ — poziom drgań skrzyni przekładniowej i reduktora $T_r$ — temperatura reduktora



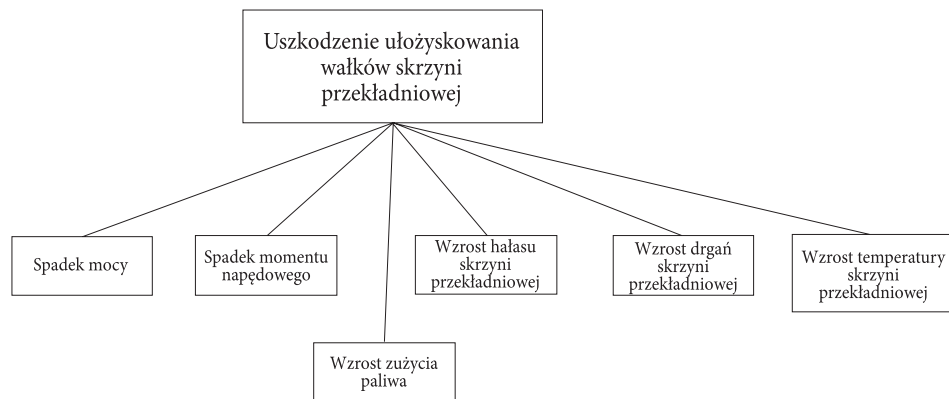
Rys. 6. Niezdadności układu chłodzenia oraz odpowiadające im symptomy diagnostyczne



Rys. 7. Uszkodzenie pompy olejowej oraz odpowiadające mu symptomy diagnostyczne



Rys. 8. Nieprawidłowości przebiegu procesu spalania oraz odpowiadające im symptomy diagnostyczne



Rys. 9. Uszkodzenie łożyskowania wałków skrzyni przekładniowej oraz odpowiadające im symptomy diagnostyczne

Niezdatność to każdy stan destrukcyjnie wpływający na pogorszenie jakości i efektywności funkcjonowania ciągnika, który powinien być wykrywany w procesie diagnozowania.

Uszkodzenie powstaje, gdy co najmniej jedna z przyjętych mierzalnych lub niemierzalnych cech charakteryzujących stan maszyny przestaje spełniać wymagania niezbędne do poprawnego jej funkcjonowania.

Uszkodzenie określa utratę zdolności ciągnika do wypełniania wymaganych funkcji.

Istnieją pewne przerwy pomiędzy chwilą, w której dany element należy uznać za niezdatny, a pojawieniem się reakcji ciągnika w postaci zmiany właściwości funkcjonalnych stwierdzonych jako symptom tej niezdatności.

## 5. Podsumowanie

Podczas przygotowywania mechatronicznego systemu diagnostycznego ciągnika kołowego jednym z najważniejszych zadań było ustalenie odpowiednich relacji diagnostycznych pomiędzy danymi uszkodzeniami a parametrami, na podstawie których są one identyfikowane. Uznano, że każdemu uszkodzeniu ciągnika kołowego może być przyporządkowany tylko jeden zbiór symptomów diagnostycznych, pozwala to dokładnie i szybko ustalić, które uszkodzenie wystąpiło w danej chwili. Symptomy diagnostyczne są identyfikowane przy pomocy zestawu czujników po przekroczeniu założonych progów pomiarowych.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr N N504513740.

### LITERATURA

- [1] R. ARENDT, R. MICHALSKI, *Functional structure of diagnostic system for wheeled tractors*, Pomiary, Automatyka, Robotyka, 12, 2012, 117-120.
- [2] R. ARENDT, R. MICHALSKI, *Struktura systemu diagnostycznego ciągnika kołowego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 3, 2012, 5-12.
- [3] W.J. CHANCELLOR, N.C. THAI, *Automatic control of tractor transmission ratio and engine speed*, Transactions of the ASAE, 3, 27, 1984, 642-646.
- [4] E.G. DE SOUZA, A. SANTA CATARINA, *Optimum warking curve for Diesel engines*, Transactions of the ASAE, 42, 1999, 559-563.
- [5] J.H. KIM, K.U. KIM, Y.G. WU, *Analysis of transmission load of agricultural tractors*, Journal of Terramechanics, 37, 2000, 113-125.
- [6] J. KORBICZ, J.M. KOŚCIELNY, Z. KOWALCZUK, W. CHOLEWA, *Diagnostyka procesów, modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*, WNT, Warszawa, 2002.
- [7] J.M. KOŚCIELNY, *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*, Wyd. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2000.
- [8] J. MERKISZ, S. MAZUREK, *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa, 2000.

- [9] R. MICHALSKI [red.], *Diagnostyka maszyn roboczych. Detekcja, relacje, wnioskowanie hybrydowe*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom-Olsztyn, 2004, 59-62.
- [10] R. MICHALSKI, *Mechatroniczny system monitorowania ciągnika kołowego*, Biul. WAT, 60, 1 (661), Warszawa, 2011, 221-230.
- [11] R. MICHALSKI, J. GONERA, M. JANULIN, R. ARENDT, *Structural analysis of a wheeled tractor oriented towards damage diagnostics*, Monografie, studia, rozprawy nr M29, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2012, 16-30.
- [12] R. MICHALSKI, J. GONERA, M. JANULIN, *Model symulacyjny uszkodzeń ciągnika kołowego*, materiały konferencji: „XL Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn”, Wisła, 2013.
- [13] R. MICHALSKI, J. GONERA, M. JANULIN, *Wyznaczanie charakterystyki zewnętrznej ciągnika kołowego z wykorzystaniem przenośnej hamowni inercyjnej*, Postępy nauki i techniki, Politechnika Lubelska, 14, 2012, 179-189.
- [14] R. MICHALSKI, J. GONERA, *Monitoring the operation of a wheeled tractor*, Zeszyty naukowe: Nauki Techniczne — Budowa i eksploatacja maszyn, 17, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2012, 89-99.

R. MICHALSKI, M. JANULIN, J. GONERA

### Models of diagnostic relations in a wheeled tractor

**Abstract.** Modern wheeled tractors are equipped with new-generation electric and electronic systems which control the operation of actuator systems. Such solutions require an on-board computer for online monitoring of functional performance, exhaust gas emissions, safety and operating parameters. Mechatronic diagnostic systems identify the machine's actual operating load in different operating modes and under specific circumstances.

Knowledge engineering methods have not yet been developed in the process of diagnosing a tractor's defects, but they seem to offer almost endless possibilities. A defect is defined as every event which has an adverse effect on tractor performance and which should be detected in the diagnostic process with an indication of the type and place of damage as well as the magnitude and variability of damage over time. Diagnostic knowledge is a symbolic representation of empirical relations based on which diagnostic procedures are developed.

The identification of diagnostic relations based on different methods and information sources will foster the growth of reliable declarative knowledge comprising facts and state-symptom diagnostic relations, as well as procedural knowledge which underlies diagnostic inference.

The determination of symptom-damage relations requires a knowledge base of potential defects in the assemblies and subassemblies of a wheeled tractor. A diagnostic knowledge base can be created based on the identified diagnostic relations, including data acquired during damage simulations.

The identification of diagnostic relations between specific defects and the corresponding parameters was one of the key steps in the process of developing a mechatronic diagnostic system in a wheeled tractor. To facilitate the detection of specific defects at a given moment, a single set of diagnostic symptoms was allocated to every defect in a wheeled tractor. Diagnostic symptoms are identified by sensors when threshold values are exceeded.

**Keywords:** diagnostics, wheeled tractor, diagnostic relations