

Dr inż. Żaneta Staszak

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
E-mail: zaneta.staszak@put.poznan.pl

Dr inż. Zenon Grześ

Dr hab. inż. Piotr Rybacki

Instytut Inżynierii Biosystemów
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 50, 60-637 Poznań, Polska
E-mail: zgrzes@up.poznan.pl
E-mail: prybacki@up.poznan.pl

Metoda badań porównawczych zbiorów sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągników

Słowa kluczowe: *ciągnik rolniczy, stan techniczny, zbiór sprawdzeń, entropia informacyjna*

Streszczenie: W pracy zaproponowano oryginalną metodę liczbowej oceny zbiorów sprawdzeń stanu technicznego ciągnika rolniczego. Jako kryterium oceny wykorzystano entropię informacyjną, konieczną do uzyskania w badaniach diagnostycznych dla odpowiedniego zbioru sprawdzeń. Wykonano formalny opis procesu oceny stanu technicznego ciągnika w systemie eksploatacji, który charakteryzuje duży udział uszkodzeń awaryjnych. Do budowy modelu strukturalnego wykorzystano entropię informacyjną. Model ten kumuluje w sobie liczbę sprawdzeń, prawdopodobieństwo wystąpienia określonych uszkodzeń i nadaje im wspólną miarę liczbową. Przeprowadzona logiczna analiza proponowanej metody oraz wyniki uzyskane w badaniach z jej praktycznego zastosowania w zakładach serwisowych wskazują, że opisuje adekwatnie ten obszar eksploatacji maszyn i może być miarą efektywności informacyjnej zbiorów sprawdzeń stanu technicznego maszyn.

1. Wstęp

Efektywna realizacja procesów eksploatacji maszyn wymaga ciągłego podejmowania decyzji, których trafność jest funkcją ilości oraz jakości posiadanej informacji o tym procesie i jego otoczeniu. Ogólnie efektywność eksploatacji obiektów technicznych określana jest jako stopień spełniania wymagań niezawodnościowych, ekonomicznych, jakościowych i innych, w określonym przedziale czasu, w stosunku do poniesionych nakładów [7]. W oparciu o te wymagania stosowane są odpowiednie strategie eksploatacji, obejmujące procesy

użytkowania i serwisowania maszyn oraz relacje między nimi oceniane według odpowiednich kryteriów [10].

Starzenie fizyczne maszyn, rozumiane jako utrata stanu technicznego jest obiektywnie istniejącą rzeczywistością w ich eksploatacji. Aktualne informacje o stanie technicznym maszyny mają istotne znaczenie w utrzymaniu ruchu. Uzyskujemy je wykonując, między innymi, pomiary określonych wielkości w procesach roboczych i towarzyszących.

Eksploatacja maszyn i składające się na nią procesy funkcjonują w systemie gospodarczym i podstawowym kryterium ich oceny jest efektywność ekonomiczna. Dotyczy to także uzyskiwania i opracowywania informacji o stanie technicznym maszyny. Postępy w zakresie metod pomiarowych zastosowania elektroniki, informatyki itp. sprawiają, że uzyskiwanie informacji jest coraz łatwiejsze technicznie [1, 17]. Znaczenia nabiera planowanie i efektywność prowadzonych pomiarów oraz stosowane metody opracowywania zawartych w nich informacji. Połączenie tych dwóch obszarów pozwala na uzyskanie wartościowych informacji, które efektywnie wspomagają zarządzanie procesami eksploatacji [7].

Budowane są strukturalne modele formalne procesów diagnozowania, na których wykonuje się badania symulacyjne i oceniana jest ich efektywność według różnych kryteriów. Zagadnieniami tymi zajmuje teoria budowy testów diagnostycznych [13], w której wykorzystuje się, między innymi metody macierzową, skreśleń itp. [19].

W tym obszarze istotne znaczenie mają zbiory sprawdzeń (pomiarów), które wykorzystujemy do identyfikacji stanu technicznego, ich liczebność i rodzaje, kolejność wykonywania oraz pracochłonność i koszty.

W pracy przedstawiono metodę wartościowania zbiorów sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągnika, po wystąpieniu określonego sygnału (symptomu) z wykorzystaniem entropii informacyjnej. Zostaną porównane przykładowe zbiory sprawdzeń, których wyniki posłużą do oceny ich efektywności informacyjnej oraz wskazania obszarów praktycznego zastosowania opracowanej metody.

2. Charakterystyka procesu eksploatacji ciągników w rolnictwie

Badanie procesów eksploatacji powinno obejmować jej relacje z otoczeniem [2]. Ciągniki, jako maszyny energetyczne, znajdują zastosowanie w wielu działach gospodarki (rolnictwo, transport, budownictwo itp.). Są to skomplikowane oraz kosztowne obiekty techniczne, będące źródłem energii mechanicznej dla wielu innych maszyn. Utrzymanie

ruchu współpracujących maszyn zależy od ich charakterystyki konstrukcyjnej i roli jaką pełnią w procesie produkcyjnym. Strategię eksploatacyjną należy dostosować do konkretnych warunków, stosując odpowiednie kryteria jej oceny [4, 10, 12]. Ciągniki rolnicze współpracują z wieloma maszynami, wykonują różnorodne prace, zależnie od sezonu, najczęściej w trudnych warunkach terenowych i atmosferycznych. Wraz ze współpracującymi maszynami tworzą szeregowe systemy niezawodnościowe, a awaria ciągnika powoduje przestój całej linii. Takie otoczenie systemu ich eksploatacji generuje liczne uszkodzenia awaryjne, które mają charakter losowy i fakt ten musi uwzględniać strategia ich utrzymania. Jak w większości maszyn dominujący udział w utrzymaniu ciągników ma strategia prewencyjna (preventive maintenance) w postaci systemu przeglądów planowo-zapobiegawczych. Realizacja przeglądów odbywa się według ogólnie stosowanych zasad. Ze względu na duży udział uszkodzeń awaryjnych w eksploatacji ciągników rolniczych musi być równolegle stosowana strategia reaktywna (reactive maintenance). Strategia ta obniża efektywność eksploatacji, generując przy tym dodatkowe koszty i straty. Wynikają one z wielu problemów w tym obszarze [6].

W przypadku wystąpienia awarii konieczna jest szybka identyfikacja jej przyczyny oraz przywrócenie utraconego losowo stanu technicznego ciągnika, co jest to warunkiem jego dalszego użytkowania i minimalizacji strat.

Szczególne znaczenie w procesach decyzyjnych mają informacje o aktualnym stanie technicznym ciągnika, jego zespołów i części. Eksploatacja maszyn wypracowała wiele metod identyfikacji rejestracji i pomiaru sygnałów o stanie technicznym maszyny, z których uzyskiwane są informacje diagnostyczne [2, 17].

Zadanie to realizują mechanicy serwisowi, najczęściej w miejscu pracy ciągnika, dysponując samochodem technicznym z ograniczonym, ale coraz nowocześniejszym wyposażeniem. W pierwszym rzędzie trzeba wykonać odpowiedni zbiór sprawdzeń, najczęściej pomiarów aby uzyskać dokładną informację, co zostało uszkodzone. W tym przypadku wystarczająca jest dwuwartościowa (binarna) ocena stanu technicznego maszyny i jej części, równanie (1):

$$I(c_i) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } c_i \in \{C_1\} \\ 0, & \text{gdy } c_i \in \{C_2\} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$I(c_i)$ – informacja o stanie technicznym i-tej części,

$\{C_1\}$ – zbiór części zdalnych,

$\{C_2\}$ – zbiór części niezdatnych.

Uzyskujemy wtedy informację, czy obiekt (ciągnik, zespół, część) jest w stanie zdatnym (wartość funkcji 1) lub niezdatnym (wartość funkcji 0).

Strukturę procesu oceny stanu technicznego (diagnostyki), jako podsystemu eksploatacji maszyn przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat procesu oceny stanu technicznego ciągnika

Przyczyną utraty stanu technicznego ciągnika jest określone zużycie jego części lub zespołu, które w niezawodności maszyn nazywane jest uszkodzeniem. Maszyna, która utraciła swój stan techniczny emituje odpowiedni sygnał (symptom), który jest zbiorem informacji i towarzyszy określonym rodzajom zużycia. Sygnałem diagnostycznym w ciągniku może być spadek mocy silnika, zwiększone zużycie paliwa, wzrost temperatury, drgania, nadmierne dymienie, brak określonych funkcji roboczych itp. Przykładowo, spadek mocy silnika (sygnał) może zawierać informacje o nadmiernym luzie pary cylinder-tłok, zużyciu zaworów, uszkodzonej uszczelce pod głowicą itp.

Po identyfikacji sygnału, w celu uzyskania informacji o uszkodzeniu, trzeba wykonać określone sprawdzenia lub ich zbiory. Uzyskana z nich informacja posłuży do podjęcia adekwatnej decyzji serwisowej i szerzej eksploatacyjnej. Najwartościowszy jest minimalny zbiór sprawdzeń, który pozwala zidentyfikować stan techniczny maszyny przy najmniejszej liczbie sprawdzeń, ich kosztach oraz pracochłonności itp. Jest to podstawowy warunek efektywnej diagnostyki [14]. W szczególnym przypadku sygnał będzie informacją diagnostyczną, jeżeli emituje go tylko jedno zużycie. Relacje pomiędzy sygnałem diagnostycznym a informacją o rodzaju zużycia są złożone. W pracy przyjęto następujące założenia:

- każda część lub zespół ciągnika mogą znajdować się w stanie zdatności lub niezdatności, a do ich teoretycznego opisu zostanie wykorzystana logika dwuwartościowa,
- przyczyną utraty stanu technicznego ciągnika lub jego zespołów jest uszkodzenie tylko jednej z jego części, co częściowo potwierdza praktyka serwisowania,
- diagnozujemy awaryjne uszkodzenia losowe.

Rozwiązania wymaga opracowanie metody racjonalizacji liczby i rodzajów koniecznych sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągnika.

3. Cel badań

Problemem pracy jest brak metody obiektywnego, liczbowego wartościowania zbiorów sprawdzeń (testów diagnostycznych) według kryterium ilości informacji potrzebnej do zidentyfikowania stanu technicznego ciągnika z ich wykorzystaniem.

Rozwiązanie tak sformułowanego problemu wymaga zbudowania adekwatnego systemu abstrakcyjnego, utworzenie bazy danych oraz logicznej weryfikacji i praktycznej oceny przydatności opracowanej metody. W efekcie powinna powstać uniwersalna i obiektywna metoda, pozwalająca na kompleksową, liczbową ocenę zbiorów sprawdzeń, aby z sygnału uzyskać informację diagnostyczną. Kryterium oceny będzie ilość niezbędnej, minimalnej informacji koniecznej do zidentyfikowania stanu technicznego obiektu po wystąpieniu określonego sygnału. Informacja ta będzie funkcją liczby i rodzajów koniecznych sprawdzeń ich złożoności oraz kosztów, kolejności ich wykonywania itp.

Zbiory sprawdzeń posłużą do identyfikacji uszkodzeń losowych, stąd w opracowanej metodzie wykorzystano modele probabilistyczne, a uzyskane wyniki mogą być odnoszone do odpowiednio licznej populacji ciągników.

Aby osiągnąć planowany cel należy zrealizować następujące zadania:

- poznać specyfikę eksploatacji ciągników w rolnictwie,
- wykonać badania procesu oceny stanu technicznego ciągników w zakładach serwisowych,
- opracować obiektywną metodę wartościowania i porównywania zbiorów sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągników,
- dokonać logicznej i empirycznej oceny opracowanej metody,
- wskazać potencjalne obszary jej praktycznego wykorzystania na przykładach.

4. Materiał i metody badawcze

Praca ma charakter metodyczny i w wyniku jej realizacji powstanie uniwersalna metoda wartościowania i porównywania zbiorów sprawdzeń stanu technicznego ciągników w procesach ich serwisowania. Wymagania stawiane opracowywanej metodzie takie jak:

uniwersalność, obiektywność, kompleksowość, uzyskanie liczbowej, informacyjnej oceny zbiorów sprawdzeń wymagają budowy strukturalnego modelu dedukcyjnego procesu oceny stanu technicznego ciągnika wraz z empiryczną bazą danych.

Inspiracją do podjęcia się opracowania metody jest rozwój nauk podstawowych, a szczególnie matematyki, które mogą być praktycznie wykorzystane. Efektywne połączenie i wykorzystanie osiągnięć matematyki oraz praktycznej realizacji procesów eksploatacji maszyn pozwoli na opracowanie nowej metody. Korzystanie z niej umożliwi lepsze poznanie procesów eksploatacji i ich doskonalenie, co ma także praktyczne znaczenie.

W pierwszym etapie dokonano opisu formalnego procesu oceny stanu technicznego ciągnika. Schemat blokowy procesu (rys. 1) możemy zapisać za pomocą równania (2):

$$S = \{N_i(p_i)\} \quad (2)$$

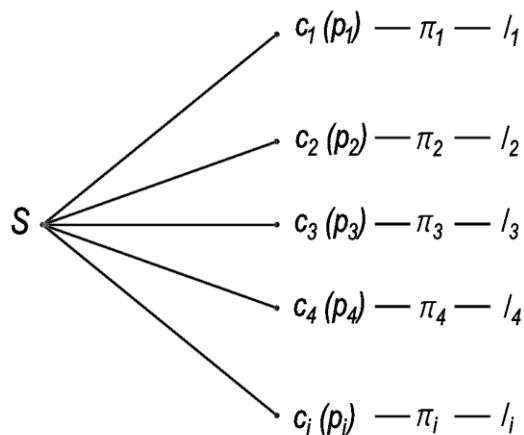
gdzie:

S – sygnał stanu technicznego,

N_i – zbiór możliwych wariantów informacji zawartych w sygnale,

p_i – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tej informacji.

Pomiędzy sygnałem, uszkodzeniami, sprawdzeniami oraz informacjami występują określone relacje (rys. 2).



Rys. 2. Schemat relacji sygnał – uszkodzenie – sprawdzenie – informacja

Każdy sygnał S zawiera w sobie pewien zbiór wariantów informacji o uszkodzeniu części c_i i prawdopodobieństwie wystąpienia tego uszkodzenia p_i (rys. 2). Uzyskanie z sygnału informacji wymaga wykonania odpowiedniego sprawdzenia. W pracy założono, że uzyskanie każdej informacji I_i wymaga wykonania sprawdzenia π_i . Pełna ocena stanu technicznego ciągnika wymaga wykonania zbioru sprawdzeń $\{II_i\}$.

Proces taki możemy opisać analitycznie korzystając z teorii informacji Shannona [18], w której podstawowym pojęciem jest entropia informacji. Umożliwia ona ilościowe

wartościowanie informacji koniecznej do uzyskania przy badaniu procesu losowego i jest z powodzeniem wykorzystywana w wielu obszarach.

Entropię informacyjną zastosowano do formalnego opisu badań łożysk tocznych na stanowisku testowym [20]. W wyniku powstała nowatorska i przydatna praktycznie metoda diagnozy błędów wykonania łożysk tocznych silników lotniczych. W pracy [15], korzystając z entropii informacyjnej, opracowano metodę monitorowania drgań w procesie frezowania. Wartość entropii informacyjnej była miarą niestabilności pracy obrabiarki. W projektowaniu systemów produkcyjnych, entropię informacyjną wykorzystano do wartościowania stanów technicznych maszyn tworzących system [9]. Entropia informacyjna jest metodą modelowania procesów losowych w wielu obszarach nauki, a jej czytelna i logiczna struktura sprawia, że wykorzystywana jest z powodzeniem w praktyce [8, 11, 16].

W dostępnej literaturze nie spotkano przykładów wykorzystania entropii informacyjnej w procesach oceny stanu technicznego ciągników rolniczych. Losowy charakter występowania uszkodzeń daje potencjalną możliwość zastosowania entropii informacyjnej do modelowania procesu oceny stanu technicznego za pomocą zbioru sprawdzeń identyfikujących uszkodzenie.

System empiryczny składający się ze zbioru wariantów uszkodzeń oraz prawdopodobieństw ich występowania, które w przypadku oceny stanu technicznego ciągnika są brakującymi informacjami, można opisać, korzystając ze statystycznej teorii informacji, za pomocą równania (3) entropii informacyjnej [18]:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (3)$$

gdzie:

n_i – liczba wariantów informacji o uszkodzeniach,

H – ilość potrzebnej informacji (bit),

p_i – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego wariantu uszkodzenia w sygnale.

Jeżeli w równaniu (3) wykorzystujemy logarytm o podstawie 2, to ilość entropii informacyjnej uzyskujemy w bitach. Z równania (3) wynika, że wartość entropii informacyjnej H jest funkcją liczby możliwych wariantów uszkodzeń n_i zawartych w sygnale, oraz prawdopodobieństw ich wystąpienia p_i . W przypadku skupionych rozkładów prawdopodobieństw, w których łatwo przewidzieć, która część jest uszkodzona wartość entropii maleje. Wtedy zbiór sprawdzeń do uzyskania informacji o stanie technicznym ciągnika będzie optymalny. W szczególności gdy sygnał będzie zawierał tylko jeden wariant uszkodzenia, z prawdopodobieństwem wystąpienia 1, wartość entropii wyniesie 0. Oznacza to

pełną informację o stanie technicznym maszyny i tym samym brak konieczności wykonywania sprawdzeń. Gdy sygnał diagnostyczny zawiera liczny zbiór wariantów uszkodzeń z małym i wyrównanym prawdopodobieństwem ich wystąpienia ($p_i = 1/n$) entropia informacyjna uzyskuje maksymalną wartość. Można ją obliczyć z równania (4) strukturalnej teorii informacji.

$$I = \log_2 n_i \quad (4)$$

gdzie:

I – ilość informacji według strukturalnej teorii informacyjnej (bit),

n_i – liczba wariantów informacji o uszkodzeniach.

Wtedy uzyskanie informacji o stanie technicznym maszyny wymaga wykonania licznego zbioru sprawdzeń.

W praktycznej realizacji procesów oceny stanu technicznego można, korzystając z badań eksploatacyjnych, doświadczenia serwisantów, informacji od operatorów maszyn zróżnicować prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zużycia i informacji o nim.

Z punktu widzenia diagnostyki przypadek opisany równaniem (3) jest korzystniejszy w porównaniu z przypadkiem opisany równaniem (4), ponieważ ilość koniecznej do uzyskania informacji w badaniach jest mniejsza, stąd i nakłady będą mniejsze.

Znając sygnał diagnostyczny i potencjalne informacje w nim zawarte możemy zbudować odpowiednie zbiory sprawdzeń do oceny stanu technicznego. Zbiory te będą się różniły liczbą i rodzajami sprawdzeń oraz kolejnością ich wykonywania. Z równań (3) i (4), możemy obliczyć liczbową wartość koniecznej do uzyskania informacji i adekwatny do niej zbiór sprawdzeń, który pozwala uzyskać pełną informację o stanie technicznym ciągnika. Taki zbiór sprawdzeń będzie cechować najmniejsza entropia informacyjna. W efekcie równania (3) i (4) pozwalają na liczbowe wartościowanie i porównywanie zbiorów sprawdzeń według kryterium ich entropii informacyjnej i stanowią w tym zakresie model abstrakcyjny, który wymaga sprawdzenia poprawności logicznej i przydatności praktycznej. Stanowi on podsystem ogólnego modelu procesu eksploatacji maszyn [3,5].

Z logicznej analizy równań (3) i (4) oraz rzeczywistego procesu oceny stanu technicznego ciągnika wynika, że entropia informacyjna zbioru sprawdzeń stanu technicznego:

- osiąga wartość zero, gdy sygnał zawiera informację tylko o jednym określonym uszkodzeniu, czyli sygnał jest wtedy informacją diagnostyczną,
- osiąga maksimum gdy każde sprawdzenie ze zbioru sprawdzeń identyfikuje odpowiednie uszkodzenie z równym prawdopodobieństwem,

- maleje gdy każde sprawdzenie zbioru sprawdzeń identyfikuje odpowiednie informacje z różnym (skupionym) prawdopodobieństwem,
- rośnie wraz ze wzrostem liczności zbioru sprawdzeń koniecznych do pełnej identyfikacji stanu technicznego.

Przedstawiona dynamika zmian entropii informacyjnej jest w pełni adekwatna do informacyjnego opisu zbiorów sprawdzeń w ocenie stanu technicznego ciągnika. Pod względem logicznym równania (3) i (4) mogą być wykorzystane do obliczania ilości informacji (entropii informacyjnej) generowanej przez odpowiednie zbiory sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągnika.

Problemem pozostaje praktyczne wykorzystanie opracowanej metody. W tym celu przeprowadzono badania empiryczne rzeczywistego procesu serwisowania ciągników.

5. Przykład zastosowania metody

Wykonano badania ciągników rolniczych, w których wystąpiła określona niezdatność stanu technicznego. Sygnał o niezdatności widoczny był na komputerze pokładowym w postaci kodu usterki lub po podłączeniu komputera zewnętrznego z oprogramowaniem kompatybilnym z badanym ciągnikiem. Kod usterki lub informacja słowna jest to sygnał, który generuje szereg rodzajów możliwych uszkodzeń. Zwykle jednemu sygnałowi przyporządkowanych jest kilka wariantów uszkodzeń. W takiej sytuacji osoba wykonująca sprawdzanie stanu technicznego musi podjąć decyzję, jakie wykonać sprawdzenia i w jakiej kolejności.

Badano 72 ciągniki rolnicze tego samego rodzaju, w których sygnałem niezdatności była zbyt wysoka temperatura pracy silnika. Dla tego sygnału opracowano zbiory sprawdzeń, które pozwolą na uzyskanie pełnej informacji o stanie technicznym silnika ciągnikowego.

Pierwszy zbiór sprawdzeń opracowano w oparciu o dokumentację techniczną producenta oraz dane zawarte w komputerowym systemie diagnostycznym dla tego sygnału (tabela 1). Analiza danych umożliwiła zbudowanie zbioru sprawdzeń, ale nie pozwalała na zróżnicowanie prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych wariantów uszkodzeń.

Drugi zbiór sprawdzeń opracowano korzystając dodatkowo z wyników badań ankietowych przeprowadzonych, wśród 127 pracowników serwisu, którzy praktycznie wykonywali badania stanu technicznego tych ciągników. Na podstawie własnych doświadczeń, warunków eksploatacji, ankietowani uzupełnili pierwszy zbiór sprawdzeń o

dotatkowe sprawdzenia (tabela 1). Były to uszkodzenia, których występowania nie przewidział producent ciągnika.

Trzeci zbiór sprawdzeń utworzono, korzystając z badań, w których ankietowani wskazali najczęściej występujące w ich praktyce uszkodzenie. Na tej podstawie obliczono prawdopodobieństwo każdego uszkodzenia, które identyfikuje odpowiednie sprawdzenie. Dla każdego z trzech zbiorów sprawdzeń, korzystając z równań (3) i (4), obliczono konieczną do uzyskania ilość informacji (entropię informacyjną). Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zbiory sprawdzeń dla sygnału “zbyt wysoka temperatura silnika ciągnikowego”

Lp.	Rodzaj sprawdzenia	Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia dla badanych zbiorów sprawdzeń		
		I	II	III
1.	Uszkodzony termostat	0,067	0,053	0,181
2.	Zbyt niski poziom płynu w układzie chłodzenia	0,067	0,053	0,151
3.	Zbyt niski poziom oleju w silniku	0,067	0,053	0,102
4.	Uszkodzona chłodnica oleju	0,067	0,053	0,079
5.	Luźny lub zerwany pasek klinowy pompy cieczy chłodzącej	0	0,053	0,079
6.	Uszkodzony czujnik temperatury	0,067	0,053	0,134
7.	Uszkodzony wentylator	0,067	0,053	0,031
8.	Uszkodzony zespół sprzęgła wentylatora	0,067	0,053	0,031
9.	Zanieczyszczenie rdzenia chłodnicy	0,067	0,053	0,031
10.	Uszkodzony nadajnik temperatury	0,067	0,053	0,055
11.	Niedrożne przewody układu chłodzenia	0,067	0,053	0
12.	Uszkodzenie uszczelki pod głowicą	0,067	0,053	0
13.	Pęknięta głowica	0,067	0,053	0
14.	Pęknięty blok silnika	0,067	0,053	0
15.	Uszkodzona pompa cieczy chłodzącej	0,067	0,053	0
16.	Przerwany przewód w układzie chłodzenia	0	0,053	0,031
17.	Przeciążony silnik	0,067	0,053	0,063
18.	Uszkodzony korek chłodnicy	0	0,053	0,031
Wartości entropii informacyjnej zbiorów sprawdzeń (bit)		3,92	4,04	3,42

Z danych zebranych w tabeli 1 wynika, że korzystając z równania (3) można obliczyć ilość informacji (entropii informacyjnej) koniecznej do uzyskania, w celu pełnej identyfikacji stanu technicznego ciągnika, przy wykorzystaniu każdego zbioru sprawdzeń.

Dysponując taką oceną można podjąć racjonalną decyzję, który zbiór sprawdzeń wykorzystać praktycznie. Kryterium oceny będzie minimalna ilość informacji konieczna do uzyskania, w celu pełnej identyfikacji stanu technicznego ciągnika. W przeprowadzonych badaniach będzie to zbiór sprawdzeń III.

Przedstawiony przykład zastosowania metody potwierdził, że uzyskane z niej liczbowe oceny wartości informacji (entropii informacyjnej) zbiorów sprawdzeń adekwatnie opisują rzeczywisty proces badania stanu technicznego ciągnika. Warunkiem efektywnego stosowania metody jest stworzenie zbioru potencjalnych sprawdzeń dla danego sygnału wraz z określeniem prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych uszkodzeń.

6. Wnioski końcowe

1. Przedstawiona w pracy metoda pozwala, na liczbową ocenę każdego z możliwych do zastosowania zbiorów sprawdzeń stanu technicznego ciągnika, po wystąpieniu określonego sygnału, według kryterium ilości brakującej informacji (entropii). Uzyskane wyniki można porównać i dokonać wyboru efektywnego informacyjnie zbioru sprawdzeń, który charakteryzuje się minimalną entropią. Zbiór ten pozwoli na identyfikację stanu technicznego ciągnika przy minimalnej liczbie sprawdzeń, wykonywanych w odpowiedniej kolejności.
2. Liczbowa miara entropii zbioru sprawdzeń ma charakter globalny i kumuluje w sobie informacje od producentów ciągników, zakładów serwisowych oraz operatorów ciągników. Logiczna weryfikacja metody oraz przykład jej praktycznego zastosowania wykazuje, że opisuje ona adekwatnie rzeczywisty proces generowania zbiorów sprawdzeń do oceny stanu technicznego ciągnika. Jest metodą uniwersalną i może zostać zastosowana do innych maszyn, pod warunkiem, że dysponujemy odpowiednią bazą danych.
3. Obliczenie ilości brakującej informacji odbywa się z wykorzystaniem danych probabilistycznych, stąd uzyskane wyniki mogą być odnoszone do odpowiednio licznego zbioru ciągników i wtedy ich praktyczne wykorzystanie jest efektywne. Dysponując bazą danych o uszkodzeniach, po wykonaniu odpowiednich obliczeń, można opracować optymalne zbiory sprawdzeń, które kumulują doświadczenie serwisantów i specyfikę eksploatacji ciągników w określonym rejonie. Przykład takiego działania przedstawiono w pracy.

Literatura

1. Cieślukowski B. Proces diagnostyki układu hydrauliki siłowej mechanizmie obrotu pługa. *Inżynieria Rolnicza* 2009; 9(118): 23-27.
2. Grądzki R, Lindstedt P. Method of assessment of technical object aptitude in environment of exploitation and service conditions. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17(1): 54-63.
3. Hebda M. *Eksplatacja samochodów*. Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, 2007.
4. Jasiulewicz – Kaczmarek M. Współczesne koncepcje utrzymania ruchu infrastruktury technologicznej przedsiębiorstwa. w: *Koncepcje zarządzania systemami wytwórczymi*. Poznań: Wydawca Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej, 2005: 127-134.
5. Kaźmierczak J. *Eksplatacja systemów technicznych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
6. Kołodziejski D., Jóska M. Wybrane problemy eksploatacyjne pojazdów i maszyn rolniczych w zakresie serwisowania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 2008; 53(2); 5-7.
7. Kosicka E, Kozłowski E, Mazurkiewicz D. The use of stationary tests for analysis of monitored residual processes. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17(4): 604-609.
8. Kucharek M., Treichel W. Zastosowanie entropii informacji do oceny sieci monitoringu jakości wód podziemnych. *Ochrona Środowiska* 2006; 28, 3: 45-49.
9. Lazar I, Husar J. Verification of sequential patterns in production using information entropy. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette* 2013; 20(4): 669-676.
10. Legutko S. *Eksplatacja maszyn*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
11. Mieszala A, Zielińska E, Kordaś M, Rakoczy R. Zastosowanie entropii informacji do oceny stanu mieszaniny materiałów ziarnistych. *Inż. Ap. Chem.* 2013; 52, 4: 357-358.
12. Moubray J. Maintenance management – a new paradigm. *Maintenance*, 1996; 11: 1.
13. Niziński S, Michalski R. *Diagnostyka obiektów technicznych*. Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, 2002.
14. Niziński S, Liger K. Diagnostyka techniczna w systemach działania. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001; 3(127) 171-189.

15. Perez-Canales D, Alvarez-Ramirez J, Jauregui-Correa J.C, Vela-Martinez L, Herrera-Rui G. Identification of dynamic instabilities in machining process using the approximate entropy method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2011; 51(6): 556-564.
16. Rzeźnik C, Rybacki P. A structural method for the assessment of recyclability of agricultural machinery. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Agricultural Engineering* 2004; 7(2).
17. Sawczuk W. Application of vibroacoustic diagnostics to evaluation of wear of friction pads rail brake disc. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18(4): 565-571.
18. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 1948; 27: 379.
19. Sowa A. Formal models of generating checkup sets for the technical condition evaluation of compound objects. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 150-157.
20. Yan-Ting A, Jiao-Yue G, Cheng-Wei F, Jing T, Feng-Ling Z. Fusion information entropy method of rolling bearing fault diagnosis based on n -dimensional characteristic parameter distance. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017; 88: 123-136.