

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kusz
Zakład Modelowania i Systemów Informacyjnych
Katedra Podstaw Techniki,
UP w Lublinie,
ul. Doświadczalna 50A, 20-680 Lublin,
E-mail: andrzej.kusz@up.lublin.pl

Dr hab. inż. Andrzej Marciniak
WSEI w Lublinie,
ul. Projektowa 4. 20-209 Lublin,
E-mail: andrzej.marciniak@wsei.lublin.pl

Dr hab. inż. Jacek Skwarcz
Zakład Modelowania i Systemów Informacyjnych
Katedra Podstaw Techniki,
UP w Lublinie,
ul. Doświadczalna 50A, 20-680 Lublin
E-mail: jacek.skwarcz@up.lublin.pl

IMPLEMENTACJA PROCEDURY OBLICZENIOWEJ W SIECI BAYESOWSKIEJ NA PRZYKŁADZIE WYZNACZANIA JEDNOSTKOWYCH KOSZTÓW EKSPLOATACJI

Streszczenie: W systemach technicznych rozumianych w kategoriach Agile Systems istotnym elementem są przepływy informacyjne pomiędzy wszystkimi fazami istnienia obiektu. Pośród tych strumieni informacyjnych istotną rolę odgrywają procesy obliczeniowe, które mogą być realizowane automatycznie a ponadto w naturalny sposób powinny umożliwiać uwzględnienie niepewności. W artykule przedstawiono przykład takiego procesu realizowanego w technologii sieci bayesowskiej. Model umożliwia predykcję jednostkowych kosztów eksploatacji kombajnu zbożowego na podstawie monitorowania wielkości zmiennych od których one zależą. Wartości zmiennych decyzyjnych reprezentujących parametry pracy maszyny oraz intensywność i warunki jej eksploatacji są znane z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa. W pracy pokazano w jaki sposób wykorzystując mechanizmy wnioskowania wbudowane w sieci można prowadzić symulacyjne badania kosztów w różnych wariantach sytuacyjnych.

Słowa kluczowe: eksploatacja maszyn rolniczych, procesy obliczeniowe, jednostkowe koszty eksploatacji, sieci bayesowskie

1. Wprowadzenie

Istnienie systemów technicznych rozumie się dzisiaj w kategoriach Agile Systems. Oznacza to, że ich istnienie nie jest ciągiem rozłącznych faz: projektowania, wytwarzania, eksploatacji i recyklingu. Paradygmat Agile zakłada jednoczesne istnienie wszystkich tych faz. I tak np. prace projektowe prowadzone są cały czas i mają na celu ciągłą adaptację systemów technicznych do zmieniających się wymagań [1, 22, 23]. Proces wytwarzania wdraża te adaptacje i przekłada je na cechy eksploatacyjne.

W tym układzie istotną rolę odgrywają intensywne przepływy informacyjne możliwe do opanowania w technologii informatycznej typu Big Data. Proces gromadzenia tych danych oraz ich przetwarzania jest automatyczny i odbywa się w technologii semantycznych sieci danych [6,7,10]. Procesy obliczeniowe są wykonywane automatycznie z zastosowaniem zaawansowanych systemów modelowania kognitywnego [8,22]. Modelowanie to powinno uwzględniać czynnik niepewności. Stany procesów oraz stany obiektów wykorzystywanych w danych procesach znane są z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa. Modelowanie kognitywne może być oparte o technologię sieci probabilistycznych.

W inżynierii systemów technicznych, a zwłaszcza biogrotechnicznych [15] jednym z ważnych procesów obliczeniowych, które muszą być wbudowane w system jest możliwość monitorowania kosztów eksploatacji. Jest to proces wielowymiarowy, dotyczy całych systemów, ich elementów składowych (podsystemów), a w końcu konkretnych grup i typów maszyn. Optymalizacja kosztów eksploatacji to podstawa efektywnego użytkowania systemów technicznych w rolnictwie. W literaturze, a coraz częściej w bazach danych można pozyskać informacje o kosztach działań, które składają się na procesy eksploatacji w odniesieniu do wybranych kategorii (zbiorowości) obiektów. Wyznaczenie jednostkowych kosztów eksploatacji, jako koszt jednej godziny pracy ciągnika lub maszyny, który stanowi sumę jednostkowych kosztów utrzymania i użytkowania [24], na podstawie informacji uzyskanych z baz danych umożliwia porównania konkretnego obiektu technicznego z innymi obiektami o tym samym przeznaczeniu i ma istotne znaczenie na etapie wyboru i zakupu konkretnego obiektu. Możliwość sprzężenia informacji z poziomu konkretnej klasy obiektów pozwala projektantom oszacować wartości krytyczne jednostkowych kosztów eksploatacji, których nie można przekroczyć jeśli projektowany obiekt ma być konkurencyjny w stosunku do obecnej oferty rynkowej.

Szeroka oferta handlowa maszyn i ciągników rolniczych sprawia, że racjonalny dobór konkretnych rozwiązań technicznych, w zależności od wielkości gospodarstwa oraz profilu produkcyjnego jest zadaniem istotnym z punktu widzenia efektywnego ich użytkowania. Zasady analizy i oceny eksploatacyjnej obiektu [29] określają ramy metodyczne wyznaczania kosztów w zależności od intensywności użytkowania. Proponowane procedury obliczeniowe bazują na podejściu deterministycznym [28] z uwzględnieniem metod wskaźnikowych [24].

Alternatywnym podejściem do przedstawionych powyżej metod jest podejście oparte na sieci bayesowskiej. Zastosowanie sieci jest uzasadnione czynnikiem niepewności integralnie związanym z procesem eksploatacji obiektów technicznych. Istota proponowanego podejścia polega na tym, że poszczególne składowe kosztów oraz czynniki determinujące ich

wielkość takie jak: parametry eksploatacyjne obiektów technicznych, warunki i intensywność użytkowania maszyn oraz inne czynniki charakteryzujące infrastrukturę techniczną i ekonomiczną (koszty serwisowania, oprocentowanie kredytu itp.) są reprezentowane jako zmienne losowe.

Sieci bayesowskie znalazły szerokie zastosowanie w przypadku, gdy trzeba w sposób jawny zakodować czynnik niepewności i rozumowania w kategoriach niedeterministycznych związków przyczynowo skutkowych [13,14,27]. Są one użytecznym narzędziem modelowania niepewności w rolniczych procesach produkcyjnych [18,19], predykcji stanu technicznego obiektu w celu planowania działań prewencyjnych [3,4], informacyjnego wspomaganie procesów decyzyjnych [14,21], reprezentacji wiedzy niezawodnościowej zarówno w ujęciu praktycznym [4,8,15] jak i dla potrzeb analiz teoretycznych [2,30].

Innym obszarem zastosowań sieci bayesowskich jest problem zarządzania złożonymi sieciami działań [17]. Takie podejście umożliwia uwzględnienie w modelu zależności pomiędzy czasem wykonania konkretnej czynności a warunkami jej wykonania i aktualnie dostępnymi zasobami produkcyjnymi.

Celem pracy jest przedstawienie sposobu konceptualizacji w języku sieci bayesowskich problemu realizacji procesu obliczeniowego na przykładzie wyznaczenia jednostkowych kosztów eksploatacji maszyn rolniczych. Jednostkowy koszt eksploatacji jest wyznaczany jako wartość średnia kosztu przypadająca na jednostkę miary ilości wykonanej pracy w całym okresie eksploatacji obiektu [24,29]. Istotnym elementem opracowanej metodyki jest paradygmat zgodny z postulatami inżynierii wiedzy, który zakłada możliwość wykorzystania do budowy sieci metod uczenia maszynowego, a możliwe scenariusze funkcjonowania modelu oparte są na metodach wnioskowania typowych dla sieci bayesowskich [27].

2. Konceptualizacja problemu wyznaczenia kosztów eksploatacji maszyn rolniczych

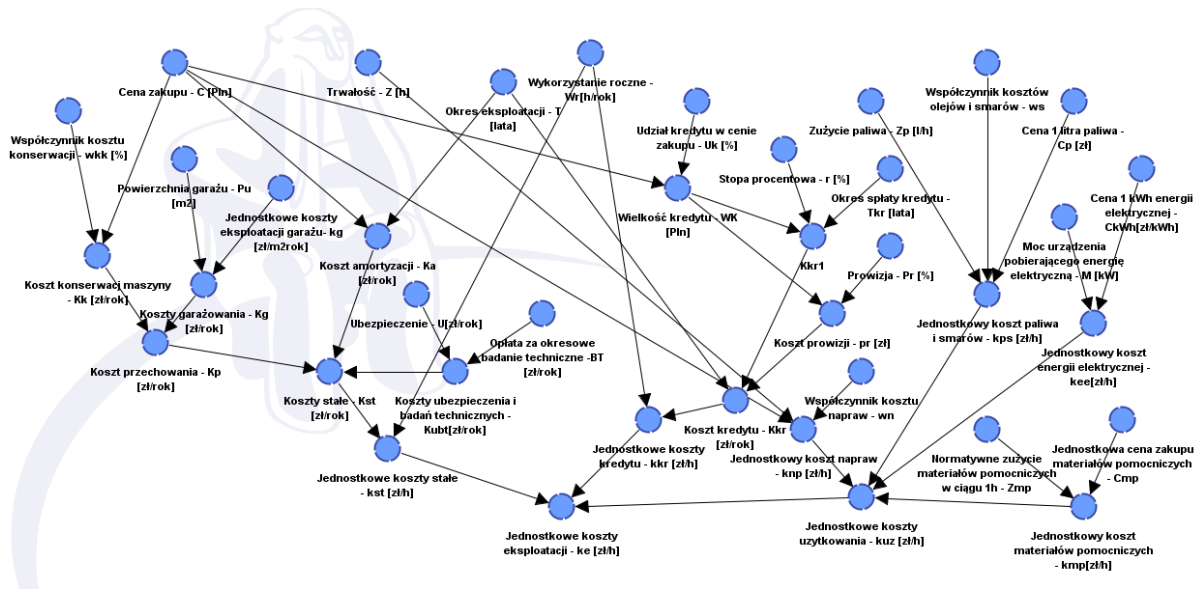
Merytoryczna znajomość procesu eksploatacji obiektu technicznego, w tym procesu obliczeniowego dostarcza wiedzy jakościowej, która jest niezbędna do zbudowania poprawnej semantyki modeli procesów. W przypadku sieci bayesowskich wiedzę tę wykorzystuje się do ustalenia topologii, a dzięki temu do faktoryzacji łącznego rozkładu prawdopodobieństwa, czyli przedstawienia go jako iloczynu warunkowych rozkładów prawdopodobieństwa. Na etapie użytkowania sieci wiedza merytoryczna jest niezbędna do wyboru sensownych ścieżek wnioskowania i interpretacji wyników procesu inferencyjnego.

Jako podstawę odniesienia przy obliczaniu jednostkowych kosztów eksploatacji przyjęto godzinę pracy maszyny [24]. Generalną zasadą jest kalkulacja kosztów eksploatacji maszyn od ceny odtworzeniowej niezależnie czy obliczenia dotyczą maszyny nowej czy już użytkowanej. Ponadto takie podejście umożliwia uwzględnienie sytuacji kiedy to planując zakup konkretnej maszyny można uwzględnić ograniczony czas jej użytkowania zakładając, że po określonym czasie maszyna zostanie odsprzedana. Taka interpretacja ceny uzasadnia fakt jej reprezentowania jako zmiennej losowej, a przedział zmienności tej zmiennej należy określić na podstawie różnicy między ceną zakupu a przewidywaną ceną odsprzedaży. Analogicznie trwałość maszyny (normatywna, lub założona ilość „pracy” jaką może ona wykonać od nabycia do jej kasacji lub odsprzedaży) oraz roczne godzinowe wykorzystanie maszyny [h/rok] w konkretnych warunkach użytkowania są reprezentowane jako ciągle zmienne losowe o zadanym rozkładzie prawdopodobieństwa wyznaczonym na podstawie danych uczących.

Przyjęcie tych założeń powoduje, że poszczególne składowe kosztów eksploatacji będą w modelu reprezentowane jako warunkowe zmienne losowe, a wyznaczanie jednostkowych kosztów eksploatacji w konkretnym przypadku sprowadza się do operacji na tych zmiennych.

Graficzną postać tej konceptualizacji, a jednocześnie strukturę sieci umożliwiającą wyznaczenie kosztów eksploatacji w technologii sieci bayesowskiej przedstawiono na rys. 1 [11]. Topologia sieci wynika ze struktury procesu obliczeniowego. W sieci można wyróżnić węzły reprezentujące surowe dane wejściowe, węzły reprezentujące operacje na tych danych i wreszcie węzeł finalny, który reprezentuje jednostkowe koszty eksploatacji. Węzły zbierające dane ze strumienia danych reprezentują wielkości których te dane są wartością. Rozkłady prawdopodobieństwa na zbiorze wartości tych węzłów są wyznaczane automatycznie na podstawie danych źródłowych, tzn. danych pozyskanych z historii eksploatacji maszyny. Wielkości przypisane węzłom reprezentującym operacje na zmiennych losowych są również zmiennymi losowymi. Wartość zmiennej finalnej jest też wyznaczana z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa.

Przyjęte do obliczeń parametry pracy maszyny oraz poszczególne składowe kosztów reprezentowane są poprzez zmienne o takich samych nazwach.



Rys. 1. Struktura sieci do wyznaczania jednostkowych kosztów eksploatacji (opracowanie własne)

Trwałość maszyny jest reprezentowana przez zmienną Z . Zmienna ta reprezentuje założony czas użytkowania maszyny. W modelu przyjęto, że zmienna ta jest wyrażona w godzinach pracy. Może być ona również wyrażona w innych jednostkach miary ilości wykonanej pracy (mth, km itp.). Wykorzystanie roczne maszyny W_r (h/rok) jest zmienną losową zależną od intensywności jej eksploatacji w konkretnych warunkach jej użytkowania. Kolejna zmienna T reprezentuje okres eksploatacji w latach. Maksymalna wartość tej zmiennej może być oszacowana jako iloraz trwałości maszyny Z i założonego rocznego czasu jej wykorzystania W_r .

Koszt amortyzacji K_a jest pieniężnym wyrazem utraty wartości maszyny w przeliczeniu na rok:

$$K_a = \frac{C}{T}, \quad (1)$$

gdzie: C - cena zakupu w zł,

T - okres eksploatacji w latach.

Koszt przechowywania maszyny K_p (zł/rok) obliczany jest jako suma kosztu jej garażowania K_g i kosztu jej konserwacji K_k . Koszt garażowania K_g (zł/rok) obliczany jest jako iloczyn powierzchni użytkowej P_u (m^2) garażu lub wiaty oraz jednostkowego kosztu eksploatacji tego obiektu, tj. garażu lub wiaty k_g (zł/ m^2 rok):

$$K_g = P_u \cdot k_g. \quad (2)$$

Koszt konserwacji maszyny K_k (zł/rok) obejmuje wartość nakładów rzeczowych i pracy ludzkiej które są związane z oczyszczeniem maszyny po sezonie i zabezpieczeniem jej

na okres przechowywania. Koszt ten można wyznaczać przy założeniu że znany jest rozkład czasu roboczego w zależności od typu maszyny od sposobu i zakresu konserwacji oraz rodzaju maszyny lub metodą uproszczoną jako iloczyn ceny zakupu i współczynnika kosztu konserwacji w_{kk} . Przyjmuje się, że współczynnik w_{kk} w zależności od stopnia złożoności wynosi od 0,5% do 1% ceny maszyny. W prezentowanej procedurze zaimplementowano tę drugą metodę.

Rozkład zmiennej reprezentującej koszt ubezpieczenia i badań technicznych (jeśli są obowiązkowe) K_{ubt} szacuje się na podstawie aktualnego taryfikatora firm ubezpieczeniowych oraz obowiązujących stawek.

Przedstawione powyżej składowe kosztów są niezależne od intensywności eksploatacji maszyny. Łączne koszty tej grupy K_{st} stanowią sumę kosztów: K_a , K_g , K_{ubt} . Suma tych składowych podzielona przez czas wykorzystania maszyny w roku W_r określa jednostkowe koszty stałe k_{st} w przeliczeniu na 1 godzinę pracy:

$$k_{st} = \frac{K_a + K_g + K_{ubt}}{W_r}. \quad (3)$$

W przypadku gdy zakup maszyny związany jest z zaciągnięciem kredytu to użytkownik ponosi dodatkowe koszty. Do tej pozycji zalicza się odsetki od kredytu wraz z dodatkowymi opłatami, nie dotyczy to rat kapitałowych kredytu, które stanowią element kosztu amortyzacji. Koszt ten jest znany z góry, ale może być zróżnicowany ze względu na warunki przyznawania kredytów inwestycyjnych (oprocentowanie, prowizja, okres i karencja spłaty itp.) przez poszczególne banki, rodzaj linii kredytowej, czy też wiarygodności kredytobiorcy i zabezpieczenia kredytu. Zakładając, że koszt kredytu K_{kr} (zł/rok) jest rozłożony na cały okres użytkowania maszyny T , to koszt ten można wyznaczyć na podstawie uproszczonego wzoru:

$$K_{kr} = \frac{1}{T} \left[\frac{U_k \cdot C \cdot r \cdot (T_{kr} + 1)}{2} + pr \right], \quad (4)$$

gdzie: T - okres użytkowania maszyn (lata),

U_k - udział kredytu w cenie zakupu (%/100),

T_{kr} - okres spłaty kredytu (lata),

r – stopa procentowa (%/100),

pr – prowizja i inne opłaty związane z udzieleniem kredytu (zł),

C – cena (zł).

W przedstawionych rozważaniach pominięto koszt oprocentowania kapitału jako alternatywnej metody pozyskiwania przychodu w przypadku gdy koszt inwestycji jest

finansowany z własnych środków. Obecnie dominuje pogląd, że wartość kosztu oprocentowania kapitału jest rekompensowana przez obliczanie kosztu amortyzacji każdorazowo od aktualnej ceny.

Koszt kredytu K_{kr} podzielony przez czas wykorzystania maszyny w roku W_r wyznacza składową kosztu jednostkowego k_{kr} w zł/h pracy wynikającą z obsługi kredytu:

$$k_{kr} = \frac{K_{kr}}{W_r}. \quad (5)$$

Kolejną kategorię kosztów stanowią koszty bezpośrednio związane z użytkowaniem maszyny. Do kosztów tych zaliczono: koszt napraw, koszt paliwa i smarów, koszt energii elektrycznej oraz koszt materiałów pomocniczych. Łączna wartość tych kosztów w ciągu roku jest zależna od ilości wykonanej pracy. W modelu reprezentowane są wartości przeciętne tych kosztów w całym okresie eksploatacji, gdyż w rzeczywistości, ze wzrostem zużycia maszyny jej jednostkowe koszty użytkowania, a zwłaszcza napraw będą wyższe niż w pierwszym okresie jej eksploatacji.

Do wyznaczania kosztu napraw możliwe są dwa alternatywne podejścia. Pierwsze stosujemy gdy dysponujemy wiarygodnymi statystykami z historii eksploatacyjnej na podstawie których można oszacować rzeczywiste rozkłady kosztów normatywnych napraw, napraw awaryjnych, przeglądów i innych czynności obsługi technicznej za cały okres eksploatacji. Drugie podejście (zaimplementowane w modelu), zakłada, że koszt napraw w całym okresie eksploatacji wynosi zależnie od maszyny od 0.4 do 1.5 ceny zakupu, a wtedy jednostkowy koszt napraw k_{np} w zł na godzinę pracy oblicza się jako:

$$k_{np} = \frac{w_n \cdot C}{Z}, \quad (6)$$

gdzie: w_n - współczynnik kosztu napraw,

Z – trwałość w h,

C – cena.

W zależności od warunków użytkowania maszyny, umiejętności obsługi oraz jakości napraw, przeglądów i konserwacji koszty napraw k_{np} mogą się istotnie różnić i uwzględniono to poprzez fakt, że współczynnik w_n jest reprezentowany jako zmienna losowa.

Jednostkowy koszt paliwa i smarów k_{ps} (zł/h pracy) jest iloczynem jednostkowego zużycia paliwa Z_p (l/h pracy) przez silnik i ceny 1 litra paliwa C_p , natomiast wartość zużytych olejów i smarów jest wyznaczana w odniesieniu do wartości zużytego paliwa metodą wskaźnikową. Łączny jednostkowy koszt paliwa i smarów wynosi:

$$k_{ps} = w_s \cdot Z_p \cdot C_p, \quad (7)$$

gdzie: w_s – współczynnik kosztu smarów do ceny paliwa.

Jednostkowy koszt energii elektrycznej k_{ee} zużywanej przez urządzenia szacuje się jako iloczyn nominalnej mocy urządzenia (M) i ceny (C_{kWh}) 1 kilowatogodziny energii elektrycznej:

$$k_{ee} = M \cdot C_{kWh}. \quad (8)$$

Jednostkowy koszt materiałów pomocniczych k_{mp} (zł/h pracy) występuje tylko w przypadku wybranych maszyn, np.: sznurek lub siatka do obwiązywania bel słomy (prasa zbierająca), folia do owijania bel sianokiszonki (owijarka) itp. Koszt ten stanowi iloczyn normatywnego zużycia tych materiałów Z_{mp} w ciągu 1 godziny pracy maszyny oraz jednostkowej ceny zakupu C_{mp} .

$$k_{mp} = Z_{mp} \cdot C_{mp}. \quad (9)$$

Łączne jednostkowe koszty użytkowania k_{uz} w przeliczeniu na 1 godzinę pracy wynoszą:

$$k_{uz} = k_{np} + k_{ps} + k_{ee} + k_{mp}. \quad (10)$$

Jednostkowy koszt eksploatacji w k_e (zł/h), czyli koszt jednej godziny pracy ciągnika lub maszyny stanowi sumę jednostkowych kosztów niezależnych od ilości wykonanej pracy, kosztów kredytu oraz kosztów użytkowania:

$$k_e = k_{ST} + k_{kr} + k_{uz}. \quad (11)$$

Jednostkowy koszt eksploatacji zestawu składającego się z ciągnika i maszyn jest sumą jednostkowych kosztów eksploatacji maszyn i współpracującego z nią ciągnika. Koszt ten można wyrazić również w przeliczeniu na jednostkę wykonanej pracy np. na 1 h pracy na 1 ha jako iloraz kosztu na godzinę wydajności eksploatacyjnej zestawu ciągnikowo-maszynowego lub maszyn samobieżnej.

Przedstawiony powyżej algorytm wyznaczania jednostkowych kosztów eksploatacji oparty na technologii sieci bayesowskiej ma charakter ogólny. Węzeł terminalny reprezentuje jednostkowy koszt eksploatacji. Wartość tej zmiennej (zgodnie z przedstawioną powyżej metodyką) jest wyznaczana jako suma jednostkowych kosztów: stałych, kredytu i użytkowania. Koszty te są reprezentowane w sieci jako trzy podstawowe moduły. Zastosowanie tego modelu do oceny konkretnej maszyny wymaga jego konkretyzacji. Konkretyzacja ta przebiega dwuetapowo. Na pierwszym etapie następuje dopasowanie topologii sieci do konkretnej sytuacji. Topologia sieci uwzględnia formę zakupu maszyny (za gotówkę lub w kredycie) i źródła energii (maszyna samobieżna, przyczepiana lub stacjonarna napędzana silnikiem elektrycznym). Dopasowanie sieci polega na aktywacji odpowiednich jej

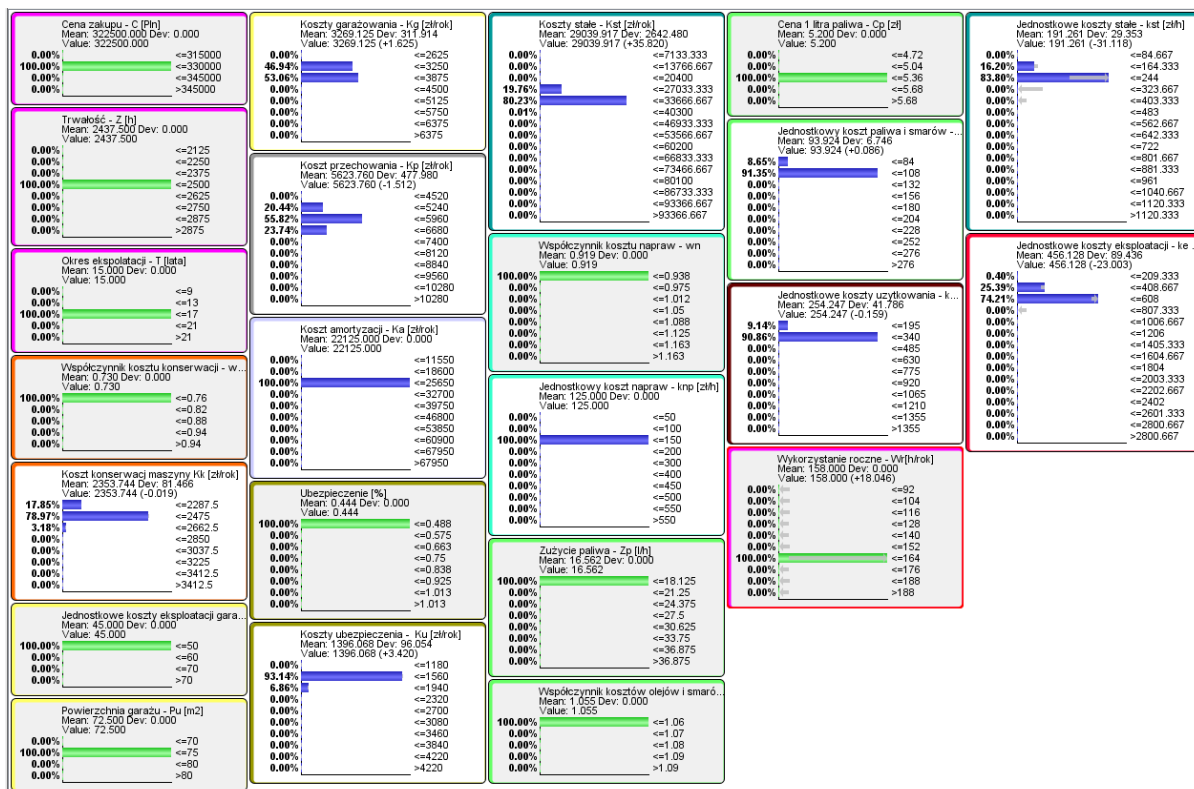
modułów. W przypadku gdy zakup finansowany jest kredytem aktywowany jest moduł umożliwiający wyznaczanie *jednostkowego kosztu kredytu*. Analogicznie, w zależności od źródła energii aktywowany jest moduł umożliwiający wyznaczanie *jednostkowego kosztu paliwa* (w przypadku maszyny samobieżnej lub przyczepianej) albo moduł *jednostkowy koszt energii elektrycznej* (w przypadku maszyny stacjonarnej napędzanej energią elektryczną). Drugi etap konkretyzacji to przypisanie zmiennym reprezentowanym przez węzły sieci apriorycznych rozkładów prawdopodobieństw, a w szczególności doboru odpowiednich przedziałów zmienności wartości poszczególnych zmiennych w zależności od analizowanego obiektu.

3. Wyznaczanie jednostkowych kosztów eksploatacji kombajnu zbożowego

W celu weryfikacji modelu przeprowadzono obliczenia dotyczące kombajnów zbożowych o szerokości roboczej 4,5 – 5 metrów. Topologia sieci uwzględnia możliwość zakupu maszyny za gotówkę oraz z częściowym kredytowaniem. Aprioryczne rozkłady prawdopodobieństwa oszacowano na podstawie danych katalogowych oraz literaturowych [24]. Przyjęto, że cena zakupu to $C=322500$ zł., trwałość $Z=2440$ h, okres eksploatacji $T=15$ lat, roczne wykorzystanie $W_r=158$ h/rok, koszty paliwa i ubezpieczenia i inne składowe odpowiadają aktualnie obowiązującym cenom. Pierwszy analizowany przykład zakłada, że zakupu dokonano ze środków własnych.

Typowy mechanizm funkcjonowania sieci (predykcja skutków decyzji) umożliwia wyznaczenie jednostkowych kosztów w zależności od formy zakupu, założonych parametrów kombajnu, prognozowanych kosztów serwisowania oraz przewidywanej intensywności jego użytkowania.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów poziomu kosztu, optymistycznego oraz pesymistycznego. Wariant optymistyczny (rys. 2) zakłada, że składowe koszty wyznaczone metodą wskaźnikową przyjmują wartości minimalne, drugi natomiast zakłada, że koszty te są maksymalne.

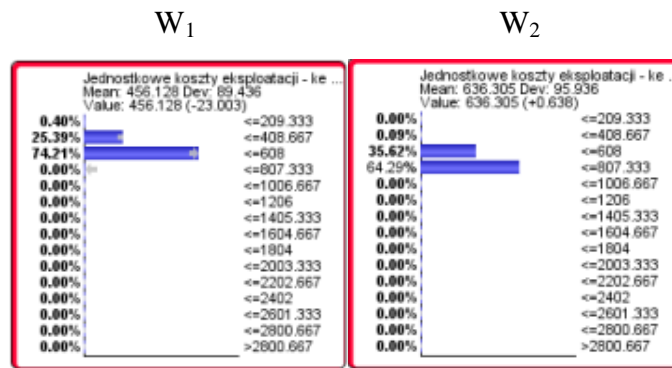


Rys. 2. Wnioskowanie predykcyjne wariant optymistyczny (opracowanie własne)

W przypadku gdy zmienna znana jest z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa (soft evidence) to nasza wiedza dotycząca zmiennej terminalnej jest rozmyta. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń wartości oczekiwane zmiennych reprezentujących koszty jednostkowe: eksploatacji, stałe oraz użytkowania wynoszą odpowiednio (w zł na h pracy): 456,1 (odchylenie standardowe 89,4), 191,3 (odchylenie standardowe 29,4), 254,3 (odchylenie standardowe 41,8).

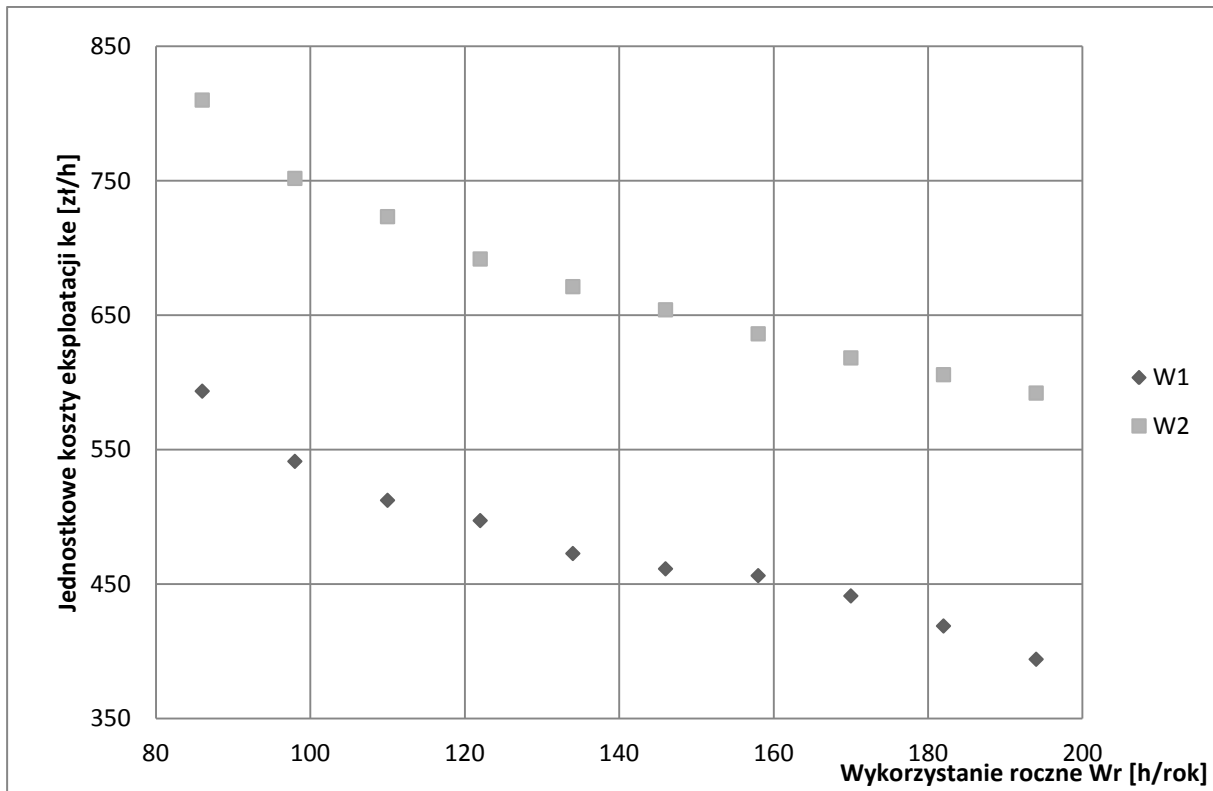
W przypadku wariantu pesymistycznego (rys. 3) jednostkowy koszt eksploatacji jest zmienną losową o wartości oczekiwanej 636,3. Wartości oczekiwane poszczególnych składowych wynoszą: jednostkowy koszt stały 214,3 (odchylenie standardowe 28,6), oraz jednostkowy koszt użytkowania 411,0 o odchyleniu standardowym 14,6.

Na rys. 3 przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa nad zbiorem wartości zmiennych reprezentujących jednostkowe koszty eksploatacji, w przypadku wariantu optymistycznego (W_1) oraz pesymistycznego (W_2).



Rys. 3. Rozkłady prawdopodobieństwa w przypadku jednostkowych kosztów eksploatacji (opracowanie własne)

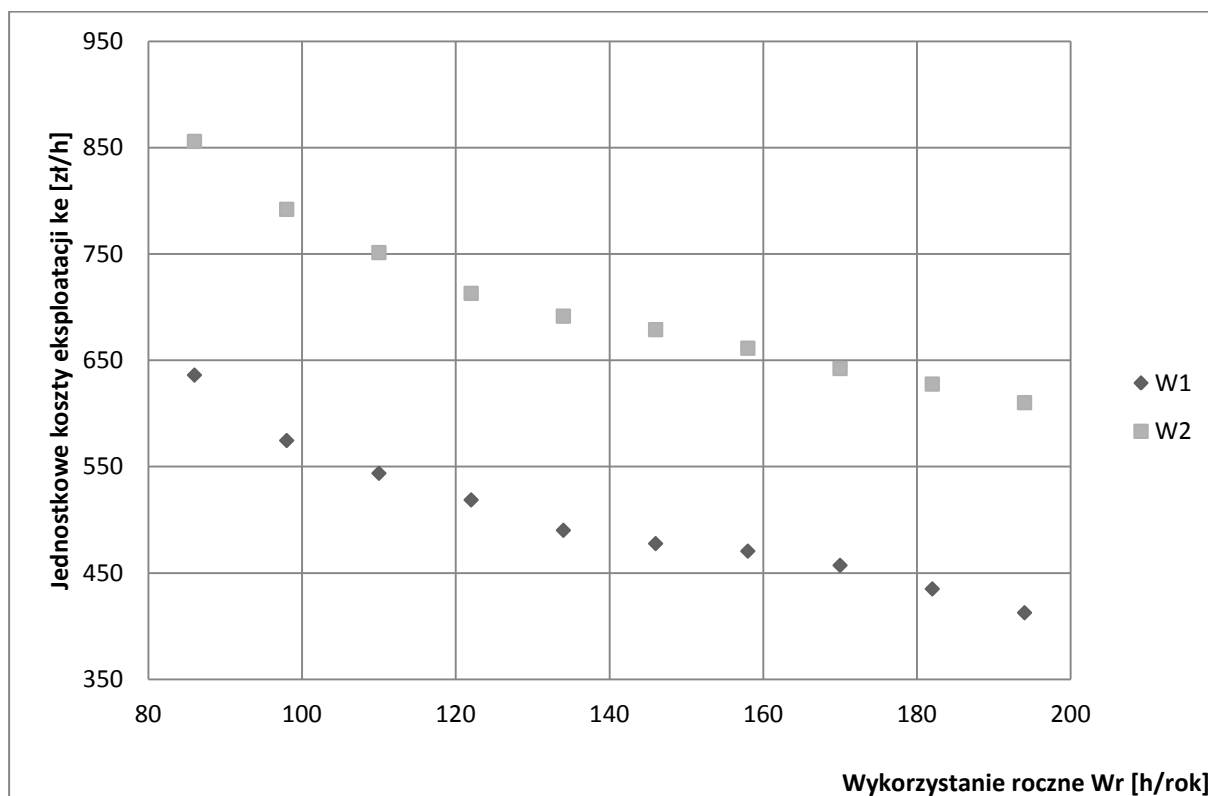
Na rys. 4 przedstawiono wyznaczoną przy pomocy sieci zależność pomiędzy jednostkowymi kosztami eksploatacji (k_e) a rocznym wykorzystaniem kombajnu (W_r) dla obu analizowanych wariantów.



Rys. 4. Jednostkowe koszty eksploatacji w zależności od rocznego wykorzystania kombajnu

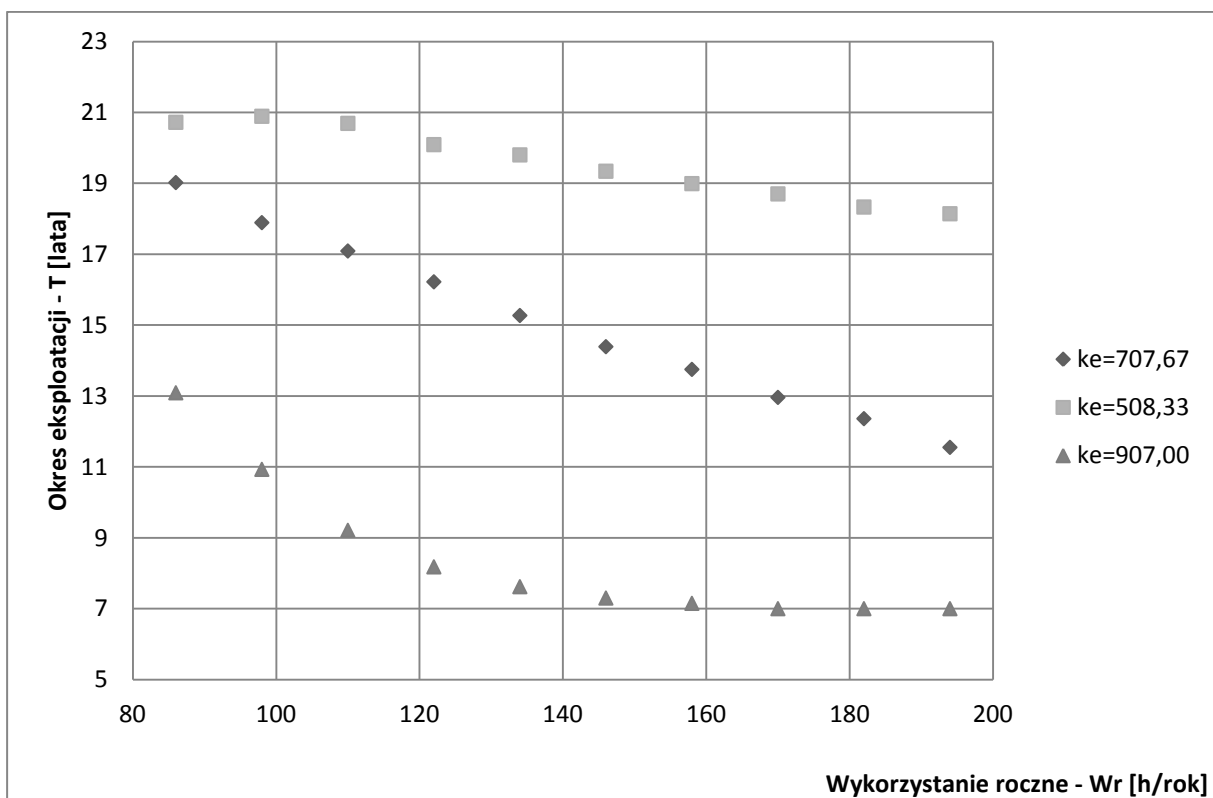
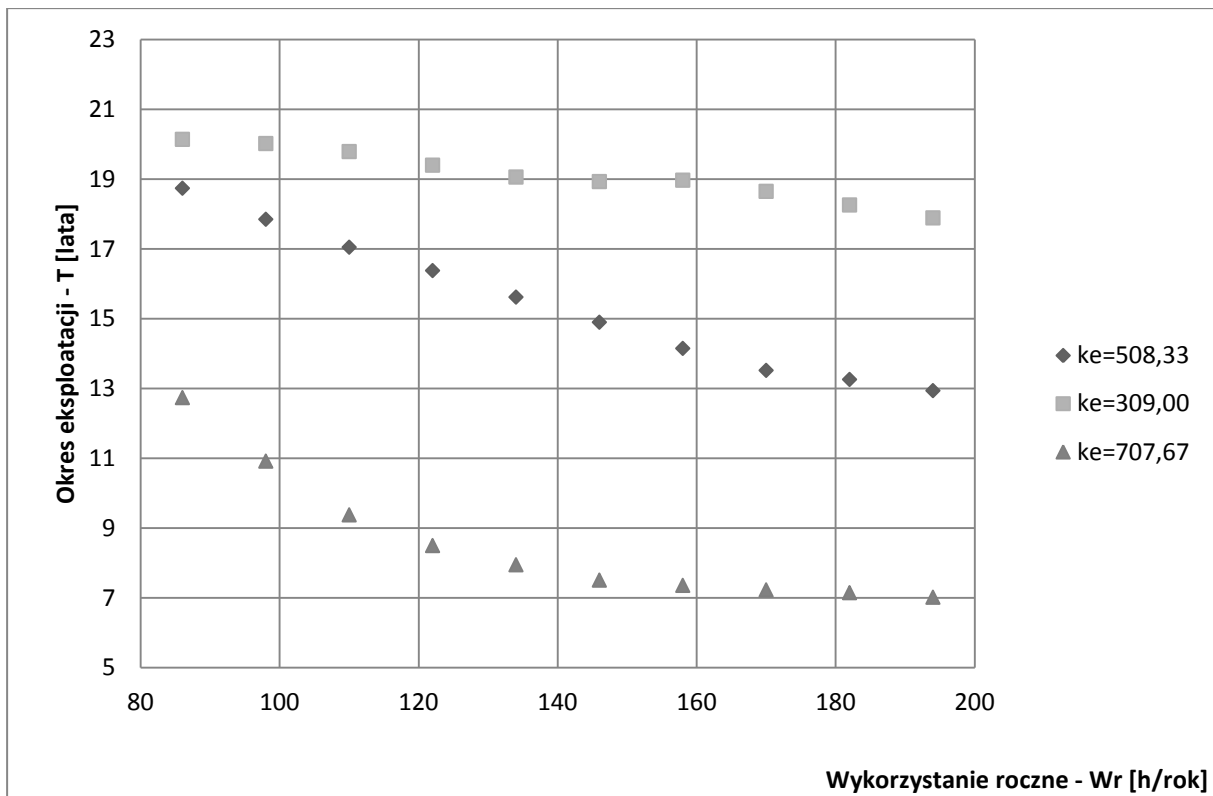
Podobne obliczenia przeprowadzono w przypadku gdy zakup w połowie sfinansowano kredytem, przy założeniu optymistycznego wariant poszczególnych składowych kosztu. Przyjęto okres spłaty kredytu $T_{kr}=3,5$ roku. W analizowanych wariantach założono następujące wysokości stóp procentowych i prowizji: $r=11,4$ (W_1) oraz $r=14,2$ (W_2), w przypadku prowizji założono że wynosi ona 0,7% (W_1) i 1,9% (W_2) wartości kredytu. W

wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczono jednostkowy koszt eksploatacji w zależności od rocznego wykorzystania kombajnu dla obu analizowanych wariantów (rys. 5).



Rys. 5. Jednostkowe koszty eksploatacji w zależności od rocznego wykorzystania kombajnu (zakup z 50% kredytem)

Dostępny w sieciach mechanizm wnioskowania diagnostycznego (projekcja temporalna wstecz) jest przydatny w sytuacji gdy chcemy określić warunki jakie muszą być spełnione aby osiągnąć założony poziom kosztów jednostkowych. Na rys. 6 przedstawiono punkty odpowiadające stałym kosztom jednostkowym w zależności od okresu eksploatacji i rocznego wykorzystania obiektu dla inwestycji bez kredytu i dwóch analizowanych wariantów, optymistycznego i pesymistycznego.



Rys. 6. Punkty odpowiadające stałym jednostkowym kosztom eksploatacji w zależności od okresu eksploatacji (T) i rocznego wykorzystania W_r (wariant optymistyczny wykres górny, wariant pesymistyczny wykres dolny)

Przedstawione powyżej scenariusze funkcjonowania modelu przez analogię można zastosować do wyznaczania innych składowych kosztów. Możliwe do uzyskania w wyniku funkcjonowania modelu informacje mają duże znaczenia praktyczne i mogą być wykorzystane w procesie zarządzania eksploatacją.

Podsumowanie

Zaimplementowana w sieci bayesowskiej procedura wyznaczania jednostkowych kosztów eksploatacji to przykład procesu obliczeniowego, który ze względu na wbudowane mechanizmy wnioskowania może być całkowicie zautomatyzowany. Łatwość dowolnego kształtowania danych wejściowych w zależności od dostępnych zasobów finansowych i przewidywanych warunków użytkowania powoduje, że zaproponowana metoda może mieć duże znaczenia na etapie projektowania, planowania, monitorowania oraz analizy procesu eksploatacji konkretnego obiektu w konkretnych warunkach jego użytkowania.

Wnioskowanie prognostyczne umożliwia przeanalizowanie wszystkich możliwych rozwiązań w zależności od stanu otoczenia eksploatacyjnego. Z dokładnością do rozkładu prawdopodobieństwa można określić zbiór rozwiązań akceptowalnych. Wnioskowanie hipotetyczno dedukcyjne (projekcja temporalna wstecz) pozwala dla zadanych wartości zmiennej terminalnej (w tym przypadku dla jednostkowych kosztów eksploatacji) określić wymagania w odniesieniu do zmiennych reprezentujących poszczególne składowe koszty oraz zmiennych charakteryzujących parametry maszyny oraz warunki jej użytkowania.

Dostępne w systemie mechanizmy uczenia maszynowego [12] zapewniają łatwość adaptacji modelu zarówno na poziomie topologii (dostosowanie modelu do konkretnego typu obiektu) jak i na poziomie określania apriorycznych rozkładów prawdopodobieństwa poszczególnych zmiennych.

Literatura

1. Andrzejczak K. Metody prognozowania w modelowaniu eksploatacji środków transportu. Rozprawy, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2013; nr 496.
2. Barlow R.E. Using influence diagrams. In: Clarotti CA, Lindley DV, editors. Accelerated life testing and experts' opinions in reliability 1988; 145–57.
3. Bartnik G., Kalbarczyk G. and Marciniak A. W. Application of the operational reliability model to the risk analysis in medical device production. Teka 2011; Vol. XIC: 366-370.
4. Bartnik G., Kusz A. and Marciniak A. Dynamiczne sieci bayesowskie w modelowaniu procesu eksploatacji obiektów technicznych. Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2006; t. II: 201-208.

5. Bartnik G. and Marciniak A. W. Operational reliability model of the production line. *Teka* 2011; Vol. XIX: 361-365.
6. Berners-Lee T., Karger D.R., Stein L.A., Swick R.R., Weitzner D.J. Proposal: Semantic Web Development Retrieved from W3C 2000.
7. Berners-Lee, Hendler J., Lassila O. The Semantic Web. *Scientific American* 2001.
8. Chmielecki A. Konceptualne podstawy kognitywistyki – krytyka i propozycje własne. Szczecin: VII Zjazd Filozoficzny 2004.
9. Chun Su, Ye-qun Fu.:Reliability Assessment for Wind Turbines Considering the Influence of Wind Speed Using Bayesian Network. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16 (1): 1–8.
10. Cost S., Finin T., Joshi A. A Case Study in the Semantic Web and DAML+OIL. *IEEE Intelligent Systems* 2002.
11. Dokumentacja programu BayesiaLab. <http://www.bayesia.com>, 10.06.2014.
12. Doguc O. and Ramirez-Marquez J.E. A generic method for estimating system reliability using Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety* 2009; 94: 542-550.
13. Halpern J., Y. Reasoning about uncertainty. The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, 2005.
14. Hołaj H., Kusz A., Maksym P., Marciniak A. W. Modelowanie problemów decyzyjnych w integrowanym systemie produkcji rolniczej. *Inżynieria Rolnicza* 2011; 6 (131): 53-60.
15. Kocira S., Kuboń M. The operating costs machines and general type of farming. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu SERiA* 2011; Tom XIII, Zeszyt 6: 103-107.
16. Kusz A., Maksym P., Marciniak A. W. Bayesian networks as knowledge representation system in domain of reliability engineering. *Teka* 2011; Vol. XIX: 173-180.
17. Kusz A., Maksym P., Skwarcz, J. Grudziński J. The representation of actions in probabilistic networks. *Teka* 2013; Vol. XII: 41-47.
18. Kusz A., Marciniak A.W. Modelowanie niezawodności złożonych systemów bioagrotechnicznych. *Inżynieria Rolnicza* 2010; 5 (114): 147-154.
19. Maksym P. Podstawowe zasady modelowania procesu produkcji rolniczej. *Inżynieria rolnicza* 2011; 1 (126): 155-162.
20. Maksym P., Marciniak A. W., Kostecki R. Zastosowanie sieci bayesowskich do modelowania rolniczego procesu produkcyjnego. *Inżynieria Rolnicza* 2006; 12 (87): 321-330.
21. Maksym P., Marciniak A. W., Kusz A. Modelowanie syntezy działań ochronnych w rolniczym procesie produkcyjnym. *Inżynieria Rolnicza* 2011; 4 (129): 213-220.
22. Marciniak A. Projektowanie systemu reprezentacji wiedzy o rolniczym procesie produkcyjnym. *Rozprawy naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji* 2005; zeszyt 298.
23. Młyńczak M. *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.
24. Muzalewski A. *Koszty eksploatacji maszyn*. Wydawnictwo ITP, 2010; 25.
25. Oniśko A., Marek J. Druzdzel M. J., Wasyluk H. Learning Bayesian network parameters from small data sets: Application of noisy-or gates. *International Journal of Approximate Reasoning* 2001; 27(2): 165–182.
26. Pearl J. Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks. *Artificial Intelligence*. 1986; 29(3): 241-288.
27. Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, 1988.
28. Piasecki S. Eksploatacyjna ocena wyrobu na przykładzie maszyn roboczych. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 1(8): 3-8.

29. Piasecki S. Zasady analizy i oceny obiektu technicznego. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 1(8): 50-51.
30. Tchangani A.P. Reliability analysis using Bayesian networks. *Stud. Inform. Control* 2001; 10(3): 181–188.