

Marek Klimkiewicz
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

ZASTOSOWANIE ZBIORÓW PRZYBLIŻONYCH DO DIAGNOSTYKI APARATURY PALIWOWEJ SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Streszczenie

Wykorzystano właściwości zbiorów przybliżonych do wykrywania usterek układów paliwowych silników o zapłonie samoczynnym. Zbudowano model, w którym zmiennymi wejściowymi są symptomy zaobserwowane przez użytkownika wskazujące na niewłaściwą pracę silnika oraz kontrolne pomiary wykonane przez mechanika. Zmienną wyjściową jest wykryta usterka. Wygenerowano reguły pewne oraz reguły przybliżone pozwalające na wykonanie diagnozy. Przeprowadzono ocenę jakości zbudowanego modelu regułowego oraz jego weryfikację za pomocą walidacji krzyżowej.

Słowa kluczowe: aparatura paliwowa, diagnostyka, zbiory przybliżone, silniki o zapłonie samoczynnym

Wprowadzenie i cel pracy

Wykrywanie usterek w silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym wiąże się z dużymi trudnościami. Dotyczy to zwłaszcza usterek związanych z aparaturą paliwową. W diagnostyce coraz częściej wykorzystywane są systemy ekspertowe. Przy budowie systemów ekspertowych wykorzystuje się różne metody sztucznej inteligencji m. in. sieci neuronowe, algorytmy genetyczne, zbiory rozmyte oraz kombinacje tych metod [Korbicz i in. 2002]. Celem pracy jest budowa systemu wspomagającego diagnozowanie aparatury paliwowej silników o zapłonie samoczynnym wykorzystującego właściwości zbiorów przybliżonych.

Zbiory przybliżone

Teorię zbiorów przybliżonych opracował na początku lat osiemdziesiątych Pawlak [Pawlak 1982]. Zbiory powstały po odrzuceniu wymogu istnienia ściśle określonych granic i definiowane są w oparciu o dolne i górne przybliżenie zbioru. Logika

oparta na teorii zbiorów przybliżonych jest niezwykle przydatna do rozwiązywania problemów wymagających inteligentnej analizy danych, poszukiwania ukrytych zależności pomiędzy danymi oraz podejmowania decyzji w przypadku istnienia niepełnych lub częściowo sprzecznych danych. Podstawowe pojęcia dotyczące zbiorów przybliżonych przedstawia Greco i in. [2001]. System informacyjny to czwórka uporządkowana $S = \langle U, Q, V, f \rangle$, gdzie: U – skończony zbiór obiektów, Q – skończony zbiór atrybutów, V_q – dziedzina atrybutów q ,

$$V = \prod_{q \in Q} V_q \text{ i } f: U \times Q \rightarrow V \quad (1)$$

f – funkcja informacyjna; jest to funkcja zupełna taka, że dla każdego $q \in Q$, $x \in U$ $f(x, q) \in V_q$

Każdy niepusty podzbiór cech P jest związany z relacją nierozróżnialności na U oznaczoną przez I_P :

$$I_P = \{(x, y) \in U \times U : f(x, q) = f(y, q) \forall q \in P\} \quad (2)$$

Jeżeli $(x, y) \in I_P$, można powiedzieć, że obiekty x i y są P -nierozróżnialne. Wprowadzenie relacji nierozróżnialności umożliwiło zdefiniowanie P -dolnego (oznaczenie $\underline{P}(X)$) i P -górnego (oznaczenie $\overline{P}(X)$) przybliżenia zbioru X .

$$\underline{P}(X) = \{x \in U : I_P(x) \subseteq X\} \quad (3)$$

$$\overline{P}(X) = \prod_{x \in X} I_P(x). \quad (4)$$

gdzie:

$I_P(x)$ – zbiór P -elementarny zawierający x .

Budowa modelu

Zbudowano model diagnostyczny, w którym zmiennymi wejściowymi są symptomy zaobserwowane przez użytkownika wskazujące na niewłaściwą pracę silnika oraz kontrolne pomiary wykonane przez mechanika. Zmienną wyjściową jest usterka, którą należy usunąć aby zapewnić prawidłową pracę silnika. Przypadki usterek i odpowiadające im symptomy, sprawdzenia oraz wartości pomiarowe rejestrowano w serwisie specjalizującym się w naprawie aparatury paliwowej. Zgromadzono 1077 takich przypadków. W tabeli 1. przedstawiono wartości jakie może przyjmować zmienna wejściowa „Symp” oznaczająca symptomy. W tabeli 2. przedstawiono nazwy pozostałych zmiennych wejściowych: sprawdzenia i pomiary.

Zmienne sprawdzenia mogą przyjmować Wartości „T” – jeżeli spełniają wymagania lub „N” – jeżeli ich nie spełniają. Pomiary są zmiennymi liczbowymi. Zmienna wyjściowa ”Usterka” przyjmuje 16 wartości, których kody przedstawiono w tablicy 3.

*Tabela 1. Wartości zmiennej wejściowej „Symp”
Table 1. Values of input variable „Symp”*

Lp.	Symptomy	Wartości zmiennej „Symp”
1.	Trudny rozruch silnika	ROZRUCH
2.	Silnika nie można uruchomić	URUCH_SIL
3.	Nadmierne dymienie	DYMIENIE
4.	Zbyt mała moc silnika	MOC
5.	Nadmierny hałas	HAŁAS
6.	Nierównomierna praca silnika	NIER_PR_SIL
7.	Niewłaściwa maksymalna prędkość obrotowa	MAKS_PR
8.	Nadmierne zużycie paliwa	ZUŻ_PAL
9.	Silnik zbyt wolno schodzi z wysokiej prędkości obrotowej	SCHOD_PR
10.	Silnika nie można wyłączyć	WYŁĄCZ_S

*Tabela 2. Nazwy zmiennych wejściowych: sprawdzenia i pomiary
Table 2. Names of inputs variables: checks and measurements*

Lp.	Sprawdzenia i pomiary	Nazwy zmiennych
1.	Czy silnik uruchamia się po wyjęciu rdzenia z zaworka elektromagnetycznego?	Ezaw
2.	Czy brak pęcherzyków powietrza w przezroczystym przewodzie doprowadzającym paliwo do pompy?	Pęch
3.	Czy ręczna pompka podaje paliwo?	Ręcz
4.	Czy brak zapachu benzyny w paliwie?	Benz
5.	Czy akumulator w odpowiednim stanie?	Akum
6.	Czy świece żarowe sprawne?	Sw
7.	Czy kąt początku tłoczenia ustawiony prawidłowo?	Kąt
8.	Czy podczas napędu silnika rozrusznikiem z króćca przelewowego wypływa paliwo?	Tr
9.	Ciśnienie sprężania - 1	Spr1
10.	Ciśnienie sprężania - 2	Spr2
11.	Ciśnienie sprężania - 3	Spr3
12.	Ciśnienie sprężania - 4	Spr4
13.	Czy drożny jest układ dolotowy powietrza?	DrPow
14.	Czy drożny jest układ wydechowy?	DrWyd
15.	Czy wtryskiwacze są w dobrym stanie?	Rozp
16.	Czy kolejność połączenia przewodów wysokiego ciśnienia jest właściwa?	KolP
17.	Czy regulacja zderzaka śruby zapobiegającej zgaśnięciu silnika jest prawidłowa?	Zderz
18.	Czy prawidłowo wyregulowana jest maksymalna prędkość obrotowa silnika?	Maks

Zastosowano system wnioskowania oparty na zbiorach przybliżonych. Reguły zostały wygenerowane za pomocą programu ROSE 2 [Prędko i in. 1998, 1999]. Korzystając z wiedzy zgromadzonej w serwisie wyindukowanych zostało 38 reguł decyzyjnych: 36 pewnych i 2 reguły przybliżone.

Tabela 3. Wartości zmiennej wyjściowej
Table 3. Values of output variable

Lp.	Usterki	Wartości zmiennej wyjściowej „Usterka”
1.	Usterka silnika	Sil
2.	Uszkodzona pompa wtryskowa	Pomp
3.	Niewłaściwa regulacja maksymalnej prędkości obrotowej	MaksO
4.	Niewłaściwa regulacja śruby zderzaka wolnych obrotów	Zderzak
5.	Niewłaściwa kolejność połączenia przewodów wysokiego ciśnienia	KolPrz
6.	Zużyte rozpylacze	NRozpyl
7.	Niedrożność układu paliwowego	NdrPal
8.	Niedrożność układu dolotowego powietrza	NdrPow
9.	Niskie ciśnienie sprężania	NSpr
10.	Niewłaściwie ustawiony kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa	NKąt
11.	Niesprawne świece żarowe	NŚw
12.	Niesprawny akumulator	NAkum
13.	Olej napędowy zawiera benzynę	ZBenz
14.	Zapowietrzony układ doprowadzający paliwo do pompy	Pow
15.	Uszkodzony zawór elektromagnetyczny	NEzaw
16.	Zablokowany układ wydechowy	NdrWyd

Każda reguła opisana została za pomocą następujących parametrów umieszczonych w nawiasach kwadratowych umieszczonych za konkluzją:

- liczba pokrytych przykładów,
- liczba pozytywnych pokrytych przykładów,
- wsparcie reguły – stosunek liczby pozytywnych pokrytych przykładów do liczby przykładów zgodnych z konkluzją,
- zaufanie reguły - stosunek liczby pozytywnych pokrytych przykładów do liczby pokrytych przykładów,
- rozkład przynależności do klas decyzyjnych obiektów pokrywanych przez regułę,
- numer obiektu i przynależność do klasy.

Poniżej przedstawiono kilka reguł pewnych:

rule 1. (DrWyd = N) => (Usterka = NdrWyd); [6, 6, 100.00%, 100.00%][6, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]{763, 764, 765, 766, 767, 953}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}

rule 2. (Ezaw = N) => (Usterka = NEzaw); [17, 17, 100.00%, 100.00%][0, 17, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]{165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 1070, 1071, 1072, 1073, 1074, 1075}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}

rule 3. (Symp in {ROZRUCH, NIER_PR_SIL, DYMIENIE, MAKS_PR, MOC}) & (Pęch = N) & (Maks = T) => (Usterka = Pow); [78, 78, 93.98%, 100.00%]...

Tak otrzymana reprezentacja wiedzy w postaci zbioru reguł decyzyjnych jest wolna od wszelkiej nadmiarowości. Reguły mają zredukowaną liczbę atrybutów warunkowych. Wśród wszystkich wygenerowanych reguł aż 14 posiada tylko po jednym atrybucie warunkowym. Pozostałe reguły zawierają do ośmiu atrybutów warunkowych. Model zawiera dwie reguły przybliżone:

rule 37. (Symp = DYMIENIE) & (Kąt = T) & (Spr1 = 2) & (Spr2 = 3) & (Spr4 = 4) & (DrPow = T) & (Rozp = T) => (Usterka = Pomp) OR (Usterka = Sil); [2, 2, 100.00%, 100.00%][0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1]{}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}, {}

rule 38. (Symp = HAŁAS) & (Pęch = N) & (Spr1 = 4) => (Usterka = Pow) OR (Usterka = NdrPal); [2, 2, 100.00%, 100.00%]...

Oznacza to, że przy tych samych atrybutach warunkowych możemy otrzymać różne atrybuty decyzyjne. W praktyce zachodzi wtedy potrzeba przeprowadzenia dodatkowych czynności demontażowych i sprawdzających aby dokładnie ustalić usterki.

Analiza modelu

Przeprowadzono ocenę jakości zbudowanego modelu regułowego. Otrzymano jakość klasyfikacji równą 0,99. Jakość klasyfikacji jest to miara określająca frakcję spójnych obiektów (obiekty tak samo opisane a przydzielone do różnych klas nazywa się niespójnymi). Dokładność przybliżenia poszczególnych klas została przedstawiona w tabeli 4.

Tabela 4. Dokładność klasyfikacji

Table 4. Quality of classification

Klasa decyzyjna USTERKA	Liczba przykładów	Przybliżenie dolne	Przybliżenie górne	Dokładność
Sil	18	17	19	0,89
Pomp	40	39	41	0,95
MaksO	7	7	7	1,00
Zderzak	10	10	10	1,00
KolPrz	21	21	21	1,00
NRozpył	165	165	165	1,00
NdrPal	56	55	57	0,96
NdrPow	46	46	46	1,00
NSpr	77	77	77	1,00
NKąt	435	435	435	1,00
NŚw	60	60	60	1,00
NAkum	24	24	24	1,00
ZBenz	12	12	12	1,00
Pow	83	82	84	0,98
NEzaw	17	17	17	1,00
NdrWyd	6	6	6	1,00

Jakość modelu została zweryfikowana za pomocą walidacji krzyżowej. Uzyskano ogólny wynik poprawnej klasyfikacji ok.94 %.

Podsumowanie

Otrzymana reprezentacja wiedzy w postaci zbioru reguł decyzyjnych jest wolna od wszelkiej nadmiarowości. Zbudowany model regułowy może być wykorzystany zarówno bezpośrednio do diagnostyki jak również do szkolenia pracowników zajmujących się naprawą silników o zapłonie samoczynnym. Ze względu na to, że wiedza jest wyrażona w sposób podobny jak w języku naturalnym użytkownik może łatwo ją zrozumieć.

Bibliografia

Greco S., Matarozo B., Słowiński R. 2001. Rough sets theory for multicriteria decision analysis. *Europ. Journ. of Operat. Res.* 129. s. 1-47.

Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W. 2002. Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT. Warszawa.

Pawlak Z. 1982. Rough sets. *International Journal of Information & Computer Sciences* 11. s. 341-356.

Prędko B., Słowinski R., Stefanowski J., Susmaga R., Wilk Sz. 1998. ROSE - Software Implementation of the Rough Set Theory. W: Polkowski L., Skowron A. i in. *Rough Sets and Current Trends in Computing, Lecture Notes in Artificial Intellig.*, vol. 1424. Springer-Verlag, Berlin. s. 605-608.

Prędko B., Wilk Sz. 1999. Rough Set Based Data Exploration Using ROSE System. W: Ras Z.W., Skowron A. i in. *Foundations of Intelligent Systems, Lecture Notes in Artif. Intellig.*, vol. 1609. Springer-Verlag, Berlin. 172-180.

APPLICATION OF ROUGH SETS IN DIAGNOSTICS OF DIESEL FUEL INJECTION SYSTEMS

Summary

The rough sets were used to fault diagnostics of fuel systems diesel engine. A model was developed in which input variables are the symptoms observed by the users of engines and also the checks and measurements executed by a technician. An output variable is the fault which has to be repaired. On the base of rough sets certain and approximate rules were inducted to made diagnosis possible. Quality of developed rule model was estimated and verified by cross classification.

Key words: diagnostics, diesel engines, diesel fuel injection system, rough sets