

dr inż. Andrzej Sowa¹

Instytut Pojazdów Szynowych
Politechnika Krakowska
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Polska
E-mail: andre@mech.pk.edu.pl

Modele formalne generowania zbiorów sprawdzeń dla oceny stanu technicznego obiektów złożonych

Słowa kluczowe: *obiekty złożone, ocena stanu technicznego, modele formalne obiektów, binarna i wielowartościowa ocena, wspomaganie komputerowe*

Streszczenie: Praca dotyczy problemów związanych z budową systemów wspomaganego komputerowo generowania zbiorów sprawdzeń cech niezbędnych do oceny zdatności obiektów złożonych, a także lokalizacji niezdatności ich elementów składowych. Analizowano przydatność do tego celu macierzowej metody określania zbiorów sprawdzeń oraz metody skreśleń. Sformułowano binarne i trójwartościowe modele ocen stanu technicznego elementów obiektu oraz jego cech wejściowych i wyjściowych. Pozwala to wtedy na utworzenie macierzowego modelu obiektu, wykorzystywanego w obu analizowanych metodach. Dla metody macierzowej zdefiniowano także binarne i trójwartościowe modele oceny rozróżnialności stanów technicznych obiektu. Binarne modele wykorzystano w programie generującym zbiory cech testu zdatności i lokalizującego, napisanym przy użyciu pakietu Mathematica. Przy trójwartościowym modelu ocen do generowania zbiorów sprawdzeń cech dla obu testów zaproponowano użycie metody skreśleń i sformułowano dla niej warunki rozróżnialności stanów technicznych. Przedstawiono także przykład użycia tej metody do określenia zbiorów sprawdzeń cech pozwalających na ocenę stanu technicznego części układu pneumatycznego hamulca wagonu.

1. Wstęp

Wykorzystanie nowoczesnych technologii do budowy współczesnych pojazdów lądowych nie stanowi zabezpieczenia przed możliwością występowania zużycia i uszkodzeń ich elementów składowych. Wykrywanie tych niezdatności w wielu złożonych zespołach pojazdów jest niejednokrotnie zadaniem trudnym do zrealizowania bez użycia pewnych metod identyfikacji stanów technicznych. Metody te, opisane np. w [1,3,5,6,13,15], umożliwiają wytypowanie zbiorów sprawdzeń niezbędnych do kontroli poprawności funkcjonowania obiektu oraz lokalizacji niezdatności jego elementów. Potrzebę stosowania takich dwu etapów badania stanu technicznego wyróżnia się między innymi w [9,15]. Część metod tworzenia zbiorów sprawdzeń wykorzystuje macierzowy model obiektu badanego. Jest to najczęściej model, który tworzony jest w oparciu o binarną ocenę cech obiektu oraz stanu technicznego jego elementów składowych. Metodami, które łatwo dają się wykorzystać do wspomaganego komputerowo generowania zbiorów sprawdzeń testów zdatności i lokalizacji uszkodzeń są metoda macierzowa (macierzy Boole'a [3]) oraz metoda skreśleń (liczby charakterystycznej [11]). Zaletą tej drugiej jest możliwość jej efektywnego wykorzystania w

¹

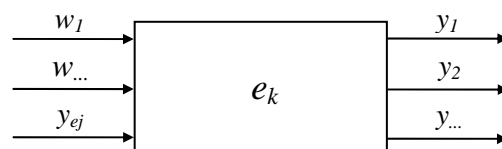
dr inż. Andrzej Sowa – Instytut Pojazdów Szynowych, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Poland, E-mail: andre@mech.pk.edu.pl

przypadku wielowartościowej oceny cech obiektu i stanu technicznego jego elementów składowych. Zagadnienia związane z obiektami, których elementy mogą przyjmować wiele stanów technicznych rozważa się w szeregu pracach [5,7,8,10,12,16,17], zwłaszcza w odniesieniu do poszukiwania optymalnych strategii obsługi. Dla takich obiektów występuje potrzeba stosowania wielowartościowej oceny cech identyfikujących ich stan techniczny [2].

W niniejszej pracy przedstawione będą modele formalne metody macierzowej i metody skreśleń, które mogą być użyte w przypadku binarnej oraz trójwartościowej oceny cech wejściowych i wyjściowych oraz stanu technicznego elementów składowych obiektu. Zostaną także porównane możliwości wykorzystania obu metod do wspomaganego komputerowo generowania zbiorów sprawdzeń testu zdatności i testu lokalizującego.

2. Binarne modele ocen

Obiekt techniczny może być przedstawiony za pomocą modelu funkcjonalnego [3], który tworzy pewną ilość wyróżnionych bloków (prostokątów) e_k reprezentujących określone zespoły, podzespoły lub elementy tego obiektu. Na pojedynczy blok funkcjonalny mogą oddziaływać określone zewnętrzne cechy wejściowe (w_i) lub cechy wyjściowe pochodzące od innych elementów obiektu (y_{ej}), a na wyjściu tego bloku uzyskuje się określone cechy wyjściowe (y_j). Każdy taki blok funkcjonalny można przedstawić jak na rys. 1 [13].



Rys. 1. Blok funkcjonalny jako element modelu funkcjonalnego: e_k – element, $w_1, w...$ – zewnętrzne cechy wejściowe, $y_1, y_2, y...$ – cechy wyjściowe, y_{ej} – cecha wyjściowa elementu e_j [13]

Zarówno stan techniczny elementu jak i cechy wejściowe oraz wyjściowe podlegają ocenie w procesie badania danego obiektu technicznego. Przyjęcie określonego modelu tych ocen umożliwia także przejście od modelu funkcjonalnego obiektu do modelu macierzowego.

Do binarnej oceny stanu technicznego każdego elementu obiektu można użyć dwuwartościowej funkcji charakterystycznej, wykorzystywanej np. w [3] i [7], a której postać może być zapisana następująco:

$$Q_k = \phi_2(e_k) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } e_k \Leftrightarrow S_0 \\ 0, & \text{gdy } e_k \Leftrightarrow S_1 \end{cases} \quad (1)$$

w której: Q_k – zmienna oceny stanu technicznego elementu e_k ,

$\phi_2(\dots)$ – binarna funkcja charakterystyczna,

S_0, S_1 – stany techniczne elementu e_k , odpowiednio: zdatności i niezdatności.

Dwuwartościowa funkcja (1) przypisuje wartość logiczną „1” każdej zmiennej Q_k odnoszącej się do elementu e_k , jeśli znajduje się on w stanie zdatności S_0 i „0” w przeciwnym przypadku.

Podstawą binarnej oceny cech wejściowych i wyjściowych jest sprawdzenie czy cecha badana zwarta jest w określonym przedziale wartości. Ujmuje się to formalnie funkcjami charakterystycznymi, które dla ujednoczenia zapisu przedstawić można następująco:

$$v_i = \phi_2(w_i) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } (w_i)_{\min} \leq w_i \leq (w_i)_{\max} \\ 0, & \text{gdy } w_i < (w_i)_{\min} \vee w_i > (w_i)_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_j = \phi_2(y_j) = \begin{cases} 1, & \text{gd}y (y_j)_{\min} \leq y_j \leq (y_j)_{\max} \\ 0, & \text{gd}y y_j < (y_j)_{\min} \vee y_j > (y_j)_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: w_i – zewnętrzna cecha wejściowa dla elementu e_k ,

y_j – oceniana cecha wyjściowa,

v_i – binarna wartość logiczna oceny zewnętrznej cechy wejściowej,

z_j – binarna wartość logiczna oceny cechy wyjściowej,

$(w_i)_{\min}$, $(w_i)_{\max}$ – wartości graniczne cechy wejściowej,

$(y_j)_{\min}$, $(y_j)_{\max}$ – wartości graniczne cechy wyjściowej.

Funkcje te przypisują wartość logiczną „1” odpowiednio do sytuacji, w których cechy wejściowe i wyjściowe mieszczą się w przewidzianych zakresach, wyznaczonych przez wartości $(w_i)_{\min}$, $(w_i)_{\max}$ oraz $(y_j)_{\min}$ i $(y_j)_{\max}$, a „0” w przeciwnym przypadku.

Jeśli założy się, że wartości każdej zewnętrznej cechy wejściowej mieszczą się w normatywnym zakresie, wówczas używając funkcji (1), (2) i (3) można sporządzić model macierzowy obiektu [3]. Przedstawia on zależności pomiędzy cechami wyjściowymi poszczególnych elementów i stanami technicznymi tego obiektu, tj. stanem zdatności i stanami niezdatności wywołanymi pojawieniem się niezdatnych elementów w tym obiekcie. Przy binarnej ocenie macierz takiego modelu nazywana jest często tabelą prawdy.

Tabela prawdy stanowi podstawę do określenia zbiorów cech, które umożliwiają sprawdzenie zdatności obiektu oraz lokalizację niezdatności jego elementów. Wymaga to dwukrotnego przekształcenia tabeli prawdy w macierz testu zdatności i macierz testu lokalizującego, w sposób opisany słownie w [3]. W formalnym ujęciu przekształcenia te wymagają użycia dwu funkcji charakterystycznych: jednej oceniającej rozróżnialność stanu zdatności badanego obiektu od dowolnego stanu niezdatności i drugiej, pozwalającej rozróżnić poszczególne stany niezdatności pomiędzy sobą.

Do oceny rozróżnialności stanów technicznych w pierwszym przypadku może być użyta dwuwartościowa funkcja o postaci:

$$z_j^{0,i} = \phi_2(S_0, S_i) = \forall(i, j \in [1, k]) : \begin{cases} 1, & \text{gd}y z_j(S_0) = 1 \wedge z_j(S_i) = 0 \\ 0, & \text{gd}y z_j(S_0) = z_j(S_i) \end{cases} \quad (4)$$

gdzie: $z_j^{0,i}$ – zmienna logiczna oceny rozróżnialności stanów zdatności i niezdatności,

$z_j(S_0)$ – zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie zdatności S_0 ,

$z_j(S_i)$ – zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie niezdatności S_i .

Dwuwartościowa funkcja oceny rozróżnialności stanów niezdatności jest następująca:

$$z_j^{i,l} = \phi_2(S_i, S_l) = \forall(i, l, k \in [1, k] \wedge (i \neq l)) : \begin{cases} 1, & \text{gd}y z_j(S_i) \neq z_j(S_l) \\ 0, & \text{gd}y z_j(S_i) = z_j(S_l) \end{cases} \quad (5)$$

w której: $z_j^{i,l}$ – zmienna logiczna oceny rozróżnialności stanów niezdatności S_i i S_l na podstawie ocen cechy y_j ,

$z_j(S_i)$ – zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie niezdatności S_i ,

$z_j(S_l)$ – zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie niezdatności S_l .

Funkcje (4) i (5) pozwalają na przekształcenie tabeli prawdy kolejno w macierz testu zdatności i macierz testu lokalizującego. Zamiast tych funkcji można wykorzystać do tego operację dodawania modulo 2, zastosowaną dla odpowiednich wartości z dwuwartościowej tabeli prawdy, czyli wzorów:

$$z_j^{0,i} = z_j(S_0) \oplus z_j(S_i) \quad (6)$$

$$z_j^{i,l} = z_j(S_i) \oplus z_j(S_l) \quad (7)$$

przy czym: \oplus – suma modulo 2.

Uzyskane macierze stanowią podstawę do określenia odpowiednio zbiorów cech dla testu zdatności obiektu i testu lokalizującego. Opis sposobu generowania takich zbiorów przy wykorzystaniu metody macierzowej zawarto w pkt. 4 niniejszej pracy.

3. Trójwartościowe modele ocen

Binarny model ocen nie jest wystarczający w przypadku cech posiadających dwa lub więcej zakresów wartości granicznych, a także dla takich elementów obiektu, które mogą przyjmować różne formy niezdatności [11,13]. W tym ostatnim przypadku, dotyczy to niektórych elementów układów elektrycznych, hydraulicznych lub pneumatycznych, tworzących dany obiekt techniczny. Dla tego rodzaju elementów nawet przy jednym zakresie wartości dopuszczalnych określonej cechy wejściowej lub wyjściowej istotna jest informacja o tym, która z wartości granicznych została przekroczona: maksymalna czy minimalna.

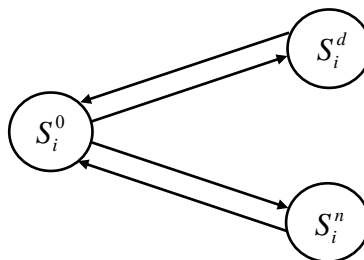
Przykładowo, w układach elektrycznych pojawienie się takich podstawowych niezdatności jak przerwa w obwodzie lub przebicie izolacji mogą w istotny sposób wpływać na wartości cech obiektu, czyli generować odrębne stany techniczne [11]. W takim przypadku dla każdego i -tego elementu obiektu, można określić zbiór stanów technicznych SU_i , zawierający np.:

- stan zdatności - S_i^0 ,
- stan niezdatności z powodu przebicia izolacji - S_i^n ,
- stan niezdatności elementu, wynikający z przerwy w obwodzie - S_i^d ,

czyli:

$$SU_i = \{S_i^0, S_i^n, S_i^d\} \quad (8)$$

Graf przejść pomiędzy stanami technicznymi jednego takiego elementu układu przedstawia rys. 2 [11]. W trakcie eksploatacji możliwe jest przejście ze stanu zdatności do jednego z dwu stanów niezdatności, a powrót do stanu zdatności następuje po wykonaniu odpowiednich czynności obsługowych.



Rys. 2. Graf przejść dla zbioru stanów technicznych przykładowego elementu układu zasilania hamulca szynowego [11]

Uogólniając oznaczenia poszczególnych stanów technicznych pojedynczego elementu, do trójwartościowej jego oceny można zaproponować następującą funkcję charakterystyczną:

$$Q3_k = \phi_3(e_k) = \begin{cases} 2, & \text{gdy } e_k \Leftrightarrow S_2 \\ 1, & \text{gdy } e_k \Leftrightarrow S_0 \\ 0, & \text{gdy } e_k \Leftrightarrow S_1 \end{cases} \quad (9)$$

w której: $Q3_k$ – trójwartościowa zmienna oceny stanu technicznego elementu e_k ,
 S_0, S_1, S_2 – stany techniczne elementu: zdatności, 1-sza i 2-ga forma niezdatności,
 $\phi_3(\dots)$ – trójwartościowa funkcja charakterystyczna.

Jeśli poszczególne elementy obiektu mogą przyjmować więcej niż jedną formę niezdatności, a także gdy istnieje możliwość wystąpienia dowolnej kombinacji elementów niezdatnych, to licznosc pełnego zbioru stanów technicznych takiego obiektu można określić ze wzoru [13]:

$$l_m = (m + 1)^k \quad (10)$$

w którym: l_m – licznosc zbioru stanów technicznych obiektu,
 m – ilość form niezdatności każdego elementu składowego obiektu,
 k – ilość elementów obiektu.

Do trójwartościowej oceny zewnętrznych cech wejściowych oraz cech wyjściowych można wykorzystać następujące funkcje charakterystyczne [13]:

$$v3_i = \phi_3(w_i) = \begin{cases} 2, & \text{gdy } w_i < (w_i)_{\min} \\ 1, & \text{gdy } (w_i)_{\min} \leq w_i \leq (w_i)_{\max} \\ 0, & \text{gdy } w_i > (w_i)_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

$$z3_j = \phi_3(y_j) = \begin{cases} 2, & \text{gdy } y_j < (y_j)_{\min} \\ 1, & \text{gdy } (y_j)_{\min} \leq y_j \leq (y_j)_{\max} \\ 0, & \text{gdy } y_j > (y_j)_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

w których: $v3_i$ – trójwartościowa zmienna oceny zmierzonej wartości zewnętrznej cechy wejściowej w_i ,

$z3_j$ – trójwartościowa zmienna oceny zmierzonej wartości cechy wyjściowej y_j .

Istotą trójwartościowej oceny za pomocą funkcji (11) i (12) jest przypisanie różnych wartości logicznych w przypadku przekroczenia górnej lub dolnej wartości granicznej cechy badanej, co jest zasadniczo różne od propozycji zawartej w [2], w której wartości ocen przyporządkowano następująco: „2” – dla nieznacznych zmian wartości cechy, „1” – dla znaczących zmian wartości cechy, a „0” – dla niedopuszczalnych zmian wartości cechy.

Podobnie jak przy binarnej ocenie, funkcje (9), (11) i (12) umożliwiają utworzenie trójwartościowej macierzy, stanowiącej model obiektu, a którą następnie można przekształcić w macierz testu zdatności i macierz testu lokalizującego.

Niezbędną postać funkcji oceny rozróżnialności par stanów zdatności i niezdatności, czyli par typu $\langle S_0, S_i \rangle$ można uzyskać modyfikując funkcję (4):

$$z3_j^{0,i} = \phi_2(S_0, S_i) = \forall(i, j \in [1, k]) : \begin{cases} 1, & \text{gdy } z3_j(S_0) = 1 \wedge z3_j(S_i) \neq 1 \\ 0, & \text{gdy } z3_j(S_0) = z3_j(S_i) \end{cases} \quad (13)$$

gdzie: $z3_j^{0,i}$ – trójwartościowa zmienna logiczna oceny rozróżnialności stanów zdatności i niezdatności,

$z3_j(S_0)$ – trójwartościowa zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie zdatności S_0 ,

$z3_j(S_i)$ – trójwartościowa zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie niezdatności S_i .

Funkcja ta przypisuje wartość logiczną 0 takiej sytuacji, gdy nie można rozróżnić stanów zdatności i niezdatności na podstawie oceny wartości cechy y_j oraz 1 w przeciwnym przypadku. Ponieważ zmienne $z3_j(S_0)$ i $z3_j(S_i)$ mogą przyjmować jedną z trzech wartości logicznych ze zbioru $\{0,1,2\}$, to rezultaty uzyskane przy użyciu funkcji (13) są niemożliwe do osiągnięcia za pomocą dwuargumentowej operacji suma modulo 2 działającej na wartościach tych zmiennych. Ponadto przy trójwartościowym modelu oceny cech obiektu negacja wartości zmiennych $z3_j$, czyli jednoargumentowa operacja $\overline{\overline{z3_j}}$ powinna być zdefiniowana następująco:

$$\overline{\overline{z3_j}} = \begin{cases} 0 \vee 2, & \text{gdy } z3_j = 1 \\ 1, & \text{gdy } z3_j = (0 \vee 2) \end{cases} \quad (14)$$

Jeśli dla uproszczenia zapisu przyjmiemy, że:

$$\begin{aligned} z3_j(S_0) &= a \\ z3_j(S_i) &= b \end{aligned} \quad (15)$$

to postać dwuargumentowej funkcji $\Omega(a, b)$ pozwalającej na otrzymanie wartości zgodnych z podawanymi przez funkcję (13) jest następująca:

$$z3_j^{0,i} = \Omega(a, b) = [\min(a, b) + a + b] \bmod 3 \quad (16)$$

Funkcja (16) może być wykorzystana również przy budowie trójwartościowej macierzy testu lokalizującego, ale wówczas oba jej argumenty odnoszą się do stanów niezdatności, czyli przyjmując że:

$$z3_j(S_i) = d \quad (17)$$

to
$$z3_j^{i,l} = \Omega(b, d) = [\min(b, d) + b + d] \bmod 3 \quad (18)$$

przy czym: $z3_j^{i,l}(S_l)$ – trójwartościowa zmienna logiczna oceny cechy y_j w stanie niezdatności S_l ,

$z3_j^{i,l}$ – zmienna logiczna oceny rozróżnialności pary stanów niezdatności $\langle S_i, S_l \rangle$.

Wartości uzyskiwane za pomocą funkcji (18) odpowiadają wartościom oceny rozróżnialności par stanów niezdatności $\langle S_i, S_l \rangle$, otrzymywanym za pomocą trójwartościowej funkcji

charakterystycznej, której postać, wykorzystując uproszczenia zapisu z wzorów (15) i (17), można zdefiniować w sposób następujący:

$$z3_j^{i,l} = \phi_3(S_i, S_l) = \forall (i, l, k \in [1, k] \wedge (i \neq l)) : \begin{cases} 0, \text{ gdy } b = d \\ 1, \text{ gdy } [b = 1 \wedge (d = (0 \vee 2))] \vee \\ \quad [d = 1 \wedge (b = (0 \vee 2))] \\ 2, \text{ gdy } (b = 0 \wedge d = 2) \vee \\ \quad (d = 0 \wedge b = 2) \end{cases} \quad (19)$$

Macierze uzyskane przy pomocy funkcji (13) lub (16) oraz (18) lub (19) stanowią podstawę do dalszych działań w celu wyodrębnienia zbiorów sprawdzeń testu zdatności i testu lokalizującego.

4. Przykład wykorzystania binarnego modelu ocen do generowania zbiorów sprawdzeń metodą macierzową

Proces wybierania cech do zbioru sprawdzeń zdatności obiektu metodą macierzową może być zrealizowany poprzez wskazanie określonych kolumn cech na podstawie pewnego kryterium i prowadzi do minimalizacji macierzy testu zdatności. Kryterium tym jest przede wszystkim unikalność cech obiektu w zakresie rozróżnialności par stanów technicznych. Wyraża się to przez występowanie jednej jedynek w wierszu tej macierzy. Kolumna, w której występuje ta wartość wskazuje cechę należącą do zbioru sprawdzeń testu zdatności, ponieważ tylko ona umożliwi rozróżnienie pary stanów zdatności i niezdatności przypisanych do tego wiersza. Użycie tego kryterium prowadzi do wyboru cech znajdujących się w kolumnach cech reprezentujących wyjścia zewnętrzne z danego obiektu. W dalszej kolejności kryteriami wyboru cech w skład testu zdatności mogą być takie czynniki jak: dostępność czy koszty pomiarów. Po wytypowaniu cech tworzących zbiór sprawdzeń testu zdatności trzeba skontrolować, czy jest to zbiór wystarczający do rozróżnienia wszystkich par stanów technicznych. Dokonuje się tego poprzez wykreślanie z macierzy testu zdatności kolumny wybranych cech oraz wszystkich rozróżnialnych wierszy. Wykreślenie wszystkich kolumn i wierszy pozwala na domknięcie zbioru sprawdzeń tego testu.

Metoda poszukiwania zbioru cech obiektu niezbędnych dla testu lokalizującego jest podobna, jak w przypadku testu zdatności. Polega ona na kolejnym wybieraniu w skład tego zbioru najpierw tych cech obiektu, które jako jedyne zapewniają rozróżnienie pewnych par stanów technicznych $\langle S_i, S_l \rangle$. Sprawdza się następnie możliwość rozróżnienia wszystkich pozostałych par stanów niezdatności i jeśli wynik takiego sprawdzenia jest pozytywny, to zbiór cech można domknąć. W przeciwnym wypadku należy kontynuować typowanie cech w zminimalizowanej macierzy testu lokalizującego, powstającej po wykreśleniu z niej kolumn cech wybranych oraz wierszy z parami stanów technicznych rozróżnialnymi na podstawie tych cech. Proces wyboru kończy pozytywny wynik sprawdzenia możliwości rozróżnienia wszystkich par stanów niezdatności. Jeśli pomimo wykorzystania cech należących do zbioru sprawdzeń testu lokalizującego w dalszym ciągu pozostają nierozróżnialne pary stanów niezdatności wówczas może to oznaczać błędy w zbudowanym modelu obiektu albo konieczność zastosowania wielowartościowej oceny cech wejściowych i wyjściowych.

Przykładową postać tabeli prawdy, utworzoną dla przekładni hamulcowej wagonu, przedstawia tabela 1 [14]. Tabela 1 została sporządzona dla przypadku, w którym założono możliwość wystąpienia co najwyżej jednego niezdatnego elementu przekładni hamulcowej. Zawiera wartości ocen cech $y_1 \div y_{21}$, czyli sił występujących w przykładni, w poszczególnych,

możliwych stanach technicznych tego układu. Zbiór tych stanów technicznych zawiera stan zdatności przekładni S_0 oraz stany niezdatności $S_1 \div S_{21}$ wynikających z niezdatności – odpowiednio - elementów $e_1 \div e_{21}$.

Tabela 1

Tabela prawdy dla przekładni hamulcowej wagonu [14]

SU _k	Z _i																				
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅	Y ₁₆	Y ₁₇	Y ₁₈	Y ₁₉	Y ₂₀	Y ₂₁
S ₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₂	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₃	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₄	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₅	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₆	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₇	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₈	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₉	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₁₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₁₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S ₁₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₁₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₁₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
S ₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
S ₁₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
S ₁₇	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
S ₁₈	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
S ₁₉	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
S ₂₀	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
S ₂₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Przedstawione modele binarnych ocen oraz opisana metodyka wybierania zbiorów sprawdzeń testów zdatności i lokalizującego umożliwiają programowe ich tworzenie. Tego rodzaju program generujący zbiory sprawdzeń dla oceny stanu technicznego obiektu, napisany przy użyciu pakietu Mathematica zawarto w [14]. Stosując ten program dla modelu macierzowego jak w tabeli 1 należy użyć następującego polecenia wejściowego:

```

Tp={ {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0},
      {1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0},
      {1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0},
      {1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0},
      {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0}
    }

```


Uzyskany skutek działania programu zbiór sprawdzeń testu zdatności jest następujący:

Td1 // zapytanie o zbiór sprawdzeń testu zdatności
 $\{y_5, y_7, y_9, y_{11}, y_{15}, y_{17}, y_{19}, y_{21}\}$ // odpowiedź

a zbiór sprawdzeń testu lokalizującego ma postać:

Td1 // zapytanie o zbiór sprawdzeń testu lokalizującego
 $\{y_1, y_2, y_6, y_{10}, y_{12}, y_{16}, y_{20}, y_5, y_7, y_9, y_{11}, y_{15}, y_{17}, y_{19}\}$ // odpowiedź

Otrzymane w efekcie rozwiązanie pozwala na zlokalizowanie dowolnego niezdatnego elementu badanej przekładni hamulcowej wagonu.

5. Zastosowanie metody skreśleń do generowania zbiorów cech dla oceny stanu technicznego obiektu złożonego

Przedstawiony w pkt. 3 niniejszej pracy trójwartościowy model ocen można wykorzystać np. dla rozróżnienia przerwy w obwodzie elektromagnetycznego hamulca szynowego od przebicia izolacji jego uzwojeń [11], czyli rozróżnienia trzech klas stanu technicznego wyszczególnionych formułą (4). Innym przykładem użycia trójwartościowego modelu ocen przy użyciu funkcji (9), (11) i (12) jest model macierzowy (tabela 2), który może być sporządzony dla części układu pneumatycznego hamulca wagonu, w oparciu o model obliczeniowy zawarty w [4] i dotyczący fazy napełniania układu.

Tabela 2

Model macierzowy części układu pneumatycznego hamulca wagonu

Lp.	Stan techniczny	Oceny cech obiektu - $z3_j$											
		y_0	y'_0	y_1	y'_1	y_2	y'_2	y_3	y'_3	y_4	y'_4	y_5	y'_5
1.	S_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.	S_1^n	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.	S_1^d	1	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
4.	S_2^n	1	0	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
5.	S_2^d	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
6.	S_3^n	1	0	1	1	1	1	2	0	2	0	2	0
7.	S_3^d	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
8.	S_4^n	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	1	1
9.	S_4^d	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1
10.	S_5^n	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	2	0
11.	S_5^d	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2

Macierz przedstawiona w tabeli 2 zawiera wartości ocen takich cech, jak: $y_0 \div y_4$ – czyli ciśnień w układzie oraz $y'_0 \div y'_4$ – masowych natężeń przepływu powietrza w części układu pneumatycznego wagonu, w stanach technicznych należących do zbioru:

$$SU_r = \{S_0, S_1^n, S_1^d, S_2^n, S_2^d, S_3^n, S_3^d, S_4^n, S_4^d, S_5^n, S_5^d\} \quad (20)$$

w którym: S_0 – stan zdatności obiektu,

$S_1^n \div S_5^n$ – stany techniczne charakterystyczne dla nieszczelności elementów obiektu,

$S_1^n \div S_5^n$ – stany techniczne charakterystyczne dla dławienia przepływu powietrza w elementach obiektu.

Przekształcenie macierzy stanowiącej trójwartościowy model przykładowego obiektu (tabela 2) w macierz testu zdatności, za pomocą funkcji (13) lub (16), pozwala na wyznaczenie zbioru sprawdzeń tego testu w ten sam sposób jak przy binarnym modelu ocen. Możliwe jest więc jego algorytmiczne generowanie. W przypadku macierzy testu lokalizującego uzyskanej przy użyciu funkcji (18) lub (19), poprzednio zastosowana metodyka minimalizacji zbioru sprawdzeń jest nieskuteczna. Wyboru minimalnego zbioru sprawdzeń testu lokalizującego łatwiej jest dokonać metodą skreśleń.

Analizując postać modelu macierzowego obiektu zauważyć można, że każdy wiersz tej macierzy tworzy ciąg wartości ocen, który może być interpretowany jako liczba charakterystyczna zapisana w kodzie dwójkowym, trójkowym, czy czwórkowym, zależnie od ilości wartości wykorzystywanych przy ocenie cech tego obiektu. Jeśli dokonamy konwersji tej liczby na liczbę dziesiętną, to wtedy może ona posłużyć do oceny niepowtarzalności poszczególnych wierszy tej macierzy. Taką dziesiętną liczbę d_r można określić ze wzoru [13]:

$$d_r = \sum_{j=1}^{j_{\max}} z_j^r \cdot p^{j-1} \quad (21)$$

w którym: z_j^r – wartość oceny cechy y_j w wierszu r macierzowego modelu obiektu,

j – numer kolumny cechy obiektu licząc od prawej strony tej macierzy.

p – liczba wartości ocen, które mogą być przypisane poszczególnym cechom.

Warunkiem rozróżnialności każdej pary stanów technicznych $\langle S_r, S_s \rangle$ na podstawie oceny wszystkich cech obiektu (lub tylko ich pewnego podzbioru) jest to, aby odpowiadające im liczby charakterystyczne w poszczególnych wierszach macierzy stanowiącej model obiektu były różne, czyli [13]:

$$\bigwedge_{r \neq s} S_r \neq S_s \Leftrightarrow d_r \neq d_s \quad (22)$$

przy czym: s – indeks wiersza macierzy różny od r .

Przy dużej ilości elementów obiektu i cech ocenianych konwersja wiersza modelu macierzowego jest kłopotliwa, bez komputerowego wspomaganie obliczeń. Ponadto liczby uzyskane ze wzoru (21) są na tyle duże, iż tylko w niewielkim stopniu ułatwiają ocenę ich unikalności, a w konsekwencji ocenę rozróżnialności poszczególnych stanów obiektu analizowanego. W takiej sytuacji, decydując się na wykorzystanie specjalistycznego programu komputerowego, wygodnie jest potraktować każdy wiersz tej macierzy jako umowną liczbę charakterystyczną reprezentowaną przez ciąg znakowy c_r uzyskany następująco [13]:

$$c_r = \sum_{j=J_{\max}}^1 Str(z_j^r) \quad (23)$$

gdzie: \sum – operator łączenia znaków,

$Str()$ – funkcja przekształcająca wartość numeryczną oceny cechy na znak.

Posługując się takimi ciągami, warunek rozróżnialności wierszy tej macierzy można sformułować analogicznie do wzoru (22), tzn. [13]:

$$\bigwedge_{r \neq s} S_r \neq S_s \Leftrightarrow c_r \neq c_s \quad (24)$$

Istotną korzyścią posługiwania się ciągami znakowymi jest możliwość wykorzystania bardzo dużej liczby cech obiektu, co wynika z dopuszczalnej długości zmiennych typu ciągów znakowych.

Sposób poszukiwania wynikowego zbioru sprawdzeń testu lokalizującego polega na usuwaniu poszczególnych kolumn macierzy danego obiektu, począwszy od lewej lub prawej strony, i sprawdzaniu warunku rozróżnialności stanów technicznych zawartego w formule (22) lub (24). W przypadku spełnienia tego warunku trzeba przejść do kolejnej kolumny i ją usunąć, natomiast jeśli sprawdzenie zakończy się niepowodzeniem kolumnę uprzednio usuniętą należy przywrócić i cechę z tej przywracanej kolumny wpisać do zbioru cech testu lokalizującego. Postępowanie takie trzeba kontynuować aż do wyczerpania listy cech z kolumn tej macierzy. Wartości z kolumn pozostawionych tworzą minimalną sygnaturę każdego stanu technicznego przypisanego do każdego z wierszy macierzy.

Aby sprawdzić możliwość generowania, metodą skreśleń, zbiorów cech dla oceny zdatności obiektu i lokalizacji niezdatności jego elementów opracowano program komputerowy realizujący zadania tworzenia takich zbiorów. Aplikacja ta posiada formularz z oknem przeznaczonym na edycję binarnej lub wielowartościowej macierzy danego obiektu oraz przyciski uruchamiające generowanie zbiorów sprawdzeń testu zdatności i testu lokalizującego. Widok tego formularza dla obiektu, którego trójwartościową macierz przedstawia tabela 2, zawiera rys. 3.

Rys. 3. Widok formularza generatora testów zdatności i lokalizującego z danymi jak w tabeli 2

Przed rozpoczęciem wprowadzania danych wejściowych należy ustawić rozmiar macierzy i określić ilość wartości logicznych użytych do oceny cech obiektu. Przy ocenach jak w tabeli 2 aplikacja umożliwia wygenerowanie zbiorów sprawdzeń testu zdatności i testu lokalizującego oraz uzyskanie następującego raportu:

Zbiór sprawdzeń testu zdatności
 $Tds = \{ y2 \}$

Zbiór sprawdzeń testu lokalizującego
 $Tdl = \{ y5, y6, y10, y12 \}$

Suma zbiorów sprawdzeń
 $Tdc = \{ y2, y5, y6, y10, y12 \}$

Raport ten stanowi potwierdzenie skuteczności tej metody tworzenia zbiorów cech umożliwiających identyfikację stanu technicznego obiektu złożonego.

6. Podsumowanie

Przedstawione w pracy binarne i trójwartościowe modele ocen mogą być użyte do budowy systemów wspomaganego komputerowo generowania zbiorów cech, których zbadanie pozwala na sprawdzenie zdatności obiektu złożonego i lokalizację niezdatności jego elementów składowych. Systemy takie powinny wybierać spośród ogółu cech obiektu tylko cechy niezbędne, co może być zrealizowane przy użyciu metody macierzowej lub metody skreśleń.

Jak wykazano w niniejszej pracy, przy binarnej ocenie zadanie wyboru cech można stosunkowo łatwo zrealizować przy wykorzystaniu macierzowej metody tworzenia zbiorów sprawdzeń cech obiektu. W tym celu sformułowano funkcje oceny rozróżnialności stanów zdatności i niezdatności, a także podano przykładowy wynik ich zastosowania w programie napisanym przy pomocy pakietu Mathematica. Metoda macierzowa może być także wykorzystana do wyznaczenia odpowiednich zbiorów sprawdzeń dla przypadku, gdy cechy obiektu poddaje się trójwartościowej ocenie. Niezbędne jest jednak wtedy przyjęcie także innych, trójwartościowych funkcji oceny rozróżnialności stanów technicznych obiektu złożonego. Wskazano przy tym, że nie można w takim przypadku jednoznacznie wyodrębnić kryteriów dla wspomaganego komputerowo wyboru cech w skład zbiorów sprawdzeń tak, jak to jest w przypadku binarnej oceny cech obiektu.

To ostatnie było impulsem do opracowania innej metody wyznaczania zbiorów sprawdzeń, tj. metody skreśleń. Metoda ta może być zastosowana zarówno przy binarnej jak i wielowartościowej ocenie cech badanych. Polega na kolejnych próbach eliminowania poszczególnych cech i sprawdzaniu prawdziwości warunku rozróżnialności stanów technicznych analizowanego obiektu. Skuteczność tej metody zweryfikowano na przykładzie odnoszącym się do części układu pneumatycznego hamulca wagonu.

Metoda skreśleń może być wykorzystana zarówno przy pełnej jak i ograniczonej dostępności pomiarowej cech danego obiektu. Godząc się z niemożnością sprawdzenia pewnych cech uzyskuje się tym samym informacje o ewentualnej nierozróżnialności stanów technicznych tego obiektu spowodowanych wystąpieniem określonych niezdatności jego elementów składowych.

Literatura

1. Chalecki D. Algorytm minimalizacji sygnatur uszkodzeń. *Diagnostyka* 2006; 3(39): 297-300.
2. Duer S. Creation of the servicing information to support the maintenance of a technical object with the use of three-value logic diagnostic information. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2009; 3(159): 35-48.
3. Hebda M. i inni. *Eksploatacja samochodów*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2005.

4. Jeleśniański Z, Sowa A, Walczak S. Model analityczny pneumatycznego układu hamulca pojazdu szynowego. *Pojazdy Szynowe* 2004; 2: 23-27.
5. Kapur K. C. Multi-state reliability: models and applications. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2006; 2: 8-10.
6. Kościelny J. M, Dziembowski B. Rozróżnialność uszkodzeń w układach liniowych. *Diagnostyka* 2006; 2(38): 93-100.
7. Liu Y, Huang H-Z. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability* 2010; 59.2: 356-367.
8. Liu Y, Huang H-Z. Optimal replacement policy for multi-state system under imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability* 2010; 59.3: 483-495.
9. Niziński S, Liger K. Diagnostyka techniczna w systemach działania. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001; 3(127): 171-189.
10. Nourelfath M, Fitouhi M, Machani M. An integrated model for production and preventive maintenance planning in multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability* 2010; 59.3: 496-506.
11. Skowron J, Sowa A. System oceny cech diagnostycznych układu zasilania elektromagnetycznego hamulca szynowego. *Czasopismo Techniczne* 2012; 7-M: 251-260.
12. Soro I. W, Nourelfath M, Ait-Kadi D. Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 2010, 95.2: 65-69.
13. Sowa A. Distinguishing factor of the technical conditions of a compound object. *Monographs of the Maintenance System Unit, Polish Academy of Sciences Committee on Machine Building, Maintenance Fundamentals Section, „Problems of maintenance of sustainable technological systems”*. Kielce University of Technology, Kielce 2012; V: 154-171.
14. Sowa A. Macierzowa metoda generowania testów diagnostycznych przy użyciu pakietu Mathematica. *XIX Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe”, Targanice k. Andrychowa* 2010; t. II: 211-221.
15. Tylicki H. Metodyka wyznaczania procedury diagnozowania stanu maszyn. *Diagnostyka* 2004; 33: 179-185.
16. Zaitseva E, Levashenko V, Matiaško K. Failure analysis of series and parallel multi-state system. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2006; 2: 29-32.
17. Zio E, Podofillini L. The use of importance measures for the optimization of multi-state systems. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2006; 2: 33-36.