

O FUNKCJONALNEJ STRUKTURZE NIEZAWODNOŚCIOWEJ OBIEKTU NA PRZYKŁADZIE DIAGNOZOWANIA SZEREGOWO POŁĄCZONYCH ELEMENTÓW

Paweł SZCZEPAŃSKI
Instytut Systemów Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, e-mail: paszczep@bomi.waw.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono pełne programy diagnozowania obiektu technicznego z pominięciem jego szeregowej, na rzecz – funkcjonalnej struktury niezawodnościowej. Zaprezentowano określanie bezwarunkowych wartości prawdopodobieństw występowania rozróżnialnych stanów niezawodnościowych obiektu oraz - na ich podstawie – sposób wyznaczania wartości oczekiwanego kosztu dowolnego badania diagnostycznego. Poniechano przyjęcia założenia o możliwości występowania w obiekcie co najwyżej jednego niezdatnego elementu.

Słowa kluczowe: niezawodność, diagnostyka techniczna, probabilistyka, program badań

FUNCTIONAL OBJECT INFALLIBILITY STRUCTURE ON THE EXAMPLE OF DIAGNOSTICS MADE FOR ELEMENTS CONNECTED IN SERIES

Summary

The article presents full programmes of technical object diagnostics disregarding its series wound infallibility structure in order to consider its functional infallibility structure. The unconditional probabilities defining of object infallibility states which are possible to differentiate has been presented, as well as -on the base of these states -the expected values costs defining method for any diagnostically study. The assumption of possibility of existence in the object at the outmost one unusable element has been disregarded.

Keywords: infallibility, technical diagnostics, probabilistic, research programme

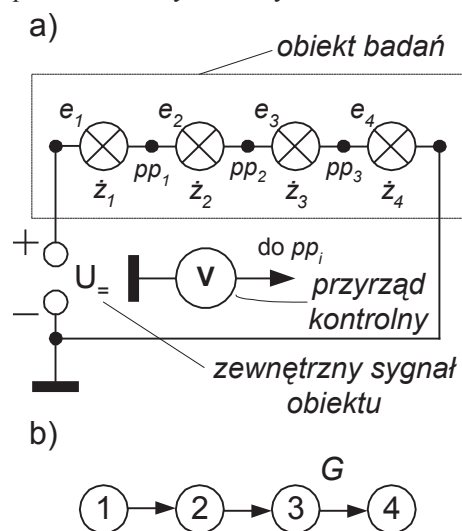
1. WPROWADZENIE

Podstawą opracowania racjonalnego programu diagnozowania obiektu technicznego jest przede wszystkim dobra znajomość jego budowy i zasady pracy. W oparciu o tę znajomość funkcjonują wszelkie zakłady naprawcze, stacje obsługi samochodów czy też punkty serwisowe sprzętu AGD. Powszechnie nieodzowna jest ona w wojsku – na polu walki - gdzie czas usunięcia niezdatności może decydować o zwycięstwie lub porażce. Wychodząc naprzeciw usprawnieniu pracy obsług zaproponowano wsparcie lokalizacji niezdatności poprzez uwzględnienie w niej wartości prawdopodobieństw niezdatności poszczególnych elementów oraz kosztów sprawdzeń [2,5,10].

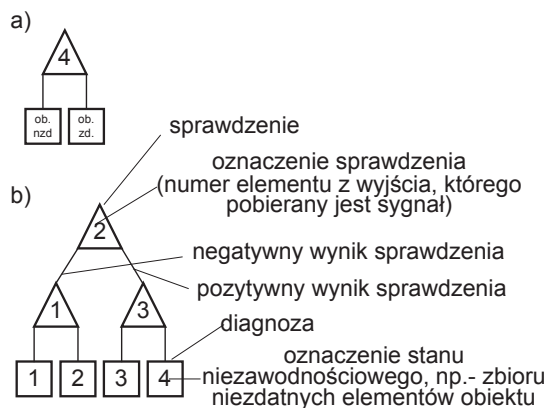
Składane propozycje zostały podporządkowane szeregowej strukturze niezawodnościowej obiektu, implikacją, której stał się przede wszystkim podział badań diagnostycznych na rozpoznanie i lokalizowanie niezdatności

Klasycznym przykładem zastosowania szeregowej struktury niezawodnościowej stały się obiekty, które podobnie jak ona stanowiły łańcuch szeregowo połączonych elementów. Najczęściej, łańcuchem tym było szeregowe połączenie czterech żarówek, których schemat ideowy, model i program

badania diagnostycznych przedstawiono odpowiednio na rys. 1.1 i rys. 1.2.



Rys. 1.1. Szeregowe połączenie czterech żarówek; a) zasadnicze określenia i oznaczenia elementów badań, sprawdzeń i zasilania, b) model – digraf G



Rys. 1.2. Dwuetapowy proces diagnozowania czterech szeregowo połączonych żarówek wraz z oznaczeniami użytej symboliki; a) program rozpoznania niezdatności, b) program lokalizowania niezdatności.

Wybór sprawdzenia s_4 w rozpoznaniu niezdatności obiektu nie powinien budzić istotnych wątpliwości – brak czy też obecność światła żarówki z_4 wyraźnie świadczy odpowiednio o jego niezdatności lub zdatności. Wątpliwości nie mogą wystąpić także podczas lokalizowania niezdatności (rys. 1.2b). Przy jednakowych wartościach prawdopodobieństw niezdatności (albo zdatności) każdej z żarówek, wynoszących odpowiednio: q i p ; $q + p = 1$, sprawdzenie s_2 , „dzieląc” obiekt na dwie równe części, przynosi o nim najwięcej informacji. Kolejne sprawdzenia: s_1 i s_3 , dokonując następnych równych podziałów, prowadzą ostatecznie do wskazania niezdatnej żarówki. Przedstawiony algorytm znany jest pod nazwą metody podziału połówkowego. Możliwości podziału (bez względu na zastosowaną metodę) najczęściej określane są przy udziale tablicy diagnostycznej, która dla czterech szeregowo połączonych żarówek (rys. 1.1) ma postać:

		sprawdzenia			
		s_1	s_2	s_3	s_4
$M^1(G) =$	m_1	1	1	1	1
	m_2	0	1	1	1
	m_3	0	0	1	1
	m_4	0	0	0	1

Zera (0) i jedynki (1 i 1) $M^1(G)$ oznaczają odpowiednio pozytywne i negatywne wyniki sprawdzeń s_j , przy czym jedynki (1) - dodatkowo – elementy diagonalnej. Wzorce sygnałów w pp_i wraz ze sposobem wykonania sprawdzeń s_j ; $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ zamieszczono w tabeli 1.1.

Dla potrzeb badań przyjęto zasadę bezinwazyjności sprawdzeń. W myśl tej zasady każde rozłączenie połączeń elementów uważane jest za jej naruszenie. Odstępstwem od zasady może być odnowa obiektu lub lokalizowanie niezdatności w obwodach sprzężeń zwrotnych.

Tabela 1.1.

Wzorce sygnałów w pp_i układu przedstawionego na rys. 1.1a., gdzie: * - obecność światła

Numer sprawdzenia s_i	1	2	3	4
Wzorzec sygnału	+U ₌	+U ₌	+U ₌	*
Sposób sprawdzenia sygnału	pomiar napięcia względem ujemnego bieguna źródła zasilania			obserwacja wzrokowa
Koszt sprawdzenia $c_i [s]$	1000	1000	1000	1000 lub 0,1

Dla potrzeb badań przyjęto zasadę bezinwazyjności sprawdzeń. W myśl tej zasady każde rozłączenie połączeń elementów uważane jest za jej naruszenie. Odstępstwem od zasady może być odnowa obiektu lub lokalizowanie niezdatności w obwodach sprzężeń zwrotnych.

Choć przedstawiony sposób opracowania diagnostycznego przynosi oczekiwane rezultaty to można się w nim jednak doszukać pewnej rozrzutności, związanej zwłaszcza ze sposobem wykorzystania charakterystyk probabilistycznych elementów. Ponadto, z praktycznego punktu widzenia - nawet przy wykorzystaniu tego samego przyrządu kontrolnego - można przecież wykonać inne, dodatkowe sprawdzenia i z wielokrotnie liczebność zbioru diagnoz (rozdzielnych stanów niezawodnościowych obiektu). Na uwagę zasługuje także fakt, że w wielu teoretycznych rozważaniach nie zauważa się możliwości pomiaru napięć względem drugiego z biegunów źródła zasilania i tym samym – możliwości wskazania więcej niż jednego niezdatnego elementu.

W niniejszej pracy wskazane zostaną jeszcze dwa sposoby diagnozowania szeregowego połączenia czterech żarówek tym razem ściślej niż poprzednio związane z ich strukturą funkcjonalną, na którą nałożona zostanie ich funkcjonalna struktura niezawodnościowa. Sposób „wkomponowania” w strukturę obiektu wartości prawdopodobieństw niezdatności poszczególnych żarówek jest ściśle podporządkowany - opisanym w następnych punktach niniejszej pracy – pełnym programom diagnostycznym.

Mniema się, że przedstawione metody diagnozowania mogą znaleźć zastosowanie także dla innych obiektów, o znacznie rozszerzonej liczebności elementów przy znacznym zróżnicowaniu ich asortymentu i struktury połączeń.

Liczba i struktura połączeń diagnozowanych żarówek została dobrana z uwagi na możliwości edycyjne „Diagnostyki” – z jednej, i stopień wyczerpania istoty problemu - z drugiej strony.

W pracy zakłada się pełną wiarygodność sprawdzeń i obecność napięcia zasilania (dopuszczalność sygnału zewnętrznego doprowadzanego do obiektu). Ponadto przyjęto, że:

- element obiektu uważany jest za niezdatny, jeżeli wszystkie jego sygnały wejściowe są dopuszczalne, natomiast sygnał wyjściowy – niedopuszczalny;
- chociażby jeden niedopuszczalny sygnał wejściowy elementu prowadzi do powstania jego niedopuszczalnego sygnału wyjściowego.

2. PEŁNY PROGRAM DIAGNOZOWANIA

W diagnozowaniu według tego programu nie proponuje się podziału na etapy, gdyż uważa się, że powinny one stanowić integralną całość – swego rodzaju pełnię. Stan zdatności obiektu jest traktowany w tym programie na równi z pozostałymi stanami, tak więc stan ten niekoniecznie jest identyfikowany jako pierwszy, a sprawdzenia wykonywane dla potrzeb jego stwierdzenia służą także ewentualnej potrzebie lokalizacji niezdatności. W porównaniu z tradycyjnymi metodami rozważa się tu możliwość rozszerzenia „repertuaru” określeń o stany wynikające z niezdatności dwóch lub też większej liczby elementów. Tę możliwość zauważa się w odniesieniu do elementów obiektu funkcjonujących niezależnie jeden od drugiego. W odróżnieniu od poprzednio opisanego programu dwuetapowego, wartości prawdopodobieństw wystąpienia rozróżnialnych stanów obiektu nie określa się drogą wyznaczenia ich wielkości względnych lecz poprzez zastosowanie tzw. pełnej tablicy diagnostycznej M .

Zasadniczą częścią tablicy diagnostycznej M jest znana z teorii grafów macierz osiągalności D [3], której jedynek i -tej kolumny i i -tego wiersza oznaczają poprzedniki i następniki i -tego wierzchołka (elementu obiektu). W tablicy diagnostycznej M numeracja kolumn i wierszy tejże macierzy oznacza odpowiednio numerację sprawdzeń dostępnych i numerację stanów m_i , wynikających z niezdatności pojedynczych elementów e_i . W kontekście niniejszego można zapisać, że:

$$D = M^1. \quad (2.1)$$

Najpraktyczniejszą formą wykorzystania macierzy D jest użycie jej górnotrójkątnej postaci D^V . Przypadek sprawił, że dla połączenia żarówek i ich modelu (rys. 1.1.b)

$$D^V(G) = M^1(G) = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} \mathbf{x} & 1 & 1 & 1 \\ 0 & \mathbf{x} & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \mathbf{x} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{x} \end{vmatrix} \end{matrix}. \quad (2.2)$$

Ponieważ elementy diagonalnej zawsze są jedynekami, można miejsca ich występowania potraktować jako szczególny rodzaj „marginesu”. Tu, adekwatnie do potrzeb, diagonalną wypełniono znakami „ \mathbf{x} ”, identyfikującymi swoimi pozycjami (współrzędnymi pionowymi) numery niezdatnych elementów (stanów wadliwego funkcjonowania wynikających z ich niezdatności).

Kolejne części tablicy M – tablice $M^{(i)}$; $i > 1$ – są (krótko mówiąc) wynikiem sumowań wierszy, których numerację określają współrzędne zer znajdujących się na prawo od znaków „ \mathbf{x} ” tablic M^{i-1} . To może oznaczać, że w przypadku tablicy M :

- liczba wierszy reprezentujących stany m_{ij} wynikające z niezdatności elementów e_i i e_j , jest równa liczbie zer znajdujących powyżej diagonalnej macierzy D^V , i
- śladem zsumowania jest pozostawienie w sumie wierszy znaku „ \mathbf{x} ” w miejscu określonym współrzędną pionową zera - „ j ”.

Zgodnie z powyższym, zbiór stanów m_{ij} szeregowego połączenia żarówek zamodelowanego digrafem G (rys. 1.1.b) jest zbiorem pustym.

Algorytm wyznaczania rozróżnialnych stanów wadliwego funkcjonowania obiektu kończy się z chwilą, gdy na prawo od znaków „ \mathbf{x} ” nie wystąpi ani jedno zero.

Przedstawienie pełnej tablicy diagnostycznej M wymaga połączenia wyznaczonych części, przy czym pierwszy jej wiersz (zawierający same zera) powinien być zarezerwowany dla reprezentacji stanu zdatności m_0 . Po tym połączeniu szacowanie wartości prawdopodobieństw wystąpienia stanów wadliwego funkcjonowania obiektu przebiega niejako „automatycznie”. Zerom „0” i iksom „ \mathbf{x} ” zgodnie z ich pozycjami nadaje się odpowiednio wartości prawdopodobieństw: p_i i q_i , natomiast jedynek „1” pozostawia się ich własne wartości. Jedynek te wskazują elementy, których stany niezawodnościowe są przesłonięte niezdatnością któregoś ze swoich poprzedników. Można je zatem traktować jako sumę wartości prawdopodobieństw dwóch przeciwstawnych sobie zdarzeń. Kolejnym krokiem algorytmu jest przemnożenie przez siebie w poszczególnych wierszach podstawionych wielkości. Przypisanie symbolom 0 i \mathbf{x} wartości prawdopodobieństw p_i i q_i zilustrowano na rys. 2.1.

		sprawdzenia				jeśli:
		s_1	s_2	s_3	s_4	$p_1=1-q$
$M =$	m_0	0	0	0	0	$r_0 = p_1 p_2 p_3 p_4 = (1-q)^4$
	m_1	\mathbf{x}	1	1	1	$r_1 = q_1 1 1 1 = q$
	m_2	0	\mathbf{x}	1	1	$r_2 = p_1 q_2 1 1 = (1-q)q$
	m_3	0	0	\mathbf{x}	1	$r_3 = p_1 p_2 q_3 1 = (1-q)^2 q$
	m_4	0	0	0	\mathbf{x}	$r_4 = p_1 p_2 p_3 q_4 = (1-q)^3 q$

Rys. 2.1. Ilustracja wyznaczenia wartości prawdopodobieństw wystąpienia rozróżnialnych stanów szeregowego połączenia czterech żarówek zamodelowanych digrafem G (rys. 1.1.b), w sytuacji zróżnicowanych i jednakowych wartości prawdopodobieństw ich zdatności i niezdatności

Każdorazowym sprawdzianem poprawności tak określonych wartości prawdopodobieństw r (przed wykonaniem pierwszego sprawdzenia s) może być wynik ich zsumowania – różny od jedności świadczy o popełnionej pomyłce. Sumy wartości

prawdopodobieństw r szeregowego połączenia czterech żarówek, w sytuacji zróżnicowanych i jednakowych wartości prawdopodobieństw ich zdatności, przedstawiają odpowiednio zależności 2.3 i 2.4.

Przedstawione na rysunku 2.2 pełne programy diagnozowania czterech szeregowo połączonych żarówek przeprowadzono według algorytmu 2.1. Do obliczeń przyjęto wyszczególnione w tabeli 1.1 szacunkowe czasy sprawdzeń sygnałów wzorcowych. Na szczególną uwagę zasługuje „elastyczność” przebiegu sprawdzeń, zależna od wartości prawdopodobieństwa niezdatności q , jednakowej dla każdej z żarówek z_i . (wykr. 2.1.)

$$\begin{aligned} & p_1 p_2 p_3 p_4 + q_1 + p_1 q_2 + p_1 p_2 q_3 + p_1 p_2 p_3 q_4 = \\ & = p_1 (p_2 p_3 p_4 + q_2 + p_2 q_3 + p_2 p_3 q_4) + q_1 = \\ & = p_1 (p_2 (p_3 p_4 + q_3 + p_3 q_4) + q_2) + q_1 = \\ & = p_1 (p_2 (p_3 (p_4 + q_4) + q_3) + q_2) + q_1 = \\ & = p_1 (p_2 (p_3 \cdot 1 + q_3) + q_2) + q_1 = \\ & = p_1 (p_2 \cdot 1 + q_2) + q_1 = p_1 \cdot 1 + q_1 = 1 \cdot 1 + 1 = 1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} & (1-q)^4 + q + (1-q)q + (1-q)^2 q + (1-q)^3 q = \\ & = q^4 - 4q^3 + 6q^2 - 4q + 1 + q + q - q^2 + q^3 - 2q^2 + q - q^4 + \\ & + 3q^3 - 3q^2 + q = (q^4 - q^4) + (-4q^3 + q^3 + 3q^3) + \\ & + (6q^2 - q^2 - 2q^2 - 3q^2) + (-4q + q + q + q) + 1 = \\ & = 0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

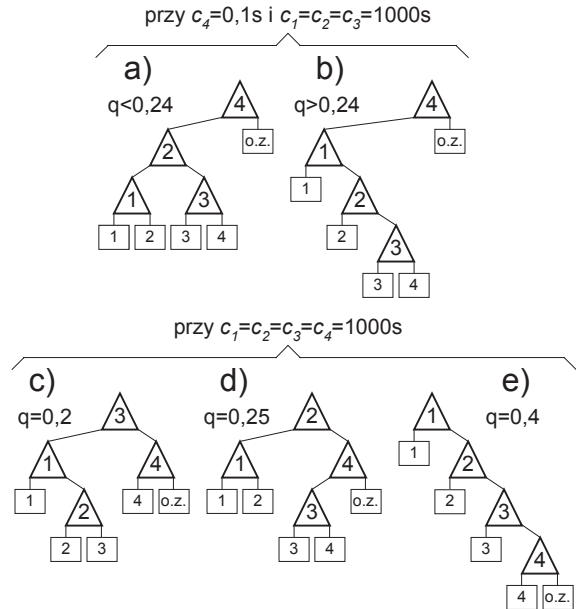
Algorytm diagnozowania obiektu według maksimum skuteczności informacyjnej z wykorzystaniem pełnej tablicy diagnostycznej $M(G)$:

1. Przyporządkować wynikom sprawdzeń $S_j(m_i) = 0$ (zamieszczonym w pełnej tablicy diagnostycznej $M(G)$) wyniki sprawdzeń $S_j(m_i) = -1$. (Zamienić wszystkie zera „0” pełnej tablicy diagnostycznej wartościami: „-1”)
2. Obliczyć skuteczności informacyjne sprawdzeń

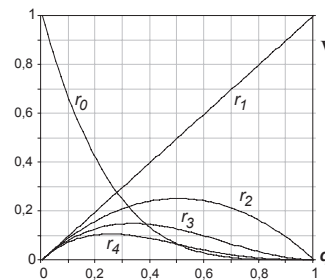
$$\eta_j = \frac{W_{pp}}{c_j} = \frac{1 - Abs \left(\frac{\sum_{i:r_i > 0} r_i S_j(m_i)}{\sum_{i:r_i > 0} r_i} \right)}{c_j} \quad (2.5)$$

3. Wykonać sprawdzenie s_j , dla którego $\eta_j = \eta_{jmax}$
4. a) Jeżeli wynik $S_j = -1$ (będzie pozytywny) - usunąć z tablicy diagnostycznej $M(G)$: wiersze, w których $S_j = +1$ i kolumnę o numerze j .
b) Jeżeli wynik $S_j = +1$ (będzie negatywny) - usunąć z tablicy diagnostycznej $M(G)$: wiersze, w których $S_j = -1$ i kolumnę o numerze j .
5. Określić liczbę wierszy tablicy diagnostycznej $M(G)$.

6. a) Jeżeli liczba wierszy tablicy diagnostycznej $M(G)$ będzie większa od jedności - przejść do wykonania punktu 2.
b) Jeżeli tablica diagnostyczna $M(G)$ zawierać będzie tylko jeden wiersz - ogłosić stan niezawodnościowy adekwatny oznaczeniu tego wiersza
7. Zakończyć badanie diagnostyczne obiektu.



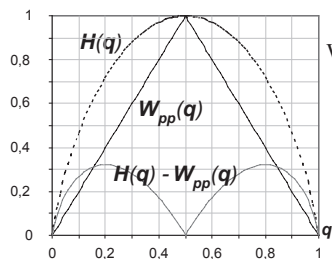
Rys. 2.2. Pełne programy diagnozowania czterech szeregowo połączonych żarówek zamodelowanych digrafem G (rys. 1.1.b)



Wykr. 2.1. Wartości prawdopodobieństw rozróżnialnych stanów czterech szeregowo połączonych żarówek zamodelowanych digrafem G (rys. 1.1.b)

W_{pp} – wskaźnik podziału połówkowego (2.5) - łączy jednoznaczny związek z miarą nieokreśloności jaką jest entropia wyniku sprawdzenia H [4,5]. Z wykresu 2.2 wynika, że obie miary dla tych samych wartości prawdopodobieństwa q swoje ekstrema. Ponadto charakteryzują się one stosunkowo niewielką różnicą: $H - W_{pp}$.

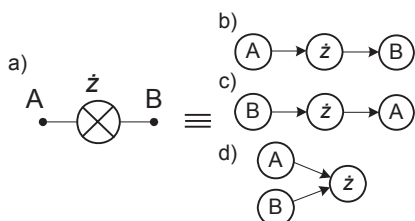
Wybór W_{pp} zamiast H może mieć istotne znaczenie zwłaszcza tam, gdzie badania diagnostyczne mają być przeprowadzane w systemie dozoru obiektu technicznego. Związany z tym wskaźnikiem krótki czas obliczeń sprawia, że czas podejmowania decyzji jest także krótki i badanie zbliżone jest do badania w czasie rzeczywistym.



Wykr. 2.2. Wykresy entropii wyniku sprawdzenia - $H(q)$, wskaźnika podziału półkowego - $W_{pp}(q)$ i ich różnicy - $H(q)-W_{pp}(q)$

3. ROZSZERZONY PEŁNY PROGRAM DIAGNOZOWANIA

O ile podstawą rozważań dwóch poprzednich metod był digraf G , przedstawiony na rys. 1.1.b., o tyle już w obecnych okazuje się on tylko ich niewielką podporą. Model czterech szeregowo połączonych żarówek można bowiem przedstawić także na sześć innych sposobów (tab. 3.1) – z wykorzystaniem sześciu innych, zróżnicowanych strukturalnie digrafów. Możliwość zróżnicowania digrafów tkwi przede wszystkim w konstrukcji i przeznaczeniu samej żarówki, której trzy różne modele przedstawia rys. 3.1. – Każda z dwóch końcówek żarówki może być zarówno jej wejściem jak i wyjściem; jednocześnie obie te końcówki mogą być także jej wejściami, jeśli uzna się, że jej wyjściem będzie szklana bańka emitująca światło. Ponadto, możliwość zróżnicowania modeli tkwi także w sposobie wykonania sprawdzeń – pomiaru napięć względem jednego jak i drugiego bieguna źródła zasilania.



Rys. 3.1.: a) żarówka i b, c, d) – jej modele

Modele określone digrafami G , G_1 , G_2 i G_3 (patrz tab. 3.1) odnoszą się do sytuacji, w której rozpoznanie zdatności szeregowo połączonych żarówek dokonywane jest poprzez obserwację świecenia jednej z nich, natomiast digrafami: G_4 , G_5 i G_6 – do sytuacji, w której rozpoznanie to wymaga jedynie pomiaru napięć w punktach pp_i (rys.1.1.a), tak zarówno względem jednego jak i drugiego bieguna źródła zasilania. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że brak marszrutu pomiędzy każdą parą wierzchołków w tych ostatnich nie oznacza przerwy w elektrycznym połączeniu żarówek.

Na rys. 3.3. przedstawiono rozszerzoną tablicę diagnostyczną M^R , łączącą właściwości wszystkich przedstawionych wcześniej modeli. Rysunek ten stanowi szczególny rodzaj pisma rysunkowego z objaśnieniami, w którym dodatkowy komentarz

może wydać się zbyteczny. Tym niemniej warto zauważyć tu niektóre istotne szczegóły.

Fragmentaryzacja tablicy diagnostycznej M^R jest implikowana zróżnicowaniem wartości prawdopodobieństw stanów wynikających z niezdatności co najmniej dwóch żarówek. Zróżnicowanie to wyraźnie wynika z „odległości” między tymi żarówkami – z jednej, i liczby przesłanianych stanów niezawodnościowych – z drugiej strony. Można rzec, że wartość prawdopodobieństwa wystąpienia danego stanu niezdatności równe jest iloczynowi wartości prawdopodobieństw zdatności i niezdatności elementów go powodujących – elementów, których stany można doświadczalnie stwierdzić na podstawie ich sygnałów wyjściowych przy doprowadzonych do nich dopuszczalnych sygnałach wejściowych.

W przypadku badanego obiektu trudno jest stwierdzić stan niezawodnościowy żarówek z_2, z_3 oraz z_2 i z_3 w stanach $m_{1,3}$, $m_{2,4}$ i $m_{1,4}$, a więc w tych stanach, w których „odległość” między – wskazanymi przez diagnozę – niezdatnymi żarówkami jest większa lub równa jedności. Określenie ukrytych stanów niezawodnościowych żarówek z_2, z_3 oraz z_2 i z_3 staje się możliwe dopiero po dokonaniu częściowej odnowy i ponownym diagnozowaniu [7].

Dla potrzeb opracowania programów diagnostycznych posłużono się, podobnie jak w poprzednim punkcie, algorytmem 2.1 i podobnie jak tam dokonano tego dla dwóch różnych czasów sprawdzenia obecności światła. Okazało się, że gdy czas ten zrównał się z czasami pozostałych sprawdzeń kontrola obecności światła stała się zbędna. Tak dokonała się, opisująca w niektórych publikacjach [4, 5, 8], minimalizacja sprawdzeń dostępnych. Pomniejszyła się, także średnia liczba sprawdzeń „S” co jednak nie stało się jednoznaczne z pomniejszeniem wartości oczekiwanego kosztu badań „K”.

Każdy, przedstawiony na rys. 3.4., program diagnozowania zawdzięcza swój kształt przede wszystkim wartości prawdopodobieństwa niezdatności q – jednakowej dla każdej żarówki. Jest przy tym pewną prawidłowością, że kształt ten jest zbliżony do optymalnego dla określonego przedziału tej wartości i w jakimś sensie elastycznym do jego wzrostu, spowodowanego np. wiekiem żarówek. Różnorodność kształtów programów diagnozowania wyjaśnić mogą wykresy 3.1 i 3.2. Wartym zauważenia jest fakt, że gdy $q > 0,5$ najbardziej prawdopodobnym stanem niezawodnościowym obiektu jest stan $m_{1,4}$, w którym „odległość” między niezdatnymi żarówkami jest maksymalna, i że dla $q \approx 0,4$ następuje (na poziomie 0,35) zrównanie wartości prawdopodobieństw stanów wynikających z niezdatności jednej i dwóch żarówek.

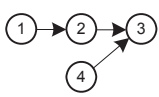
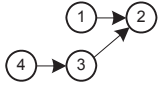
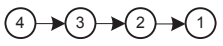
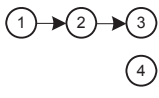

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

O czterech szeregowo połączonych żarówkach w aspekcie ich diagnozowania można byłoby jeszcze wiele napisać. Istotnym punktem dalszych rozważań mogłaby być np.: modyfikacja każdego z przedstawionych programów dla potrzeb diagnozowania wielokrokowego [7] lub wielotorowego [6]. Mogłby być przedstawiony stały program diagnostyczny wraz z

przyporządkowaną mu optymalną tablicą diagnostyczną [4]. Być może celowym byłoby także zaproponowanie komputerowej metodyki wspomaganie procesu pomiarów, kontroli i wnioskowania [1]. Za najważniejszą jednak należy uznać w tym miejscu ocenę każdego programu - określenie w jakim stopniu jest on lepszy lub gorszy względem innego.

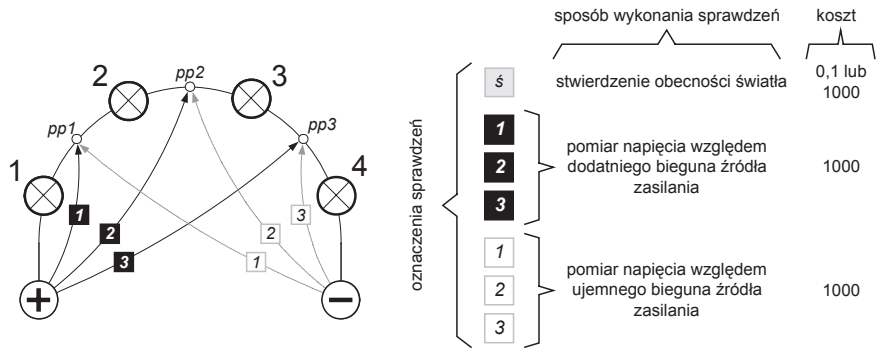
Tabela 3.1.

Inne modele czterech szeregowo połączonych żarówek (poza modelem przedstawionym na rys 1.1.b), gdzie: części tablic wydzielone cienką podwójną linią – górnotrójkątne macierze osiągalności $D^V(G_i)$, $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; oznaczenie n/m^z – numer wierzchołka/numer punktu pomiarowego ^{biegun źródła zasilania, względem którego dokonywany jest pomiar U} ; s_i – światło i -tej żarówki.

Digraf	Pełna tablica diagnostyczna	Wartości prawdopodobieństw r wystąpienia stanów m																																														
		przy zróżnicowanych wartościach prawdopodobieństw niezdatności żarówek	przy jednakowych wartościach prawdopodobieństw niezdatności żarówek																																													
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>																																													
 G_1	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>1/1⁻</th> <th>2/2⁻</th> <th>4/3⁺</th> <th>s_3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{1,4}$</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{2,4}$</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		1/1 ⁻	2/2 ⁻	4/3 ⁺	s_3	m_0	0	0	0	0	m_1	1	1	0	1	m_2	0	1	0	1	m_4	0	0	1	1	m_3	0	0	0	1	$m_{1,4}$	1	1	1	1	$m_{2,4}$	0	1	1	1	$r_0 = p_1 p_2 p_4 p_3$ $r_1 = a_1 l d_4 l$ $r_2 = p_1 q_2 p_4 l$ $r_4 = p_1 p_2 q_4 l$ $r_3 = p_1 p_2 p_4 q_3$ $r_{1,4} = a_1 l a_4 l$ $r_{2,4} = p_1 q_2 q_4 l$	$r_0 = p^4$ $r_1 = ap$ $r_2 = qp^2$ $r_4 = qp^2$ $r_3 = qp^3$ $r_{1,4} = a^2$ $r_{2,4} = q^2 p$					
	1/1 ⁻	2/2 ⁻	4/3 ⁺	s_3																																												
m_0	0	0	0	0																																												
m_1	1	1	0	1																																												
m_2	0	1	0	1																																												
m_4	0	0	1	1																																												
m_3	0	0	0	1																																												
$m_{1,4}$	1	1	1	1																																												
$m_{2,4}$	0	1	1	1																																												
 G_2	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>4/3⁺</th> <th>3/2⁺</th> <th>1/1⁻</th> <th>s_2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{1,4}$</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{1,3}$</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		4/3 ⁺	3/2 ⁺	1/1 ⁻	s_2	m_0	0	0	0	0	m_4	1	1	0	1	m_3	0	1	0	1	m_1	0	0	1	1	m_2	0	0	0	1	$m_{1,4}$	1	1	1	1	$m_{1,3}$	0	1	1	1	$r_0 = p_4 p_3 p_1 p_2$ $r_4 = a_4 l d_1 l$ $r_3 = p_4 q_3 p_1 l$ $r_1 = p_4 p_3 q_1 l$ $r_2 = p_4 p_3 p_1 q_2$ $r_{1,4} = a_4 l a_1 l$ $r_{1,3} = p_4 q_3 q_1 l$	$r_0 = p^4$ $r_4 = ap$ $r_3 = qp^2$ $r_1 = qp^2$ $r_2 = qp^3$ $r_{1,4} = a$ $r_{1,3} = q^2 p$					
	4/3 ⁺	3/2 ⁺	1/1 ⁻	s_2																																												
m_0	0	0	0	0																																												
m_4	1	1	0	1																																												
m_3	0	1	0	1																																												
m_1	0	0	1	1																																												
m_2	0	0	0	1																																												
$m_{1,4}$	1	1	1	1																																												
$m_{1,3}$	0	1	1	1																																												
 G_3	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>4/3⁺</th> <th>3/2⁺</th> <th>2/1⁺</th> <th>s_1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		4/3 ⁺	3/2 ⁺	2/1 ⁺	s_1	m_0	0	0	0	0	m_4	1	1	1	1	m_3	0	1	1	1	m_2	0	0	1	1	m_1	0	0	0	1	$r_0 = p_4 p_3 p_2 p_1$ $r_4 = a_4 l l l$ $r_3 = p_4 q_3 l l$ $r_1 = p_4 p_3 q_2 l$ $r_2 = p_4 p_3 p_2 q_1$	$r_0 = p^4$ $r_4 = a$ $r_3 = qp$ $r_1 = qp^2$ $r_2 = qp^3$															
	4/3 ⁺	3/2 ⁺	2/1 ⁺	s_1																																												
m_0	0	0	0	0																																												
m_4	1	1	1	1																																												
m_3	0	1	1	1																																												
m_2	0	0	1	1																																												
m_1	0	0	0	1																																												
 G_4	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>1/1⁻</th> <th>2/2⁻</th> <th>3/3⁻</th> <th>4/3⁺</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{1,4}$</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{2,4}$</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$m_{3,4}$</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		1/1 ⁻	2/2 ⁻	3/3 ⁻	4/3 ⁺	m_0	0	0	0	0	m_1	1	1	1	0	m_2	0	1	1	0	m_3	0	0	1	0	m_4	0	0	0	1	$m_{1,4}$	1	1	1	1	$m_{2,4}$	0	1	1	1	$m_{3,4}$	0	0	1	1	$r_0 = p_1 p_2 p_3 p_4$ $r_1 = a_1 l l d_4$ $r_2 = p_1 q_2 l p_4$ $r_3 = p_1 p_2 q_3 p_4$ $r_4 = p_1 p_2 p_3 q_4$ $r_{1,4} = a_1 l l a_4$ $r_{2,4} = p_1 q_2 l q_4$ $r_{3,4} = p_1 p_2 q_3 q_4$	$r_0 = p^4$ $r_1 = ap$ $r_2 = qp^2$ $r_3 = qp^3$ $r_4 = qp^3$ $r_{1,4} = a^2$ $r_{2,4} = q^2 p$ $r_{3,4} = p^2 q^2$
	1/1 ⁻	2/2 ⁻	3/3 ⁻	4/3 ⁺																																												
m_0	0	0	0	0																																												
m_1	1	1	1	0																																												
m_2	0	1	1	0																																												
m_3	0	0	1	0																																												
m_4	0	0	0	1																																												
$m_{1,4}$	1	1	1	1																																												
$m_{2,4}$	0	1	1	1																																												
$m_{3,4}$	0	0	1	1																																												
 G_5	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>1/1⁻</th> <th>2/2⁻</th> <th>4/3⁺</th> <th>3/2⁺</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m_0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>m_4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>m_3</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		1/1 ⁻	2/2 ⁻	4/3 ⁺	3/2 ⁺	m_0	0	0	0	0	m_1	1	1	0	0	m_2	0	1	0	0	m_4	0	0	1	1	m_3	0	0	0	1	$r_0 = p_1 p_2 p_4 p_3$ $r_1 = a_1 l d_4 d_3$ $r_2 = p_1 q_2 p_4 p_3$ $r_4 = p_1 p_2 q_4 l$ $r_3 = p_1 p_2 p_4 q_3$	$r_0 = p^4$ $r_1 = ap^2$ $r_2 = qp^3$ $r_4 = qp^2$ $r_3 = qp^3$															
	1/1 ⁻	2/2 ⁻	4/3 ⁺	3/2 ⁺																																												
m_0	0	0	0	0																																												
m_1	1	1	0	0																																												
m_2	0	1	0	0																																												
m_4	0	0	1	1																																												
m_3	0	0	0	1																																												

	<table border="1"> <tr><td>$m_{1,4}$</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{1,3}$</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{2,4}$</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{2,3}$</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	$m_{1,4}$	1	1	1	1	$m_{1,3}$	1	1	0	1	$m_{2,4}$	0	1	1	1	$m_{2,3}$	0	1	0	1	<table border="1"> <tr><td>$r_{1,4}$</td><td>q_1</td><td>1</td><td>q_4</td><td>1</td></tr> <tr><td>$r_{1,3}$</td><td>q_1</td><td>1</td><td>p_4</td><td>q_3</td></tr> <tr><td>$r_{2,4}$</td><td>p_1</td><td>q_2</td><td>q_4</td><td>1</td></tr> <tr><td>$r_{3,4}$</td><td>p_1</td><td>q_2</td><td>p_4</td><td>q_3</td></tr> </table>	$r_{1,4}$	q_1	1	q_4	1	$r_{1,3}$	q_1	1	p_4	q_3	$r_{2,4}$	p_1	q_2	q_4	1	$r_{3,4}$	p_1	q_2	p_4	q_3	<table border="1"> <tr><td>$r_{1,4}$</td><td>q^2</td></tr> <tr><td>$r_{1,3}$</td><td>qp</td></tr> <tr><td>$r_{2,4}$</td><td>q^2p</td></tr> <tr><td>$r_{3,4}$</td><td>q^2p^2</td></tr> </table>	$r_{1,4}$	q^2	$r_{1,3}$	qp	$r_{2,4}$	q^2p	$r_{3,4}$	q^2p^2
$m_{1,4}$	1	1	1	1																																															
$m_{1,3}$	1	1	0	1																																															
$m_{2,4}$	0	1	1	1																																															
$m_{2,3}$	0	1	0	1																																															
$r_{1,4}$	q_1	1	q_4	1																																															
$r_{1,3}$	q_1	1	p_4	q_3																																															
$r_{2,4}$	p_1	q_2	q_4	1																																															
$r_{3,4}$	p_1	q_2	p_4	q_3																																															
$r_{1,4}$	q^2																																																		
$r_{1,3}$	qp																																																		
$r_{2,4}$	q^2p																																																		
$r_{3,4}$	q^2p^2																																																		

1	2	3	4																																																																																																					
	<table border="1"> <tr><td></td><td>4/3⁺</td><td>3/2⁺</td><td>2/1⁺</td><td>1/1⁻</td></tr> <tr><td>m_0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>m_1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>m_3</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>m_2</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>m_1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{1,4}$</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{1,3}$</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>$m_{1,2}$</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>		4/3 ⁺	3/2 ⁺	2/1 ⁺	1/1 ⁻	m_0	0	0	0	0	m_1	1	1	1	0	m_3	0	1	1	0	m_2	0	0	1	0	m_1	0	0	0	1	$m_{1,4}$	1	1	1	1	$m_{1,3}$	0	1	1	1	$m_{1,2}$	0	0	1	1	<table border="1"> <tr><td>r_0</td><td>p_4</td><td>p_3</td><td>p_2</td><td>p_1</td></tr> <tr><td>r_1</td><td>a_1</td><td>1</td><td>1</td><td>a_1</td></tr> <tr><td>r_2</td><td>p_4</td><td>q_3</td><td>1</td><td>p_1</td></tr> <tr><td>r_3</td><td>p_4</td><td>p_3</td><td>q_2</td><td>p_1</td></tr> <tr><td>r_4</td><td>p_4</td><td>p_3</td><td>p_2</td><td>q_1</td></tr> <tr><td>$r_{1,4}$</td><td>a_1</td><td>1</td><td>1</td><td>a_1</td></tr> <tr><td>$r_{2,4}$</td><td>p_4</td><td>q_3</td><td>1</td><td>q_1</td></tr> <tr><td>$r_{3,4}$</td><td>p_4</td><td>p_3</td><td>q_2</td><td>q_1</td></tr> </table>	r_0	p_4	p_3	p_2	p_1	r_1	a_1	1	1	a_1	r_2	p_4	q_3	1	p_1	r_3	p_4	p_3	q_2	p_1	r_4	p_4	p_3	p_2	q_1	$r_{1,4}$	a_1	1	1	a_1	$r_{2,4}$	p_4	q_3	1	q_1	$r_{3,4}$	p_4	p_3	q_2	q_1	<table border="1"> <tr><td>r_0</td><td>p^4</td></tr> <tr><td>r_1</td><td>ap^2</td></tr> <tr><td>r_2</td><td>qp^2</td></tr> <tr><td>r_3</td><td>qp^3</td></tr> <tr><td>r_4</td><td>qp^3</td></tr> <tr><td>$r_{1,4}$</td><td>a^2</td></tr> <tr><td>$r_{2,4}$</td><td>q^2p</td></tr> <tr><td>$r_{3,4}$</td><td>q^2p^2</td></tr> </table>	r_0	p^4	r_1	ap^2	r_2	qp^2	r_3	qp^3	r_4	qp^3	$r_{1,4}$	a^2	$r_{2,4}$	q^2p	$r_{3,4}$	q^2p^2
	4/3 ⁺	3/2 ⁺	2/1 ⁺	1/1 ⁻																																																																																																				
m_0	0	0	0	0																																																																																																				
m_1	1	1	1	0																																																																																																				
m_3	0	1	1	0																																																																																																				
m_2	0	0	1	0																																																																																																				
m_1	0	0	0	1																																																																																																				
$m_{1,4}$	1	1	1	1																																																																																																				
$m_{1,3}$	0	1	1	1																																																																																																				
$m_{1,2}$	0	0	1	1																																																																																																				
r_0	p_4	p_3	p_2	p_1																																																																																																				
r_1	a_1	1	1	a_1																																																																																																				
r_2	p_4	q_3	1	p_1																																																																																																				
r_3	p_4	p_3	q_2	p_1																																																																																																				
r_4	p_4	p_3	p_2	q_1																																																																																																				
$r_{1,4}$	a_1	1	1	a_1																																																																																																				
$r_{2,4}$	p_4	q_3	1	q_1																																																																																																				
$r_{3,4}$	p_4	p_3	q_2	q_1																																																																																																				
r_0	p^4																																																																																																							
r_1	ap^2																																																																																																							
r_2	qp^2																																																																																																							
r_3	qp^3																																																																																																							
r_4	qp^3																																																																																																							
$r_{1,4}$	a^2																																																																																																							
$r_{2,4}$	q^2p																																																																																																							
$r_{3,4}$	q^2p^2																																																																																																							



Rys.3.2 Sprawdzenia czterech szeregowo połączonych żarówek

MR oznaczenia rozróżnialnych stanów niezawodnościowych szeregowego połączenia czterech żarówek	sprawdzenia							
	m_0	ś	1	2	3	1	2	3
	m_1	0	0	0	0	0	0	0
	m_2	1	0	0	0	1	1	1
	m_3	1	1	0	0	0	1	1
	m_4	1	1	1	0	0	0	1
	$m_{1,2}$	1	1	0	0	1	1	1
	$m_{2,3}$	1	1	1	0	0	1	1
	$m_{3,4}$	1	1	1	1	0	0	1
	$m_{1,3}$	1	1	1	0	1	1	1
	$m_{2,4}$	1	1	1	1	0	1	1
	$m_{1,4}$	1	1	1	1	1	1	1

charakterystyki probabilistyczne stanów niezawodnościowych			
$p_1 \neq p_2 \neq p_3 \neq p_4$ $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p = 1 - q$			
r_0	$= p_1 p_2 p_3 p_4$	$= p^4$	$= (1-q)^4$
r_1	$= q_1 p_2 p_3 p_4$	$= p^3 q$	$= (1-q)^3 q$
r_2	$= p_1 q_2 p_3 p_4$	$= p^3 q$	$= (1-q)^3 q$
r_3	$= p_1 p_2 q_3 p_4$	$= p^3 q$	$= (1-q)^3 q$
r_4	$= p_1 p_2 p_3 q_4$	$= p^3 q$	$= (1-q)^3 q$
$r_{1,2}$	$= q_1 q_2 p_3 p_4$	$= p^2 q^2$	$= (1-q)^2 q^2$
$r_{2,3}$	$= p_1 q_2 q_3 p_4$	$= p^2 q^2$	$= (1-q)^2 q^2$
$r_{3,4}$	$= p_1 p_2 q_3 q_4$	$= p^2 q^2$	$= (1-q)^2 q^2$
$r_{1,3}$	$= q_1 1 q_3 p_4$	$= pq^2$	$= (1-q)q^2$
$r_{2,4}$	$= p_1 q_2 1 q_4$	$= pq^2$	$= (1-q)q^2$
$r_{1,4}$	$= q_1 1 1 q_4$	$= q^2$	$= q^2$

0	⇒ obecność światła
1	⇒ brak światła
0	⇒ $U \neq 0V$
1	⇒ $U = 0V$

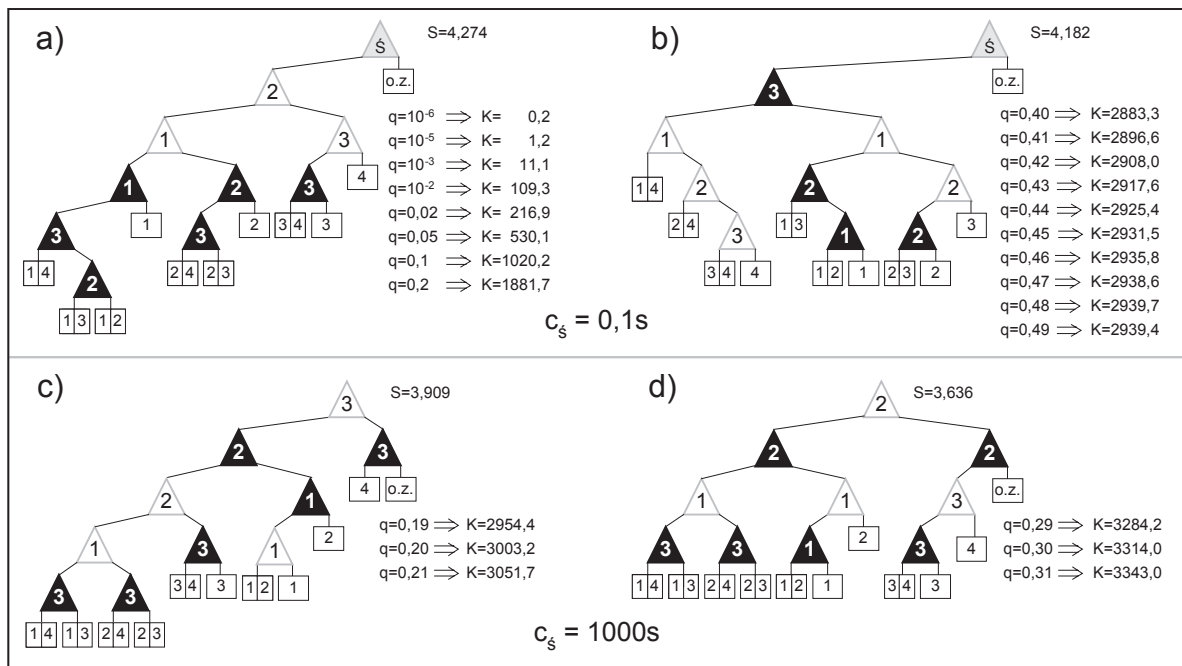
a)

$$p_1 \left(p_2 \left(p_3 \left(p_4 + q_4 \right) + q_3 \left(p_4 + q_4 \right) \right) + q_2 \left(p_4 \left(p_3 + q_3 \right) + q_4 \right) \right) + q_1 \left(p_4 \left(p_3 \left(p_2 + q_2 \right) + q_3 \right) + q_4 \right) = 1$$

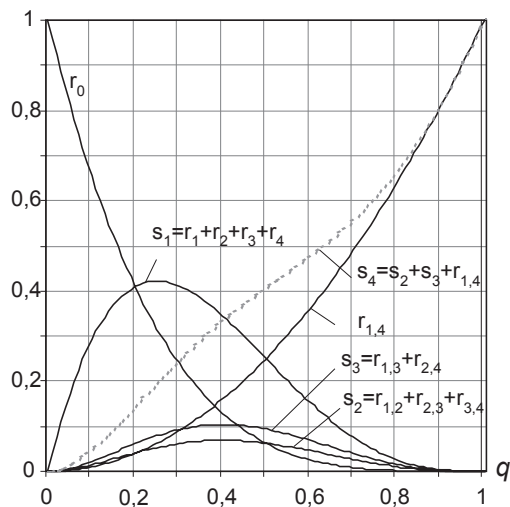
b)

$$\begin{aligned} & (1-q)^4 + 4(1-q)^3q + q^2(3(1-q)^2+2(1-q)+1) = \\ & = q^4 - 4q^3 + 6q^2 - 4q + 1 + -4q^4 + 12q^3 - 12q^2 + 4q + 3q^4 - 8q^3 + 6q^2 = \\ & = q^4 - 4q^4 + 3q^4 + -4q^3 + 12q^3 - 8q^3 + 6q^2 - 12q^2 + 6q^2 + -4q + 4q + 1 = 1 \end{aligned}$$

Rys. 3.3. Pełna rozszerzona tablica diagnostyczna czterech szeregowo połączonych żarówek wraz z oznaczeniami wyników sprawdzeń i sumami kontrolnymi (a, b) wartości prawdopodobieństw rozróżnialnych stanów niezawodnościowych przy zróżnicowanych i jednakowych wartościach prawdopodobieństw niezdatności elementów

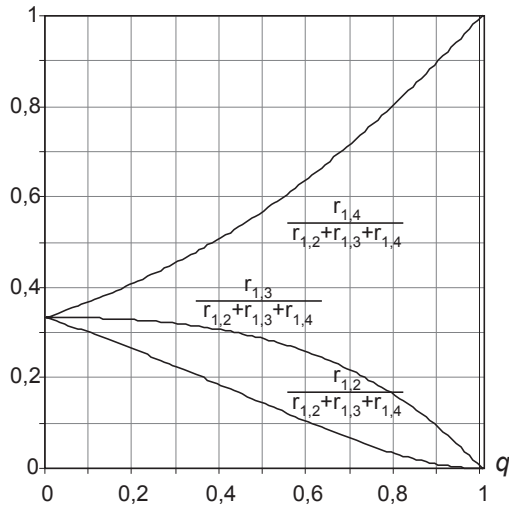


Rys.3.4. Programy diagnozowania czterech szeregowo połączonych żarówek, opracowane na podstawie pełnej rozszerzonej tablicy diagnostycznej M^R (rys. 3.3), gdzie: S – średnia liczba sprawdzeń; K – wartość oczekiwanego kosztu badań, c_s – koszt sprawdzenia obecności światła.



Wykr.3.1. Wartości prawdopodobieństw występowania rozróżnialnych stanów niezawodnościowych czterech szeregowo połączonych żarówek.

Zazwyczaj zasadniczymi kryteriami oceny programów są: wartość oczekiwanego kosztu badań i wiarygodność diagnoz. Z uwagi na strukturę połączeń elementów badanego tu obiektu (czterech szeregowo połączonych żarówek) oraz poczynionego wcześniej założenia o pełnej wiarygodności wyników sprawdzeń, tylko pierwsze z wymienionych kryteriów może mieć istotne zastosowanie. Wykorzystane drugiego z nich polecane jest dla struktur rozgałęzionych, dla których typowa jest (przy lokalizacji co najwyżej jednego niezdatnego elementu obiektu) minimalizacja liczby zbioru sprawdzeń.



Wykr.3.2. Względne wartości prawdopodobieństw występowania stanów wynikających z niezdatności dwóch spośród czterech szeregowo połączonych żarówek.

Podstawą wyznaczenia wartości oczekiwanego kosztu (czasu) realizacji danego programu diagnostycznego jest dysponowanie wartościami prawdopodobieństw wystąpienia występujących w nim ciągów sprawdzeń. Kompleksowe i rzetelne ujęcie tego problemu staje się możliwe jedynie poprzez zastosowanie rozszerzonej pełnej tablicy diagnostycznej M^R (rys. 3.3) i określonej na jej podstawie zależności na wartości prawdopodobieństw r . Układ wyników danej sekwencji sprawdzeń określa adekwatny jej – jedno lub wieloelementowy – zbiór stanów niezawodnościowych. Ponieważ każdy ze stanów występuje z określoną wartością prawdopodobieństwa, wartość prawdopodobieństwa wystąpienia danego ciągu

sprawdzeń określona jest sumą wartości prawdopodobieństw wystąpienia niezdatności elementów adekwatnego mu zbioru stanów.

Na podstawie wykresów (4.1) można powiedzieć, że koszty programów:

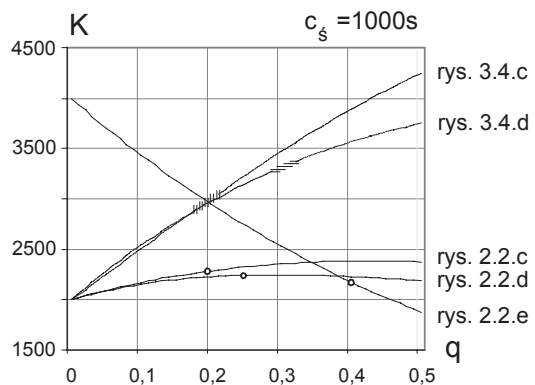
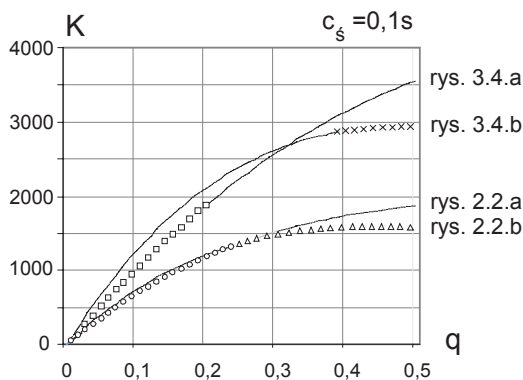
- są tym większe im większa jest cena i liczba użytych w nim sprawdzeń, i
- są zmienne wraz ze zmiennością swej struktury i zmiennością wartości prawdopodobieństw niezdatności elementów składowych obiektu.

To ostatnie, choć intuicyjnie zrozumiane i oczywiste, nie znajduje potwierdzenia w dotychczasowej praktyce określania kosztów.

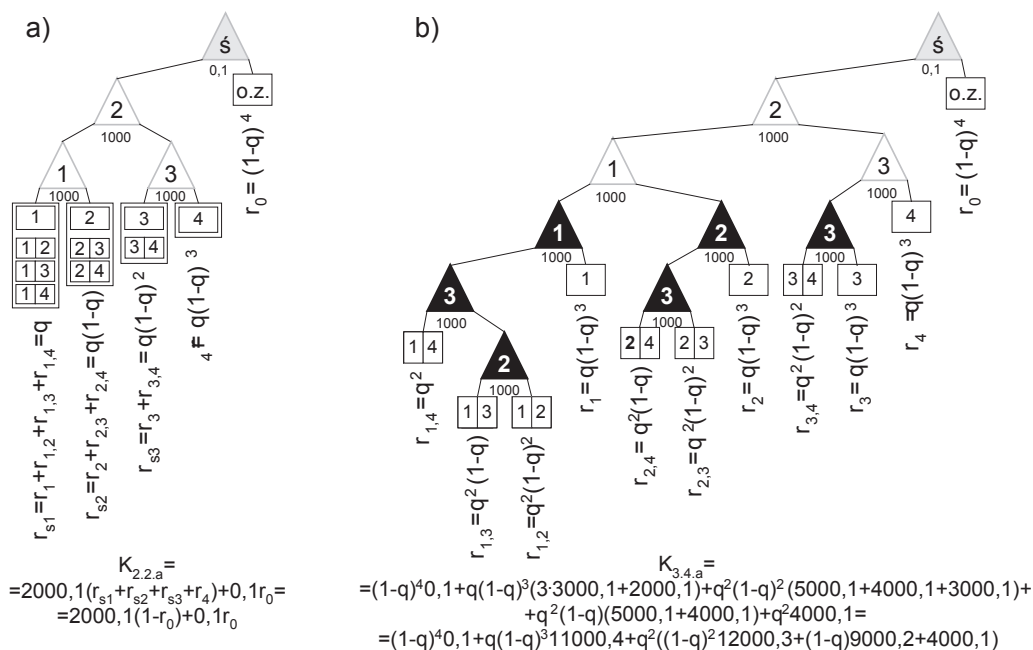
Minimalizacja liczby sprawdzeń może oznaczać (obok korzystnej minimalizacji kosztów) niekorzystną niejednoznaczność diagnoz. Na rysunku 4.1

przedstawiono dwa programy, z których jeden jest kontynuacją drugiego. Brak dodatkowych sprawdzeń pomniejsza wiarygodność opcjonalnej diagnozy. Jej wielkość jest tym mniejsza im większa jest wartość prawdopodobieństwa niezdatności elementów i im mniejsza jest liczba sprawdzeń z wynikiem pozytywnym. Wraz z pomniejszeniem tej wiarygodności wzrasta wiarygodność pojawienia się jej niejednoznaczności.

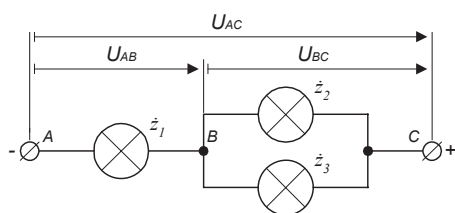
W przypadku czterech szeregowo połączonych żarówek alternatywność diagnoz nie sprawia istotnego problemu – żadna z tych diagnoz nie jest przecież fałszywą lecz co najwyżej niepełną. Ta niewielka niedogodność może być usunięta drogą diagnozowania wielokrokowego. Tę samą nie można jednak powiedzieć już w odniesieniu do trzech żarówek połączonych tak jak to przedstawiono na rysunku 4.2.



Wykr. 4.1. Zmienność wartości oczekiwanych kosztów realizacji programów diagnozowania czterech szeregowo połączonych żarówek (identyfikowanych numerami rysunków) w funkcji zmian wartości prawdopodobieństwa niezdatności q – jednakowego dla każdej poszczególnej żarówki tego połączenia. Pogrubione linie oraz wprowadzone punkty oznaczają wartości prawdopodobieństw q , dla których przewidziane jest zastosowanie danego programu.



Rys. 4.1. Metodyka wykorzystania tablicy M^R w procesie wyznaczania wartości oczekiwanych kosztów realizacji programów przedstawionych na rysunkach 2.2.a i 3.4a



Rys. 4.2. Układ żarówek, dla którego proces lokalizowania pojedynczych niezdatności może doprowadzić do fałszywej diagnozy.

Wartym zauważenia jest pogląd zgodnie, z którym przy poszukiwaniu co najwyżej jednej niezdatnej żarówki wystarcza - po doprowadzeniu napięcia zasilającego U_{AC} - sprawdzenie świecenia się żarówek z_2 i z_3 . Kiedy będą świecić się obie żarówki układ uznaje się za zdalny, kiedy będzie się świecić tylko żarówka z_2 mówi się o przepaleniu żarówki z_3 , i odwrotnie - kiedy będzie się świecić tylko żarówka z_3 mówi się o przepaleniu żarówki z_2 . Znamiennym jest fakt, iż kiedy nie będą się świecić obie żarówki z_2 i z_3 orzeka się przepalenie żarówki z_1 , choć faktyczną przyczyną może być również przepalenie się żarówek z_2 i z_3 lub z_1 i z_2 lub z_1 i z_3 lub też z_1 , z_2 i z_3 .

Uciążliwe i niejednokrotnie czasochłonne czynności związane z odnową elementów zdalnych wskazanych jako niezdatne nie dość, że okazują się zbędne, to na dodatek stale powtarzane pozwalają domniemywać naruszenie zasad obsługi technicznej, potem - niepoprawnie przeprowadzonej odnowy, a następnie - niezdatność urządzeń badawczych. Ostateczne stwierdzenie zdalności odnawianego elementu prowadzi zwykle (w dalszej kolejności) do lokalizacji niezdatności opartej o tzw. intuicję inżynierską. Dla obiektów o bardzo złożonej strukturze zadanie to, wykonywane

w taki sposób, staje się praktycznie rzecz biorąc niewykonalne. Takich problemów - związanych z fałszywymi diagnozami - nie wprowadza użycie pełnych programów diagnozowania przedstawionych w punktach: 2 i 3 niniejszego opracowania. Nie wprowadza ich także użycie funkcjonalnej struktury niezawodnościowej obiektu, pozwalającej na określenie bezwzględnych wartości prawdopodobieństw wystąpienia jego rozróżnialnych stanów niezawodnościowych [9].

5. LITERATURA

- [1] Fedyna K., Szczepański P.: Stanowisko komputerowej analizy i syntezy diagnostycznej złożonego obiektu technicznego. VII Krajowe Sympozjum Eksploatacji Urządzeń Technicznych. Problemy Eksploatacji 6/93. Diagnostyka. Radom-Kozubnik 1993.
- [2] Jaźwiński J., S. Preckajło: Diagnostyka nie tylko medyczna, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1970.
- [3] Korzan B.: Elementy teorii grafów i sieci, WNT, Warszawa 1978
- [4] Młokosiewicz J., R.: Metoda wielopoziomowego badania stanu obiektów technicznych i synteza systemu diagnostycznego, WAT, Warszawa 1987.
- [5] Rozwadowski T.: Diagnostyka techniczna obiektów złożonych (wydanie drugie uzupełnione i poprawione), WAT, Warszawa 1983.
- [6] Szczepański P.: Wielotorowość w warunkowym programie diagnozowania złożonego obiektu technicznego. Biuletyn WAT. nr 2/1997. Warszawa, 1997.

- [7] Szczepański P.: - O wielokrokowości procesu diagnozowania złożonego obiektu technicznego. Referaty i komunikaty IX Konferencji Naukowo - Technicznej nt.: Diagnostyka maszyn roboczych i pojazdów, Bydgoszcz, 1994.
- [8] Szczepański P.: Minimalizacja zbioru sprawdzeń metodą pionów jedykowych. Biuletyn WAT. nr 1-2 /1995. Warszawa, 1995.
- [9] Szczepański P.: Określanie i zastosowanie prawdopodobieństw występowania rozróżnialnych stanów wadliwego funkcjonowania obiektu. Biuletyn WAT. nr 8/2001.(str. 25-40)
- [10] Żółtowski B., Józefik W.: Diagnostyka techniczna elektrycznych urządzeń przemysłowych, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.



Dr inż. **Paweł Szczepański**
 Ur. 23.01.1955 r. w
 Warszawie. Absolwent
 Elektroniczno –
 Mechanicznych Zakładów
 Naukowych im. M.
 Kasprzaka w Warszawie. W
 latach 1976-1981 studia na
 Wydziale
 Elektromechanicznym

WAT zakończone dyplomem magistra inżyniera o specjalności: eksploatacja urządzeń radioelektrycznych. Praca doktorska nt.: „Diagnozowanie złożonych obiektów technicznych z uszkodzeniami wielokrotnymi” obroniona w 1990 r. Od roku 1983 pracownik WAT, obecnie w Instytucie Systemów Uzbrojenia na stanowisku kierownika Zakładu Broni Rakietowej. Dorobek naukowy obejmuje ponad 40 publikacji w tym dwa skrypty. Zainteresowania naukowe: diagnostyka techniczna.