



## Para zagrożeniowo-ochronna jako element szacowania bezpieczeństwa obiektu i ryzyka

PAWEŁ SZCZEPAŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa (były pracownik, emeryt),  
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, paszczep@neostrada.pl

**Streszczenie.** W pracy parami zagrożeniowo-ochronnymi są wirtualne elementy obiektu, rzutujące na jego zdolności ochronne przed konkretnymi zagrożeniami. Skutkiem ukierunkowanej inwazji każdej z tych par jest spowodowanie jakiejś niezdatności. Neutralność pary osiąga się w sytuacji pełnego spokoju lub pełnej ochrony przed przypisanym tej ochronie zagrożeniem. Naruszenia neutralności (charakteryzowane prawdopodobieństwami) są przyczynkami do określenia: bezpieczeństwa obiektu, ryzyka serwisowania i ryzyka rekompensat za czas postoju. Zauważa się, że wyniki pracy mogą służyć także wielu innym zagadnieniom, np. optymalizacji pełnych warunkowych programów diagnozowania.

**Słowa kluczowe:** para zagrożeniowo-ochronna, bezpieczeństwo, ryzyko serwisowania, ryzyko rekompensat za czas postoju, program diagnozowania, inwazja, niezdatność

DOI: 10.5604/12345865.1131521

### 1. Wprowadzenie

Za znawcami przedmiotu [1] i [2] można powiedzieć, że **bezpieczeństwo (w ujęciu ilościowym) jest charakteryzowane prawdopodobieństwem tego, że ze strony danego tworzywa, działającego w określonych warunkach, nie nastąpi w ciągu sprecyzowanego czasu i w przewidzianych granicach żadne zagrożenie dla obiektu.**

Zawiłości różnych sytuacji wymagają użycia stosownych analiz. W przekonaniu autora niniejszej pracy, szczególnie obiecująca jest ta spośród nich, która uwzględnia strukturę obiektu i wraz z nią zbiór jego rozróżnialnych stanów inwazyjnie-niezawodnościowych. Ważne, aby struktura ta, obok elementów samego obiektu i kierunków ich wzajemnych oddziaływań, zaznaczała obecność i kierunki inwazji poszczególnych par zagrożeniowo-ochronnych.

Zweryfikowanym opisem struktury obiektu (w kontekście zbioru jego rozróżnialnych stanów inwazyjno-niezawodnościowych) jest digraf zwany także grafem skierowanym. Literatura przedmiotu digraf traktuje dość obszernie. Tu jednak, z uwagi na jego szczególnie przystępną formę opisu, poleca się pozycję [3]. Z tego opisu zaadaptowane zostały *warstwy* oraz *binarne macierze: przejść i osiągalności*. Występujące w artykule *zamknięcia tranzytywne i antytranzytywne* zaczerpnięto z literatury rosyjskiej [4]. Przypomnienie znaczenia tych i poprzednich pojęć nastąpi w dalszej części artykułu.

Przyjęto, że:

1. obiekt jest opisany strukturą połączeń elementów jednowyjściowych, z których każdy może mieć dowolną liczbę wejść;
2. element obiektu uważany jest za niezdatny, jeżeli wszystkie jego sygnały wejściowe są dopuszczalne, a sygnał wyjściowy — niedopuszczalny;
3. chociażby jeden niedopuszczalny sygnał wejściowy elementu prowadzi do powstania na jego wyjściu sygnału niedopuszczalnego;
4. każdemu zagrożeniu przypisana jest tylko jedna ochrona, która z kolei może być przyporządkowana dowolnej liczbie elementów;
5. elementy zewnętrznie współpracujące z obiektem cechuje pełna zdatność.

Do analizy ryzyka można wykorzystać wyniki uzyskane podczas analizy bezpieczeństwa. Produktem ubocznym tej ostatniej jest bowiem określenie prawdopodobieństw poszczególnych stanów inwazyjno-niezawodnościowych. Ryzyko staje się wtedy zsumowaniem przemnożeń tychże prawdopodobieństw przez przypisane im koszty strat. W odniesieniu do obiektu technicznego będzie mowa o ryzyku serwisowania i ryzyku rekompensat za czas tego serwisowania.

## 2. Para zagrożeniowo-ochronna

Z niezawodnościowego punktu widzenia para zagrożeniowo-ochronna jest równoległą strukturą niezawodnościową *spokoju* i *ochrony*, charakteryzowanych odpowiednio prawdopodobieństwami swych wystąpień:

$$i \quad s = 1 - z \quad (1)$$

$$o = 1 - u, \quad (2)$$

gdzie:  $z$  i  $u$  są odpowiednio prawdopodobieństwami wystąpienia zagrożenia i braku ochrony.

Suma prawdopodobieństw elementów pełnego zbioru zdarzeń:

$$so + su + zo + zu = 1. \quad (3)$$

Stopień bezpieczeństwa pary zagrożeniowo-ochronnej jest charakteryzowany prawdopodobieństwem:

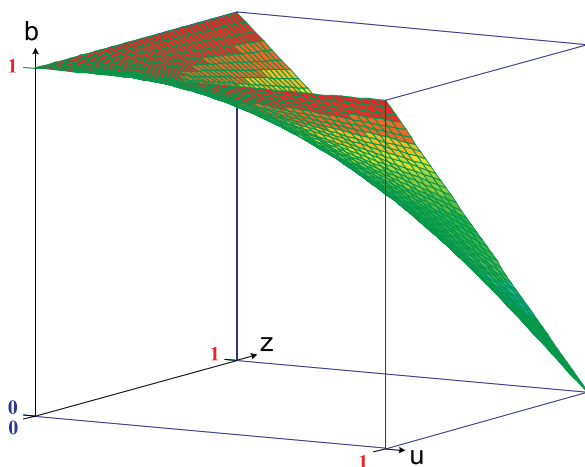
$$b = 1 - zu = 1 - (1 - s)(1 - o) = so + su + zo, \quad (4)$$

natomiast stopień jej inwazji — prawdopodobieństwem:

$$h = 1 - b. \quad (5)$$

Ponieważ nie nakłada się ograniczeń na liczebność par zagrożeniowo-ochronnych, każda wartość prawdopodobieństwa  $b$  (lub  $h$ ) będzie indeksowana cyfrą rzymską przypisaną konkretnej parze. Wielkości te mogą być oszacowane z jednej strony na podstawie informacji o liczbie zaistniałych zagrożeń w określonym przedziale czasu i skuteczności zastosowanych wobec nich ochron z drugiej. Inspiracją może w tym zakresie być praca [10].

Neutralność pary zagrożeniowo-ochronnej będzie tym większa, im wartość prawdopodobieństwa  $b$  będzie bliższa jedności, a więc gdy wartości prawdopodobieństw wystąpienia zagrożenia lub braku ochrony:  $z$  i  $u$  — bliższe zeru (patrz wykres przedstawiony na rysunku 1).



Rys. 1. Wykres zmienności stopnia bezpieczeństwa pary zagrożeniowo-ochronnej  $b$  w funkcji zmian prawdopodobieństw wystąpienia zagrożenia i braku ochrony:  $z$  i  $u$

Wartość konkretnego bezpieczeństwa  $b_i < 1$  może postawić pod znakiem zapytania sens całkowitego lub choćby tylko częściowego użycia obiektu. Gdy dla potrzeb analiz uwzględni się także niepożądany wpływ innych par zagrożeniowo-ochronnych, to decyzja o podjęciu użytkowania staje się jeszcze bardziej kłopotliwa.

### 3. Przykład analizy bezpieczeństwa i ryzyka

Potrzebę analizy bezpieczeństwa widzi się zwłaszcza tam, gdzie istotne jest życie i zdrowie ludzi, czystość środowiska naturalnego i utrzymanie ruchu ważnych procesów gospodarczych i obronnych. Każdorazowo wymaga ona dokładnego poznania zabezpieczanego obiektu nie tylko pod względem jego budowy i zasady działania — istotne staje się tu przede wszystkim poznanie jego newralgicznych punktów i warunków jego użycia. To ostatnie powinno wyzwolić troskę o zastosowanie właściwych metod ochrony przed ewentualnymi czynnikami destrukcyjnymi — inwazjami.

#### 3.1. Analiza bezpieczeństwa obiektu dla wybranego wariantu inwazji

Dla pominięcia etapu dogłębnego poznawania budowy i zasady pracy obiektu postanowiono, aby było nim *połączenie trzech przewodów*. Na rysunku 2 oprócz schematu tego połączenia (rys. 2a) przedstawiono także jego digraf  $G$  (rys. 2b), wskazujący kierunki wzajemnego oddziaływania tychże przewodów — każdemu przewodowi przypisany jest stosowny wierzchołek, zgodny nie tylko z numerem, ale i z kolorem tego przewodu. Każdy przewód  $e_i$ , gdzie  $i \in \{1, 2, 3\}$ , charakteryzowany jest prawdopodobieństwami zdatności i niezdatności, oznaczanymi odpowiednio:  $p_i$  i  $q_i$ . Suma

$$p_i + q_i = 1. \quad (6)$$

Tu wartości te zależne są od czasu. W przypadku ogólnym prawdopodobieństwa zdatności i niezdatności mogą też być zależne od innych wielkości, np.: kilometrów, motogodzin, cykli, obrotów, strzałów itp.

Digraf zawiera także pary zagrożeniowo-ochronne, zobrazowane wierzchołkami w postaci septagramów:  $e_I$ ,  $e_{II}$ ,  $e_{III}$  i  $e_{IV}$ . W wybranym wariacie wierzchołki te odnoszą się do następujących zagrożeń: sabotażu, szadzi, trzęsienia ziemi i wichru oraz (stosownych do tych zagrożeń) ochron: nadzoru służb energetycznych, ogrzewania, specjalistycznego systemu hydraulicznego i osłony.

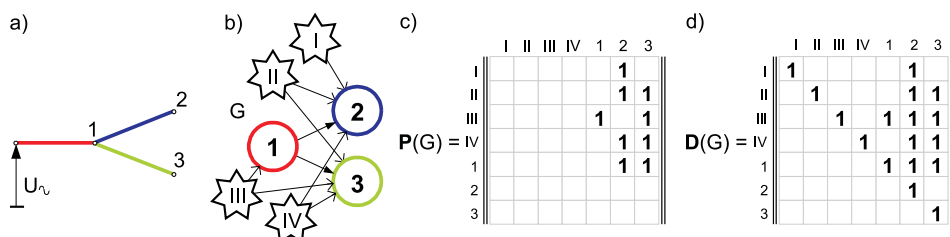
Binarna macierz przejść  $P(G)$  (rys. 2c) jest matematycznym opisem struktury digrafu  $G$ . Pionowe i poziome współrzędne jedynek w poszczególnych wierszach i kolumnach oznaczają odpowiednio bezpośrednie następniki i poprzedniki poszczególnych wierzchołków. Puste pola oznaczają zera. Ta uwaga będzie dotyczyć i pozostałych macierzy.

Binarna macierz osiągalności  $D(G)$  (rys. 2d) jedynekami w swoich wierszach i kolumnach wskazuje wszystkie — nie tylko bezpośrednie, ale i pośrednie następniki i poprzedniki poszczególnych wierzchołków digrafu  $G$  (par zagrożeniowo-ochronnych i przewodów). Zbiory tychże następników i poprzedników w języku teorii grafów nazywane są odpowiednio zamknięciami: tranzytywnymi  $\hat{F}(e_i)$  i antytranzytywnymi

$\tilde{\mathbf{F}}(e_i)$ . Przykładowo:  $\tilde{\mathbf{F}}(e_{III}) = \{e_{III}, e_1, e_2, e_3\}$ , natomiast  $\tilde{\mathbf{F}}(e_3) = \{e_3, e_1, e_{IV}, e_{III}, e_{II}\}$ . Formalnie macierz osiągalności

$$\mathbf{D}(\mathbf{G}) = \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{P}^k(\mathbf{G}); \quad n = \text{card } \mathbf{E}, \quad (7)$$

gdzie:  $\mathbf{E}$  — zbiór wierzchołków digrafu. Sumy i mnożenia oznaczają odpowiednio alternatywy i koniunkcje.



Rys. 2. Opis połączenia trzech przewodów: a) schemat ideowy z miejscem podłączenia wymuszenia; b) digraf  $G$  — model obiektu wraz z naniesionymi inwazjami par zagrożeniowo-ochronnych, wyrażonymi septagramami; c) i d) binarne macierze: przejść  $\mathbf{P}(\mathbf{G})$  i osiągalności  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$

Macierz  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$  (rys. 2d) przyjęła formę macierzy górnotrójkątnej dzięki wprowadzeniu numeracji wierszy i kolumn zgodnej z numeracją wierzchołków w kolejnych warstwach digrafu [3]. Do warstwy pierwszej zaliczają się te wierzchołki, które nie mają swoich poprzedników. Do warstwy drugiej te, które nie miałyby swoich poprzedników po usunięciu z digrafu wierzchołków warstwy pierwszej. Z kolei do warstwy trzeciej i kolejnych będą zaliczać się te, które nie będą miały swoich poprzedników po usunięciu z digrafu wierzchołków poprzednich warstw. Digraf  $G$  (rys. 2b) ma trzy warstwy:

$$\mathbf{W}_1 = \{e_1, e_{II}, e_{III}, e_{IV}\}, \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_2 = \{e_1\}, \quad (9)$$

$$\mathbf{W}_3 = \{e_2, e_3\}. \quad (10)$$

O sensie użycia macierzy osiągalności decyduje jej złożoność obliczeniowa, co do której odniesiono się dość obszernie między innymi w rozprawie doktorskiej [12]. Mając na względzie ten aspekt, czyni się zwykle wiele dodatkowych zabiegów. Już na etapie graficznego przedstawiania struktury dokonuje się agregacji elementów pozbawionych dostępu pomiarowo-kontrolnego, a każdą pętlę sprzężenia zwrotnego (silną spójność) — bez względu na liczebność jej wierzchołków — zastępuje się jednym wierzchołkiem (patrz **graf Hertza** [3]). Do najbardziej spektakularnych

przedsięwzięć zaliczyć należy potęgowanie potęg górnotrójkątej macierzy  $\mathbf{B} = \mathbf{P} + \mathbf{I}$ , gdzie  $\mathbf{I}$  jest macierzą jednostkową [3, 11, 12]. Liczba niezbędnych działań jest wtedy co najmniej sześciokrotnie niższa od potęgowania jej kwadratowej postaci; potęgowanie macierzy  $\mathbf{B}$  trwa dopóty, dopóki jej następna potęga jest równa poprzedniej. Obecnie niemal każdy problem, odniesiony nie tylko do wyznaczenia macierzy osiągalności, ale także jej wykorzystania, odbywa się z wykorzystaniem wyspecjalizowanych programów komputerowych, przedstawionych między innymi w pracach [13, 14].

Z punktu widzenia prowadzonych tu rozważań konieczne staje się przełożenie macierzy osiągalności dla potrzeb diagnostyki. Jeśli macierz ta jest opisem obiektu technicznego, wtedy jej poszczególnym kolumnom przypisuje się sprawdzenia — czynności mające na celu zbadanie zgodności sygnałów wyjściowych poszczególnych elementów ze wzorcami tychże sygnałów. Uznaje się, że jeśli którykolwiek z parametrów danego sygnału przekracza wartość dopuszczalną, wtedy wynik sprawdzenia jest negatywny. W przypadku przeciwnym — pozytywny. Obu tym wynikiom przypisuje się odpowiednio wartości logiczne  $\mathbf{1}$  i  $\mathbf{0}$ .

Zapis wyników wszystkich sprawdzeń, zgodnie z numeracją tych ostatnich, tworzy zerojedynkowy wektor wierszowy, którego rozkład zer i jedynek identyfikuje konkretny stan niezawodnościowy<sup>1</sup>. Jeśli rozkład ten jest zgodny z którymś z wierszy macierzy osiągalności, wtedy numer tego wiersza jest zgodny z numerem niezdatnego elementu. Brak tej zgodności może oznaczać:

- zdatność wszystkich elementów (wektor zawiera same zera),
- niezdatność więcej niż jednego elementu,

i ostatecznie

- fałsz jednego lub wielu wyników poszczególnych sprawdzeń [19].

Ostatnia z możliwości nie będzie tu brana pod uwagę; przyjmuje się stuprocentową wiarygodność sprawdzeń.

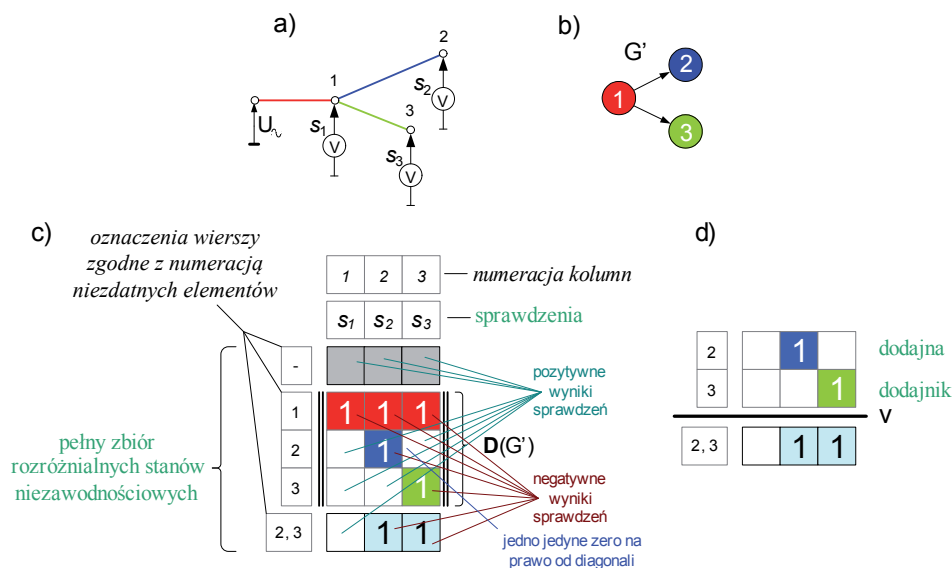
Dla analizowanego obiektu istnieje możliwość wykonania tylko trzech sprawdzeń:  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$ , polegających na stwierdzeniu obecności napięć w punktach: 1, 2 i 3 (patrz rys. 3a). Z diagnostycznego punktu widzenia rozkłady ich wyników będą odniesione do podgrafu  $G'$  (rys. 3a), digrafu  $G$  (rys. 3b). Należy podkreślić, że tylko ten podgraf opisuje tę część obiektu, w której istnieje praktyczna lokalizacja niezdatności jej elementów. Tu nie jest istotne, czy niezdatności te powstały wskutek ukierunkowanej inwazji par zagrożeniowo-ochronnych, czy też wskutek cech niezawodnościowych samych elementów. Istotna jest tylko diagnoza rzutująca na stosowne decyzje eksploatacyjne: podjęcia lub też zaniechania odnowy niezdatnych elementów.

<sup>1</sup> Stan niezawodnościowy — jeden ze stanów obiektu wynikający z określonej kombinacji stanów niezawodnościowych jego elementów; w pracy (z wyjątkiem obiektu jednowyjściowego) nie wprowadza się pojęć: „obiekt zdatny” i „obiekt niezdatny”.

W badaniach połączenia trzech przewodów pewną prawidłowością jest to, że:

- liczbie sprawdzeń odpowiada liczba pojedynczych niezdatności,
- jest tylko jeden stan wynikający ze zdatności wszystkich elementów,
- rozróżnia się tylko jeden stan wynikający z niezdatności wielu elementów — stan wynikający z niezdatności dwóch elementów określonych numeracją współrzędnych jednego jedynego zera występującego na prawo od diagonal (głównej przekątnej) macierzy  $D(G')$ .

Tę ostatnią kwestię przybliżają rysunki 3c i 3d. Na ostatnim z nich zilustrowano wynik sumowania wierszy o oznaczeniach współrzędnych rzeczzonego zera.



Rys. 3. Przykład przełożenia macierzy osiągalności dla potrzeb procesu diagnozowania: a) system jednoczesnej kontroli obecności napięć na wyjściach przewodów  $e_1, e_2$  i  $e_3$ ; b) model (podgraf  $G'$  digrafu  $G$  z rysunku 2b); c) wyznaczenie pełnego zbioru rozróżnialnych stanów niezawodnościowych; d) ilustracja wyznaczenia binarnej reprezentacji stanu niezawodnościowego dwóch elementów określonych numeracją współrzędnych zera występującego na prawo od diagonal

Liczba możliwych stanów równa jest 8, natomiast tych rozróżnialnych — tylko 5. Należy zauważyć, że niezdatność elementu  $e_1$  przesłania ewentualną niezdatność elementów:  $e_2$  i  $e_3$ . Brak napięcia na końcu pierwszego przewodu nie spowoduje jego obecności na końcach drugiego i trzeciego. Możliwość wykrycia ewentualnych przesłoniętych niezdatności może nastąpić dopiero z chwilą usunięcia niezdatności elementu  $e_1$ . Uwaga ta będzie obowiązywać dla dalszej części artykułu. Nie przewiduje się możliwości podłączenia napięcia zasilania do początków przewodów  $e_2$  i  $e_3$ . Zgodnie z przyjętymi założeniami, nie przewiduje się także niezdatności źródła zasilania.

Zadaniem kolejnego etapu badań jest określenie prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych rozróżnialnych stanów niezawodnościowych. Będą na nie rzutować charakterystyki niezawodnościowe poszczególnych elementów, zarówno tych rzeczywistych, jak i wirtualnych: par zagrożeniowo-ochronnych. Kluczem do zrozumienia istoty tego etapu jest poznanie istoty jedynek diagonali górnotrójkątnej macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$ . Warto zauważyć, że trud identyfikacji danego stanu ułatwia ustalenie pozycji pierwszej z lewej strony jedynki w wektorze wierszowym wszystkich wyników sprawdzeń (łącznie ze stwierdzeniem obecności ukierunkowanych inwazji). Pozycja ta jest zgodna z numerem ukierunkowanej inwazji lub numerem niezdatnego elementu. Dalej — jeśli wiersz macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$  o numerze tej pozycji ma rozkład zgodny z rozkładem tych wyników, to wskazana inwazja albo wskazany niezdatny element są jedynymi przyczynami owego rozkładu. Każda przyczyna (bez względu na swój charakter) oznaczana będzie znakiem  $X$  i — co zrozumiałe — identyfikowana swoją pozycją, czyli współrzędną pionową tego znaku w macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$ .

Wskazywanie drugich znaków  $X$  w wierszach oznaczających rozkłady zerojedynkowe dwóch rozróżnialnych przyczyn niezdatności wymaga zsumowywania wierszy określonych współrzędnymi zer znajdujących się na prawo od diagonali. Na rysunku 4a te wyszukane zera i uzyskane zsumowania oznaczono kolorem żółtym. Przykład zsumowania wierszy o oznaczeniach współrzędnych żółtego zera — oznaczonego literą „a” — przedstawiono na rysunku 5a.

Proces się powtarza, każdorazowo przyjmując inną kolorystykę oznaczeń. Zer, wskazujących możliwość wyznaczenia kolejnych rozróżnialnych przyczyn obiektu, należy poszukiwać na prawo od prawych skrajnych iksów. Każdorazowo współrzędna pozioma każdej dodanej jest uzupełniana współrzędną pionową dodajnika. Sumaryczną liczbę składników poszczególnych wierszy określa liczba znajdujących się w nim iksów. Przykład zsumowania wierszy wyznaczających rozkłady zerojedynkowe dla trzech i czterech rozróżnialnych przyczyn (oznaczonych na rysunku 4a kolorami: bordowym i turkusowym oraz literami „b” i „c”) przedstawiają rysunku 5b i 5c.

Przy sumowaniu wierszy, zależnie od wartości dodanej i dodajnika, obowiązują następujące alternatywy:

$$0 \vee X = X, \quad (11)$$

$$0 \vee 1 = 1, \quad (12)$$

$$0 \vee 0 = 0, \quad (13)$$

$$1 \vee 0 = 1, \quad (14)$$

$$1 \vee 1 = 1, \quad (15)$$

$$X \vee 0 = X. \quad (16)$$

Dla alternatywy obowiązuje prawo przemienności, jednakże dla podkreślenia różnicy między dodaną a dodajnikiem (w przyjętym porządku obliczeń) należy uprzedzić i jednocześnie podkreślić, że działania:



$$X \vee 1, \quad (17)$$

$$X \vee X, \quad (18)$$

$$1 \vee X \quad (19)$$

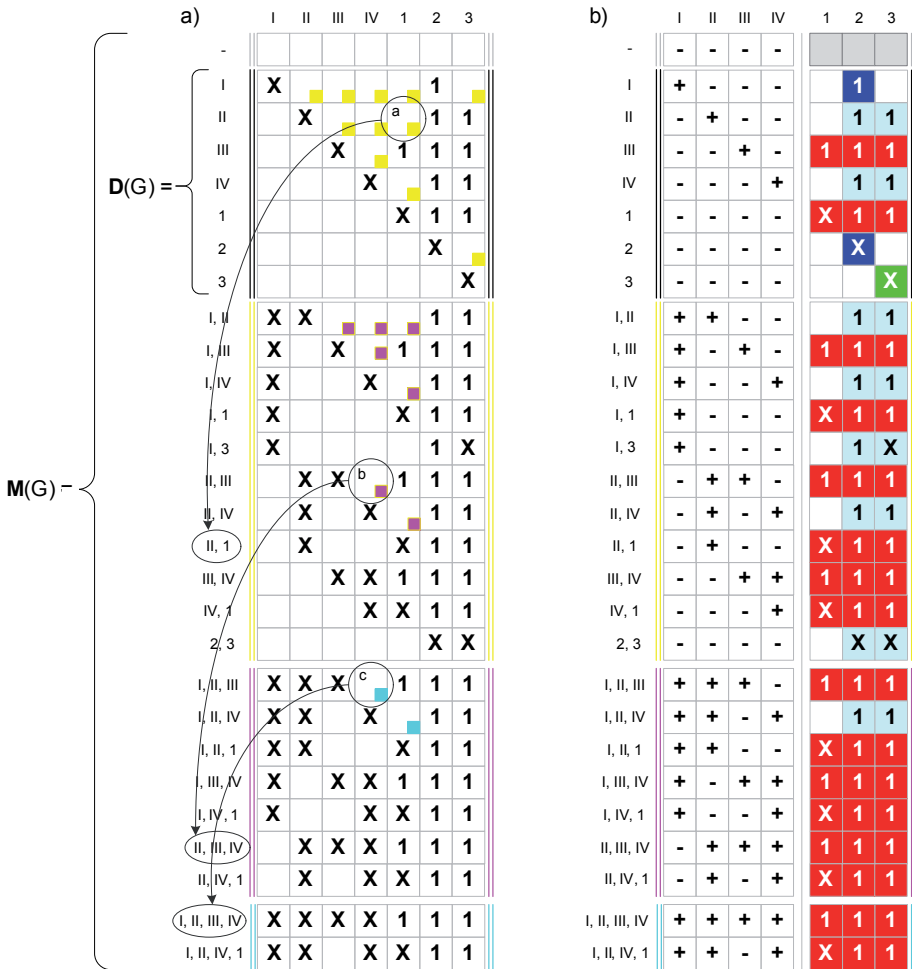
nie mogą wystąpić.

Proces zsumowań kończy się z chwilą, gdy wyczerpią się wszystkie zera znajdujące się na prawo od prawych skrajnych iksów. Wart zauważenia jest fakt, że każdy dodajnik jest jakimś wierszem macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$ . Ostatnią czynnością uzupełniającą jest dopisanie nad górnotrójkątną macierzą  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$  wiersza zawierającego same zera, symbolizującego brak jakichkolwiek przyczyn niezdatności elementów.

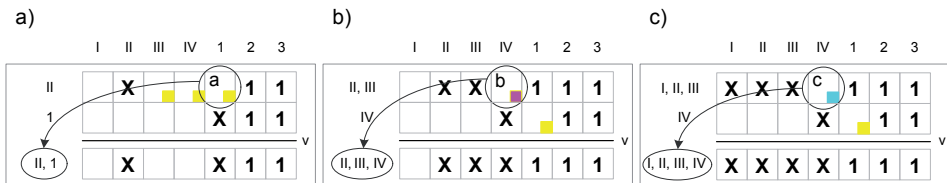
Tak powstaje macierz  $\mathbf{M}(\mathbf{G})$ , której wiersze wyznaczają niepowtarzalne zerojedynkowe sekwencje, przyporządkowane poszczególnym elementom pełnego zbioru rozróżnialnych stanów [5, 6]. Przypomina się, że występujące w zerojedynkowych sekwencjach iksy zastąpiły wcześniej jedynki diagonali macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$ . Aby przyczyny móc zakwalifikować do: inwazyjnych lub niezawodnościowych lub też inwazyjnych i niezawodnościowych jednocześnie, wskazany jest podział macierzy w taki sposób, jak to pokazano na rysunku 4b. Teraz w lewej części macierzy  $\mathbf{M}(\mathbf{G})$  iksy i puste pola zastąpiono odpowiednio plusami i minusami, natomiast w prawej podkolorowano rozróżnialne stany niezawodnościowe obiektu zgodne z kolorystyką zaproponowaną na rysunku 3c. To oznacza, że w dalszej kolejności będą badane tylko skutki wspomnianych przyczyn, a dokładniej — identyfikowane rozróżnialne stany niezawodnościowe samego obiektu. Wiadomo już (patrz rys. 3c), że tych stanów jest pięć: brak niezdatności (szarość), niezdatność  $e_1$  (czerwień), niezdatność  $e_2$  (niebieski), niezdatność  $e_3$  (zieleń), niezdatność  $e_2$  i  $e_3$  (pastelowy błękit). Przypisanie plusom, minusom, iksom, zerom i jedynkom odpowiednio wartości:  $1 - b_j$ ,  $b_j$ ,  $1 - p_k$ ,  $p_k$  i  $1$  pozwala na zautomatyzowane wyznaczenie prawdopodobieństw określonych na rysunku 6b. Zwraca się uwagę na zachowanie jedynkom ich własnych wartości. Poszczególne jedynki są symbolami przesłoniętych stanów niezawodnościowych elementów określonych współrzędnymi pionowymi tychże jedynek. Z racji owego przesłaniania — zgodnie z zależnością (6) — jedynki są też efektem sumowania stanów wzajemnie wykluczających się. Zgodnie z zależnościami (5) i (6) przypomina się, że  $1 - b_j$  i  $1 - p_k$  to wartości prawdopodobieństw wystąpienia inwazji „j” i niezdatności „k” elementu  $e_k$ .

Suma tak wyznaczanych prawdopodobieństw zawsze jest równa jedności. Ma to miejsce bez względu na digraf — liczebność jego wierzchołków i strukturę połączeń tychże. Ponadto prawdopodobieństwa, występujące w charakterze poszczególnych czynników, dla uzyskania wartości owej sumy mogą przyjmować dowolne wartości, o dowolnym charakterze swych zmian i dowolnej relacji względem siebie. W artykule wartości tych prawdopodobieństw przyjmują oczywiście wartości tylko i wyłącznie z przedziału  $\langle 0; 1 \rangle$ .

W następstwie zgrupowania wierszy (patrz rys. 6b), zgodnie z przypisanymi im skutkami (kolorami), wyznaczono prawdopodobieństwa wystąpienia tychże skutków:  $v_0, v_1, v_2, v_3$  i  $v_{2,3}$ .



Rys. 4. Ilustracja czynności przygotowawczych do wyznaczenia charakterystyk probabilistycznych elementów pełnego zbioru rozróżnialnych stanów inwazyjno-niezawodnościowych: a) algorytm wyznaczenia pełnego zbioru rozróżnialnych stanów inwazyjno-niezawodnościowych — wyznaczenia macierzy  $M(G)$ ; b) — podział macierzy  $M(G)$  na „część inwazyjną” i „część niezawodnościową” wraz z podkolorowaniem (w tej drugiej) rozróżnialnych stanów niezawodnościowych obiektu z godnie z ich kolorystyką zaproponowaną na rysunku 3c



Rys. 5. Ilustracja sumowania wierszy oznaczonych współrzędnymi zer określonych literami: a, b i c



Precyzja analiz wymaga użycia prawdopodobieństw:  $v_0, v_1, v_2, v_3$  i  $v_{2,3}$  określonych zależnością z rysunku 6c. Na wstępie warto zauważyć, że wzrost wartości każdej występującej w niej zmiennej zawsze przyczynia się do wzrostu prawdopodobieństwa  $v_0$  i spadku, jeśli nie wszystkich, to co najmniej jednego prawdopodobieństwa z prawdopodobieństw:  $v_1, v_2, v_3$  i  $v_{2,3}$  — prawdopodobieństw stanów zaindeksowanych podzbiorami zbioru rozróżnialnych niezdatności elementów. Prawdopodobieństwo  $v_0$  (bez względu na obiekt) kojarzy się z brakiem inwazji i z brakiem niezdatności elementów, przy czym wpływ tego pierwszego braku wyraża — w przypadku ogólnym — **kompleksowy współczynnik bezpieczeństwa**:

$$B = \prod_i b_i, \quad (20)$$

gdzie liczbę indeksów „i” limituje liczba par zagrożeniowo-ochronnych.

Znamienne jest, że wpływ współczynnika bezpieczeństwa  $B$  będzie tym mniejszy, im jego wartość — bliższa jedności.

Dla analizowanego obiektu wartość

$$B = b_I b_{II} b_{III} b_{IV}. \quad (21)$$

Jej obecność w prawdopodobieństwie  $v_0$  wyraża zależność:

$$v_0 = B p_1 p_2 p_3. \quad (22)$$

Analizę zmienności pozostałych prawdopodobieństw  $v$  można czynić różnymi metodami, z wykorzystaniem maszyn cyfrowych włącznie. Najrozsądniejszą metodą jest jednak zwykły ogląd struktury. Zgodnie z intuicją i uzyskanymi równaniami wartości  $v$ , najbardziej wpływowe okazują się elementy pierwszej warstwy — ukierunkowane inwazje par zagrożeniowo-ochronnych. Inwazja pary  $e_{III}$  eliminuje z użycia całe połączenie, par:  $e_{II}$  i  $e_{IV}$  — przewody:  $e_2$  i  $e_3$ , a pary  $e_I$  — przewód  $e_2$ . Przekładając to na bardzo wielkie systemy, spektakularnym przykładem może być zniszczenie niepozornego elementu radiolokatora pewnego zestawu przeciwlotniczego, po którym to zniszczeniu następuje wyeliminowanie z dalszego użytku czterech wyrzutni, a w konsekwencji dwunastu rakiet. Zniszczenie to może być efektem choćby celnego strzału karabinowego. Najbardziej prozaiczną przyczyną eliminacji niemal każdego obiektu jest odcięcie go od zasilania.

Poziome inwazjami, bardzo wpływowe zawsze będą charakterystyki niezawodnościowe elementów początkowych warstw samego obiektu (patrz: niezdatność elementu  $e_1$ ). W radiolokacji szczególną dbałością należy obdarzyć wzmacniacze bardzo wielkiej częstotliwości. Naturalnym zagrożeniem są dla nich szumy, których eliminacja znacząco rzutuje na poprawną pracę dalszych podzespołów:

układu przemiany częstotliwości, wzmacniacza pośredniej częstotliwości, dekodera (dyskryminatora), wzmacniacza wizyjnego i wskaźnika.

Artykuł odnosi się do zagadnień typowo technicznych, niemniej jednak wartość odnotowania jest też kluczowe znaczenie „elementów pierwszej warstwy” wszelkich struktur organizacyjnych [20].

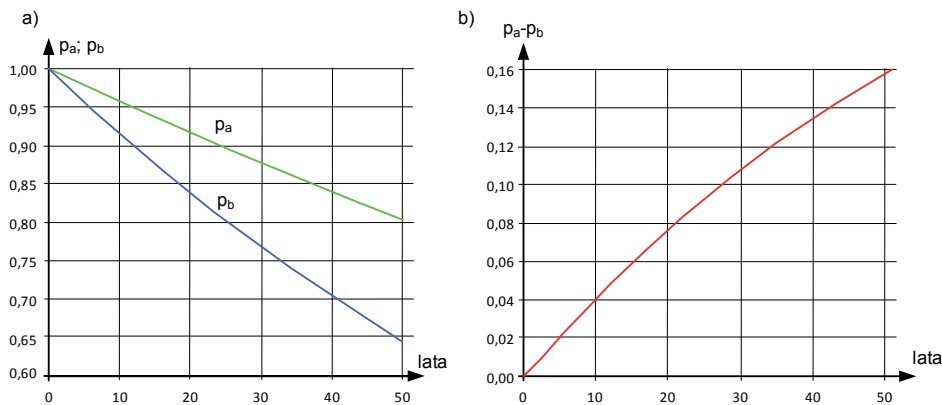
Częstą praktyką (choć czasami nieuprawnioną) jest ujednocnianie wartości prawdopodobieństw elementów. W metodach bayesowskich to ujednocnienie prowadzi do wyrażenia wartości prawdopodobieństw warunkowych odwrotnością liczebności tychże [21, s. 167]. Tu podejście jest diametralnie inne [6, ss. 180-181]. Efekt ujednocniania wartości prawdopodobieństw niezdatności (lub zdatności) poszczególnych elementów służy wyznaczeniu charakterystyk probabilistycznych poszczególnych rozróżnialnych stanów niezawodnościowych. Tylko szczególna struktura obiektu (digrafu) może się przyczynić do podobieństwa niektórych z nich. Choć ujednoczają się wartości tych prawdopodobieństw, nie zakłada się ich stałości w czasie. Mogą one przyjmować dowolne wartości z przedziału  $\langle 0; 1 \rangle$ .

Śród bardzo obszernego zbioru rozkładów zmiennych losowych najbardziej popularny i jednocześnie najprostszy w użyciu jest rozkład wykładniczy. Zgodnie z tym rozkładem prawdopodobieństwo zdatności elementu  $e_i$  określone jest zależnością:

$$p_i = \exp(-\lambda_i t), \tag{23}$$

gdzie:  $\lambda_i$  — intensywność uszkodzeń elementu  $e_i$ .

W literaturze przedmiotu podawana jest zwykle nominalna wielkość tej intensywności w wymiarze  $10^{-6}/h$ . Na rysunku 7a przedstawiono zmienności prawdopodobieństw zdatności  $p_a$  i  $p_b$  dla dwóch różnych elementów o intensywnościach

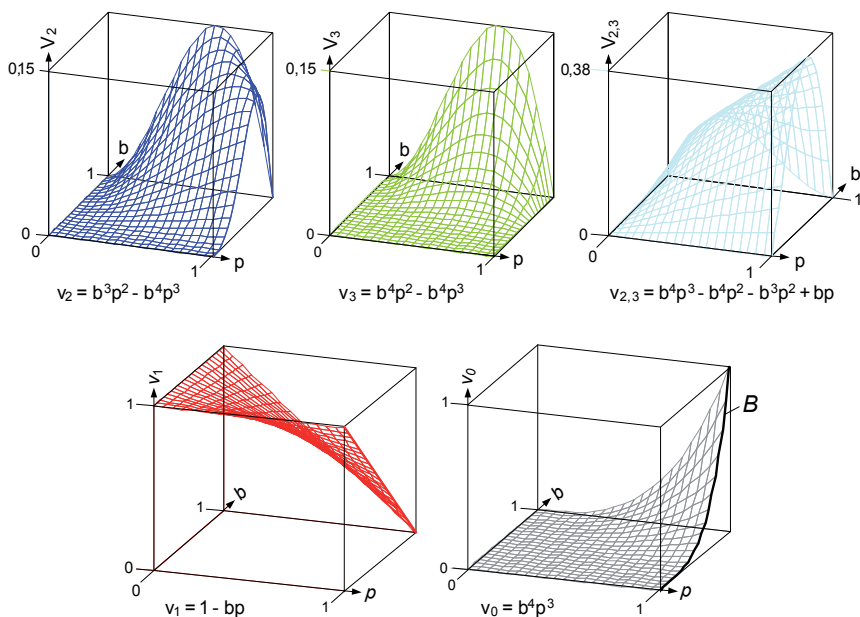


Rys. 7. Zmienność: a) prawdopodobieństw zdatności:  $p_a$  i  $p_b$  dla dwóch różnych elementów o intensywnościach uszkodzeń:  $\lambda_a = 0,5 \cdot 10^{-6}/h$  i  $\lambda_b = 2\lambda_a$ ; b) różnicy tychże prawdopodobieństw w funkcji upływu czasu

uszkodzeń:  $\lambda_a = 0,5 \cdot 10^{-6} 1/h$  i  $\lambda_b = 2\lambda_a$ . Istotna różnica tych prawdopodobieństw daje się zauważyć dopiero po upływie dekad. Ponadto trudno powiedzieć, czy będzie tu mowa o wartościach rzeczywistych — statystyka matematyczna daje jedynie możliwość wyznaczania estymatorów.

Poważnym asumptem do przyjęcia ujednoczonych wartości prawdopodobieństw jest znana od lat strategia **planowego postarzania** sprzętu [15], mająca na celu takie jego projektowanie, aby miał on ograniczony czas użytku. Po tym czasie sprzęt staje się niezdatny, przy czym jego odnowa — nieopłacalna. Tak zwykle się dzieje zaraz po upływie gwarancji.

Dla przykładowego obiektu badań nie będzie nadużyciem przyjęcie ujednoczonych prawdopodobieństw:  $b$  i  $p$ , tym bardziej że te drugie mogą dotyczyć trzech jednakowych przewodów, wprowadzonych do eksploatacji w tym samym czasie. Ewentualny błąd obliczeń będzie pomijalnie mały, a przeprowadzone dzięki temu analizy zyskają duży walor poznawczy. Na rysunku 8 zilustrowano zmienności poszczególnych składników zależności przedstawionej na rysunku 6d. Każdy składnik określony jest nie tylko stosownym oznaczeniem:  $v_0$  lub  $v_1$ , lub  $v_2$  lub  $v_3$ , lub  $v_{2,3}$ , ale i kolorem wykresu zgodnym z kolorem podkreślenia.



Rys. 8. Zmienności prawdopodobieństw wystąpienia rozróżnialnych stanów niezawodnościowych obiektu danego digrafem  $G$  (rys. 2b), przy ujednoczonych prawdopodobieństwach występowania zdatności i bezpieczeństwa, oznaczonych odpowiednio:  $p$  i  $b$

Tylko dwa wykresy osiąają pełną rozpiętość wartości:  $v_1$  i  $v_0$  — te określone odpowiednio kolorami: czerwonym i szarym. Pierwszy z wykresów osiąga wartość maksymalną dla wartości  $p$  i  $b$  równych zero, a drugi dla tych samych wartości — wartość minimalną. Z tego powodu pozostałe prawdopodobieństwa osiąają wartości znacznie niższe. Trzeba wiedzieć, że suma wszystkich pięciu rzędnych dla dowolnych wartości odciętych (dwóch dowolnych wartości  $p$  i  $b$ ) jest równa jedności. Jest oczywiste, że suma tych rzędnych dla wszystkich odciętych tworzy płaską płaszczyznę na poziomie jedności. Płaszczyzna ta (niezobrazowana osobnym wykresem) jest równoległościenna do podłoża.

Przy ujednoczonych wartościach prawdopodobieństw:  $b$  wartość kompleksowego współczynnika bezpieczeństwa wyraża zależność:

$$B = b^4, \quad (24)$$

którą zobrazowano zmiennością prawościenną „przyległości” szarego wykresu z rysunku 8. Podstawienie wielkości  $B$  (zal. 24) do prawdopodobieństw  $v$  z rysunku 8 modyfikuje niektóre z nich do następujących postaci:

$$v_2 = b^3 p^2 - B p^3, \quad (25)$$

$$v_3 = B(p^2 - p^3), \quad (26)$$

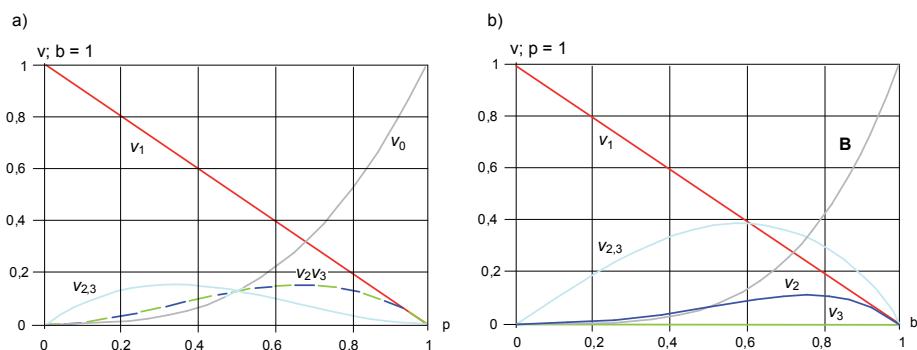
$$v_{2,3} = B(p^3 - p^2) - b^3 p^2 + bp, \quad (27)$$

$$v_0 = B p^3. \quad (28)$$

W myśl zależności (25-28) nie sposób powiedzieć, że bezpieczeństwem może być stan gwarantujący zdatność wszystkich elementów obiektu i obiektu jako takiego w szczególności. Tak można byłoby powiedzieć tylko w odniesieniu do pojedynczej pary zagrożeniowo-ochronnej i to jedynie w przypadku, kiedy para ta rzutowałaby na jego całość (patrz para  $e_{III}$  z rysunku 2b).

Na rysunku 6b także przedstawiono zmienność współczynnika  $B$ , tym razem jednak w zestawieniu z pozostałymi prawościennymi „przyległościami” z rysunku 8. Równania tych ostatnich (wraz przyporządkowaną im kolorystyką podkreśleń) stanowią składniki zależności przedstawionej na rysunku 6f. Analiza ich przebiegów może być dobrym asumptem do poprawy bezpieczeństwa newralgicznych części obiektu, w tym zwłaszcza poprawy ochron. Trzeba pamiętać, że większość obiektów technicznych zwykle nie traci swojej niezawodności wskutek normalnej eksploatacji, lecz wskutek jakichś nagłych wypadków. W przypadku rozpatrywanego obiektu szczególną uwagę należy zwrócić na bezpieczeństwo przewodu  $e_1$  (czerwona linia), gdyż jego praca w istotny sposób rzutuje na pracę przewodów  $e_2$  i  $e_3$  (rys. 2a). Podobną uwagę należałoby zwrócić dla przeciwstawnej analizy, przedstawionej na rysunku 6a,

a odniesionej do składników z rysunku 6e, będących „przyległościami” tylnych ścian prostopadłościanów z rysunku 8. Przebiegi te odnoszą się do naturalnych warunków eksploatacyjnych — zwyczajnych procesów starzeniowych. Wartości prawdopodobieństw  $p$  zdatności poszczególnych przewodów  $e$  mogą oprócz czasu eksploatacji zależeć od swych długości, przekrojów i materiałów, z jakich zostały wykonane.



Rys. 9. Przebiegi zmienności prawdopodobieństw  $v$  opisanych równaniami składników przedstawionych na rysunkach 4e i 4f; kolorystyka przebiegów koresponduje z kolorystyką podkreśleń

Na przeciwnym biegunie rozważań znajduje się analiza ryzyka, w której najważniejsze staje się szacowanie jego składowych, uwzględniających zmienności prawdopodobieństw  $v$  i stosownych do nich kosztów odnow. Analiza ta może stanowić miarodajne uzupełnienie analizy bezpieczeństwa.

### 3.2. Analiza ryzyka dla wybranego wariantu inwazji zagrożeń

Możliwość wystąpienia stanów inwazyjno-niezawodnościowych obiektu jest zwykle źródłem niepokoju jego właściciela. Może się to wiązać z potencjalnym kosztem serwisowania — ryzykiem  $R_S$  i niewykluczoną rekompensatą za czas tego serwisowania — ryzykiem  $R_R$ .

**Ryzyko serwisowania** określa zależność:

$$R_S = \sum_{E_{nz}} \left( v_{E_{nz}} \sum_m k_{m:e_m \in E_{nz}} \right), \quad (29)$$

gdzie:  $E_{nz}$  — podzbiór zbioru rozróżnialnych niezdatnych elementów obiektu;  
 $k_m$  — koszt odnowy elementu  $e_m$ .

Zależność (29), odniesiona do analizowanego obiektu, przyjmuje postać:

$$R_S = v_1 k_1 + v_2 k_2 + v_3 k_3 + v_{2,3} (k_2 + k_3), \quad (30)$$

gdzie:  $k_1$ ,  $k_2$  i  $k_3$  — koszty odnow przewodów:  $e_1$ ,  $e_2$ , i  $e_3$ .

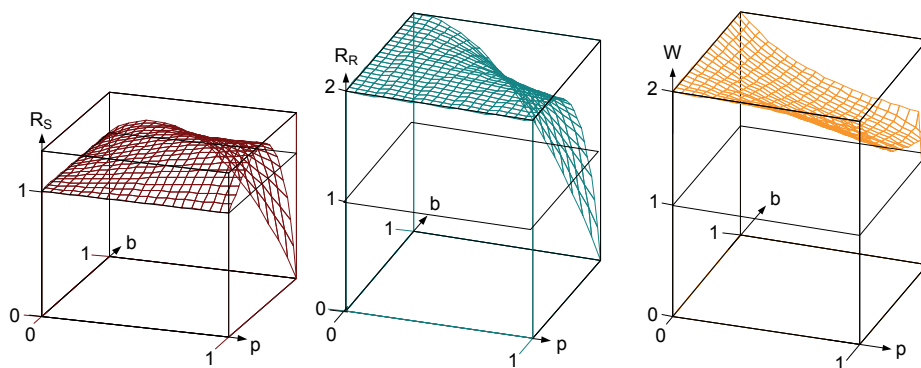


Ujednocając prawdopodobieństwa występowania zdatności i bezpieczeństwa, oznaczonych odpowiednio:  $p$  i  $b$ , oraz przyjmując, że

$$\forall i: k_i = 1, \tag{31}$$

$$R_S = 1 + bp - b^4p^2 - b^3p^2. \tag{32}$$

Zmienność tego ryzyka przedstawiono na rysunku 10. Z analizy wykresów przedstawionych na rysunku 8 można wnioskować, że dominujący wpływ na jego zmienność ma prawdopodobieństwo  $v_1$  odnoszące się do elementu  $e_1$ , tj. elementu rzutującego swą zdatnością na zdatność całego obiektu. Dopiero usunięcie jego ewentualnej niezdatności otwiera nie tylko możliwość usunięcia, ale przede wszystkim wykrycia pozostałych niezdatności. Tu odnowa przebiega wielokrotnie, bez potrzeby angażowania więcej niż jednego podmiotu tejże odnowy. Sytuacja przypomina trochę tę z samochodem bez paliwa, kierowcy i kluczyka czy też telewizora bez sygnału i napięcia sieci. „Wypiętrzanie” ryzyka  $R_S$  powyżej jedności występuje w przypadku jednoczesnego serwisowania elementów  $e_2$  i  $e_3$  — podwojenia kosztu naprawy. Zerowe ryzyko — zgodnie z intuicją — ma miejsce, gdy prawdopodobieństwa bezpieczeństwa i zdatności elementów są równe jedności, można rzec: stuprocentowe.



Rys. 10. Zmienności ryzyk: serwisowania  $R_S$  i rekompensaty  $R_R$  oraz wskaźnika  $W = R_R/R_S$  połączenia trzech przewodów przy jednakowych kosztach odnowy i odszkodowań równych jednej jednostce umownej;  $p$  i  $b$ : ujednoczone wartości prawdopodobieństw zdatności i bezpieczeństwa

**Ryzyko rekompensaty** za czas postoju obiektu określa potencjalne odszkodowanie za straty społeczne, techniczne, ekonomiczne itp., poniesione w sumarycznym czasie braku jego poszczególnych sygnałów wyjściowych — sygnałów czerpanych z jego wyjść użytkowych. Przyczyną braku któregośkolwiek z tych sygnałów jest niezdatność dowolnego elementu pracującego na rzecz jego wystąpienia. Jest nią także jakakolwiek inwazja skierowana na dowolny z tychże elementów. W sukces jej

matematycznego określenia przychodzą zamknięcia tranzytywne i antytranzytywne zawarte w macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$ :

$$R_R = \sum_{i: \bar{F}(e_i) = \{e_i\}} \left( 1 - \prod_{m: e_m \in \bar{F}(e_i)} b_m \prod_{k: e_k \in \bar{F}(e_i)} p_k \right) c_i, \quad (33)$$

gdzie:  $c_i$  — koszt rekompensaty za brak sygnału wyjściowego elementu  $e_i$  — elementu bez następników.

Odnosząc zależność (33) do digrafu z rysunku 2b, ryzyko rekompensaty:

$$R_R = (1 - b_I b_{II} b_{IV} p_1 p_2) c_2 + (1 - b_{II} b_{III} b_{IV} p_1 p_3) c_3. \quad (34)$$

Ujednociając prawdopodobieństwa występowania zdatności i bezpieczeństwa, oznaczonych odpowiednio:  $p$  i  $b$ , oraz przyjmując, że

$$\forall i: c_i = 1, \quad (35)$$

$$R_R = 2 - b^4 p^2 - b^3 p^2. \quad (36)$$

Zmiennosc tego ryzyka przedstawiono na rysunku 10.

Prowadzenie analiz w dziedzinie ryzyka  $R_S$  i ryzyka  $R_R$  może mieć bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia dwóch podmiotów gospodarczych: przedsiębiorstwa, będącego właścicielem obiektu, i serwisu — pracującego na jego rzecz. Z punktu widzenia utrzymania serwisu, koszty postoju mogą uzasadniać sens jego istnienia — jego „ważność” w negocjacjach z przedsiębiorstwem; mogą też być w tych negocjacjach kartą przetargową dla osiągnięcia wyższych kosztów utrzymania. Tę szczególną istotność, oznaczoną wskaźnikiem  $W$ , można określić następująco:

$$W = \frac{R_R}{R_S}. \quad (37)$$

W interesie przedsiębiorstwa jest utrzymanie wskaźnika  $W$  większego, a serwisu mniejszego od jedności. Jego zmienność dla analizowanego obiektu przedstawiono na rysunku 10. Uprzywilejowana pozycja serwisu zaznacza się dopiero przy  $b$  i  $p$  bliskich jedności.

Wiadomo, że prewencja jest tańsza od interwencji. Należy zauważyć, że każde prawdopodobieństwo  $p_i$  zależne jest przede wszystkim od czasu i od intensywności uszkodzeń elementów obiektu, które z kolei zależą od warunków pracy tychże. Nie bez znaczenia są zatem działania mające na celu poprawę tych warunków, chociażby drogą eliminacji brudu i kurzu. Wskazane stają się tu także wszelkie regeneracje,

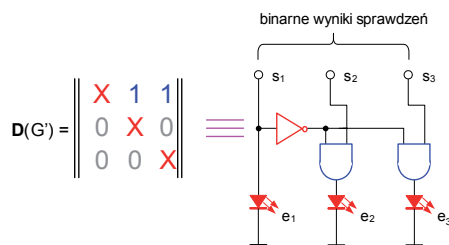
strojenia i regulacje. Wymienione czynności są elementami metodologii RCM (*Reliability Centered Maintenance*) [16].

Należy podkreślić, że ryczałt udzielany serwisowi — choć powinien zależeć głównie od wielkości  $R_S$  — może być wynegocjowany z uwzględnieniem wielkości  $R_R$ . O ile w interesie przedsiębiorstwa jest ukrycie lub zniżenie  $R_R$ , o tyle już w interesie serwisu — jego oszacowanie i wyolbrzymienie.

Ważnym czynnikiem pomniejszenia kosztów utrzymania serwisu jest działalność zmierzająca do osiągnięcia dużej niezawodności elementów (pomniejszenia prawdopodobieństw  $q$ ) i wysokiego standardu bezpieczeństwa — prawdopodobieństw  $b$  zmierzających do jedności. Tu należy zadać jednak pytanie: czy działalność tę powinien prowadzić serwis? Analiza sytuacji podpowiada, że konserwację i nadzór należałoby polecić raczej służbom wewnętrznym przedsiębiorstwa. Występuje tu wyraźny konflikt interesów!

#### 4. Podsumowanie

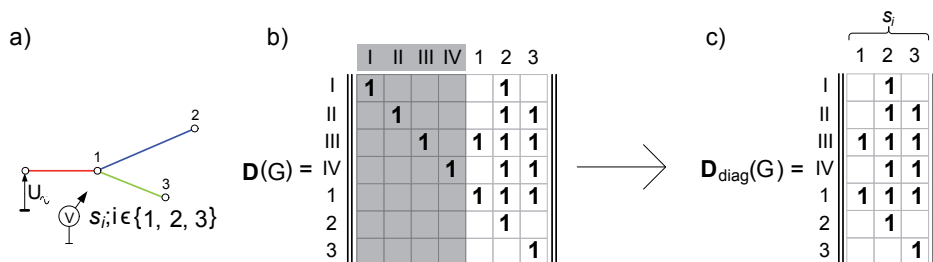
O bezpieczeństwie i ryzyku literatura przedmiotu mówi dość obszernie. Wielostronicowe bibliografie można znaleźć między innymi w [8]. Temat jest ciągle aktualny, a rzec można nawet, że aktualniejszy niż kiedykolwiek wcześniej. Niepewność jutra i brak poczucia bezpieczeństwa wymusza wszelkiego rodzaju działania asekuracyjne. Z drugiej zaś strony, chęć osiągnięcia szybkiego sukcesu i uzyskania przewagi prowadzi do powstawania coraz osobliwszych niebezpieczeństw. W tym kontekście tworzą się pary zagrożeniowo-ochronne, których właściwości w ujęciu probabilistycznym stały się przedmiotem rozważań niniejszej pracy. **Oryginalność** zaproponowanej metody zasadza się na analizie pełnego zbioru rozróżnialnych stanów niezawodnościowych, odległej od teorii Bayesa i założenia o szeregowej strukturze niezawodnościowej obiektu [9]. Pojawiła się w ten sposób możliwość wyeliminowania wielu potencjalnych błędów i niejednoznaczności. Wyniki analiz stały się rzetelniejsze. Przywołany przymiot jest szczególnie istotny w diagnostyce, której rozstrzygnięcia są przecież podstawą każdej decyzji. Skomplikowane z pozoru przekształcenia, przedstawione rysunkach 4, 5 i 6, nie mają w niej miejsca. Zasadniczo wyróżnia się dwa rodzaje programów diagnozowania: *stałe* i *warunkowe*. O pierwszych była już mowa podczas przekładania macierzy osiągalności dla potrzeb procesu diagnozowania (patrz rys. 3). Ich realizacja wydaje się bardzo prosta z racji zamysłu, jednakże z racji kosztów — już niekoniecznie. Dla  $n$  sprawdzeń wymaganych jest  $n$  zespołów pomiarowo-kontrolnych. Na rysunku 11 przedstawiono ideę detekcji informacji diagnostycznej w tym programie, w bezpośrednim przełożeniu górnotrójkątnej macierzy osiągalności podgrafu (patrz rys. 3b). Napięcia na poziomie *jedyńki logicznej* wyrażają negatywne, natomiast te na poziomie *zera logicznego* — pozytywne wyniki sprawdzeń.



Rys. 11. Dekoder informacji diagnostycznej trzech przewodów (rys. 3a) w projekcji binarnej macierzy  $D(G')$  (rys. 3c)

O prawdziwym kunszcie diagnozowania obiektu przesądza jednak tylko efektywne wykorzystanie wyników sprawdzeń wykonywanych w optymalnej kolejności z udziałem jednego podmiotu kontrolno-pomiarowego, tak jak to pokazano na rysunku 12a. Można także powiedzieć, że diagnozowanie to powinno być tak zaprogramowane, aby przy jego manualnej realizacji zagwarantować wykonawcy minimalny wysiłek. Obecnie, przy masowym zastępowaniu wykonawcy komputerem, często nie dostrzega się tego aspektu. Prawdopodobnie sądzi się, że komputer się przecież nie męczy i może wykonać wszystkie te sprawdzenia, nie zważając na jakąkolwiek ich kolejność. Niestety, bliższa analiza tego zjawiska wykazała, że często prowadzi to do znacznego spadku wiarygodności diagnozy i na dodatek — wykonania sprawdzeń w liczbie poważnie przekraczającej niezbędne minimum. Warto zauważyć, że diagnozowanie może skończyć się przecież już po jednym sprawdzeniu. O takim stanie rzeczy decyduje jednak struktura połączeń elementów. Oczekiwana liczba sprawdzeń  $K_i$  powinna zmierzać do wielkości równej binarnemu logarytmowi liczby rozróżnialnych stanów niezawodnościowych obiektu.

Sekret efektywnego wykorzystania wyników sprawdzeń tkwi w realizacji **pełnego warunkowego programu diagnozowania**, któremu dedykowano nic innego jak właśnie bezpośrednie wykorzystanie macierzy osiągalności [18]. Diagnozowanie to należy do najbardziej naturalnych metod pozyskiwania wiedzy o stanie



Rys. 12. Ilustracja jednopodmiotowego diagnozowania połączenia trzech przewodów (rys. a) wraz prezentacją selekcji informacji diagnostycznej zawartej w macierzy przedstawionej na rysunku 2d (rys. b, c)

niezawodnościowym obiekcie. Nie ma w nim podziału na rozpoznanie i lokalizowanie niezdatności. Nieistotne są także rozważania na temat niezdatności pojedynczych i mnogich. Ważna jest natomiast analiza właściwości pełnego zbioru rozróżnialnych stanów niezawodnościowych wraz z właściwościami probabilistycznymi jego poszczególnych elementów z parami zagrożeniowo-ochronnymi włącznie. Wziąwszy pod uwagę ten ostatni szczegół i realną możliwość wykonania sprawdzeń, punktem wyjścia jest wyselekcjonowanie z macierzy  $\mathbf{D}(\mathbf{G})$  (rys. 2c) podmacierzy  $\mathbf{D}_{\text{diag}}(\mathbf{G})$  (rys. 12c).

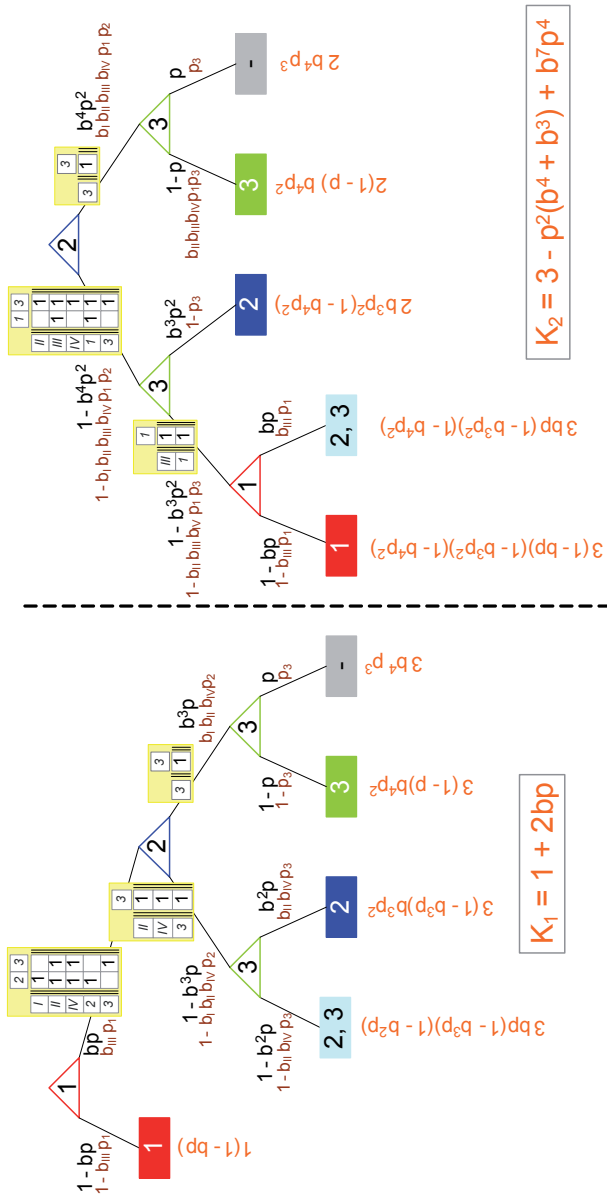
Konsekwencją wykonania dowolnego sprawdzenia jest eliminacja jakiejś części obiektu z dalszych badań — elementów, które znajdują się „przed” lub „za” sprawdzeniem, jeśli ma ono odpowiednio: pozytywny lub negatywny wynik. Przypomina się, że z matematycznego punktu widzenia są to elementy zbiorów określonych nazwami zamknięć: antytranzytywnego i tranzytywnego. Warunkowy program diagnozowania kończy się z chwilą braku wyboru następnego sprawdzenia. Akt eliminacji jest aktem redukcji wymiaru macierzy  $\mathbf{D}_{\text{diag}}(\mathbf{G})$  (rys. 12c).

Na rysunku 13 przedstawiono dwa pełne warunkowe programy diagnozowania, z których pierwszy rozpoczyna sprawdzanie obecności napięcia na wyjściu przewodu pierwszego, natomiast drugi — na wyjściu przewodu drugiego. Sprawdzenia zobrazowano trójkątami, a ich wyniki gałęziami wychodzącymi z tych trójkątów. Każda lewa gałąź oznacza wynik negatywny, natomiast prawa pozytywny. Tuż przy gałęziach zamieszczono prawdopodobieństwa uzyskania stosownych wyników. Dokonano tego z ujednoczeniem i bez ujednoczenia prawdopodobieństw  $b$  i  $p$ . Wartości tak wyrażonych prawdopodobieństw zróżnicowano kolorami i wielkością czcionek. Prawdopodobieństwo uzyskania pozytywnego wyniku jest iloczynem prawdopodobieństw  $b$  i  $p$  elementów objętych danym sprawdzeniem. Suma prawdopodobieństw zamieszczonych obok gałęzi wychodzących z danego trójkąta zawsze jest równa jedności. Tam, gdzie była możliwa dalsza klasyfikacja, przedstawiono stosowne redukcje wymiaru macierzy zaprezentowanej na rysunku 12c. Diagnozy wyrażone prostokątami wyznaczono z wykorzystaniem następującej zależności:

$$\mathbf{E}_{\text{nz}} = \bigcup_{i:s_i=1} \{e_i\} \setminus \bigcup_{i:s_i=1} \{\hat{\mathbf{F}}(e_i) \setminus \{e_i\}\}, \quad (38)$$

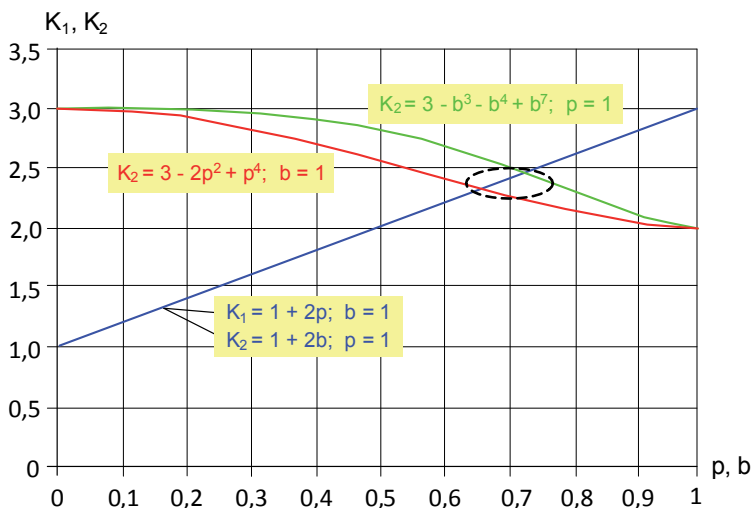
gdzie:  $s_i = 1$  — negatywny wynik sprawdzenia sygnału na wyjściu elementu  $e_i$ .

Warto przypomnieć, że tak wyrażone pojęcie diagnozy jest znaczeniowo zbliżone do określenia zawartego w zależności (29). Tuż pod prostokątami zamieszczono iloczyny ujednoczonych prawdopodobieństw, umieszczonych obok gałęzi prowadzących do tych prostokątów. Dodatkowymi czynnikami w tych iloczynach są liczby gałęzi. Sumy tak wyznaczonych iloczynów wyznaczają średnie liczby sprawdzeń, określone wartościami  $K_1$  i  $K_2$ .



Rys. 13. Pełne warunkowe programy diagnozowania połączenia trzech przewodów z rysunku 12a, dla dwóch różnych ich początków; bliższy komentarz w tekście

Analiza porównawcza wartości  $K_1$  i  $K_2$  (patrz rys. 14) pozwala wskazać prymat jednego programu nad drugim. Przybliżone szacunki wskazują zbliżenie średniej liczebności ich sprawdzeń dla wartości  $p$  i  $b$  bliskich 0,7 (patrz zakreslenie), co oznacza, że poniżej nich należałoby stosować pierwszy z programów, natomiast powyżej — drugi.



Rys. 14. Zależność średnich liczebności sprawdzeń  $K_1$  i  $K_2$  z rysunku 13 od wartości prawdopodobieństw  $p$  i  $b$

Dokładna analiza (zmierząca do wyznaczenia programu optymalnego) znacznie musiałaby przekroczyć ramy niniejszego artykułu. Proponuje się w tym zakresie lekturę pozycji [17], gdzie (dla odmiany) przedmiotem analiz jest szeregowo połączenie czterech przewodów.

Pary zagrożeniowo-ochronne często stają się naturalnym łącznikiem między elementami, które z pozoru nie mają jakichkolwiek związków ze sobą. Można tu powołać się choćby na zadania stawiane przed wszelkimi służbami. Do najbardziej spektakularnych można zaliczyć ochronę społeczeństwa przed epidemią, zbrojną napaścią, czy też — jakąś klęską żywiołową. W skali mikro każdy budynek jest potencjalnym schronieniem dla przebywających w nim osób i zwierząt; każda obudowa — ochroną dla zgromadzonych w niej przedmiotów.

Z uwagi na inwazyjność pary zagrożeniowo-ochronnej można spojrzeć na bezpieczeństwo także z zupełnie innego punktu widzenia — tworzenia ewentualnych zagrożeń dla obiektów agresji. Czyżby nie mówiło się: *Si vis pacem, para bellum* i że najlepszą obroną jest atak? Świat dostrzega tę prawdę od tysięcy lat — na każdą tarczę znajduje miecz, a na miecz — tarczę.

Artykuł wpłynął do redakcji 11 października 2010 r. Pierwsza recenzja dostarczona została 18 września 2013 r. Poprawioną wersję po pierwszej recenzji dostarczono do redakcji 11 października 2013 r. Druga recenzja wpłynęła 24 marca 2014 r. Poprawioną wersję po drugiej recenzji otrzymano 24 kwietnia 2014 r. Zweryfikowaną wersję po trzeciej recenzji otrzymano 1 grudnia 2014 r.

Źródło finansowania: środki własne autora.

#### LITERATURA

- [1] PETERS O.H., MEYNA A., *Handbuch der Sicherheitstechnik Band 1: Sicherheit technischer Anlagen, Komponenten und Systeme. Sicherheitsanalyseverfahren*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1985.
- [2] MEYNA A., *Einführung In die Sicherheitstheorie. Sicherheitstechnische Analyseverfahren*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1982.
- [3] KORZAN B., *Elementy teorii grafów i sieci, Metody i zastosowania*, WNT, Warszawa, 1978.
- [4] SOLOV'EV B.G., *Topologičeskââ diagnostičeskââ model' obektov s bločnoj strukturoj*, Sb. Diagnostika i identifikaciâ, Zinatne, Riga, 1974, 26-33.
- [5] SZCZEPAŃSKI P., *Określanie i zastosowanie prawdopodobieństw występowania rozróżnialnych stanów wadliwego funkcjonowania obiektu*, Biul. WAT, 8, 2001, 25-40.
- [6] SZCZEPAŃSKI P., *Entropia struktury obiektu w ujęciu addytywnym*, Biul. WAT, 58, 3, 2009, 169-192.
- [8] PIHOWICZ W., *Inżynieria bezpieczeństwa technicznego. Problematyka podstawowa*, WNT, Warszawa, 2008.
- [9] SZCZEPAŃSKI P., *Erroneous use of Bayes' theorem in technical diagnostic*, Diagnostyka — diagnostics and structural health monitoring, 1(57), 2011, 47-54.
- [10] IDZIASZEK Z., *Bezpieczeństwo, niezawodność, trwałość wyposażenia obiektów technicznych w systemach logistycznych*, Zagadnienia gospodarowania nieruchomościami, Zeszyt 7, WSGN, Warszawa, 2013, 95-104.
- [11] SZCZEPAŃSKI P., *Propozycja metody lokalizacji uszkodzeń wielokrotnych w złożonych obiektach technicznych*, Biul. WAT, 7, 1985, 93-101.
- [12] DUDZIŃSKI J.M., SZCZEPAŃSKI P., *Diagnostowanie złożonych obiektów technicznych z uszkodzeniami wielokrotnymi*, WAT, Warszawa, 1990.
- [13] 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, 81-86.
- [14] FEDYNA K., MACHEJ I., SZCZEPAŃSKI P., *Komputerowe stanowisko analizy i syntezy diagnostycznej złożonych obiektów technicznych, instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego*, WAT, Warszawa, 1993.
- [15] BULOW J., *An Economic Theory of Planned Obsolescence*, *Quarterly Journal of Economics*, 101, 4, 1986, 729-749.
- [16] PIETRZYK A., UHL T., *Optymalizacja eksploatacji maszyn i urządzeń*, Diagnostyka, 26, 2002, 29-36.
- [17] SZCZEPAŃSKI P., *Dynamic programming of full conditional program for diagnosing*, Diagnostyka — Applied structural health, usage and condition monitoring, 3(63), 2012, 55-58.
- [18] SZCZEPAŃSKI P., *Opracowanie pełnego programu diagnostowania sygnalizatora poziomu napięcia*, Konferencja Naukowo-Techniczna AUTOMATION'2006 nt.: Automatyzacja — nowości i perspektywy, Warszawa, 22-24 marca 2006, 516-526.



- [19] SZCZEPAŃSKI P., *Wiarygodność diagnozy*, *Pomiary–Automatyka–Robotyka (PAR)*, 2, 2007 (CD).
- [20] SZCZEPAŃSKI P., PŁACZEK J., *Entropia struktur organizacyjnych przedsiębiorstw*, *Ekonomika i organizacja przedsiębiorstw*, 3, 2012, 3-17.
- [21] GRABSKI F., JAŻWIŃSKI J., *Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*, WKiŁ, Warszawa, 2001, 167.

P. SZCZEPAŃSKI

### **Threat protection pair as a parameter of object security and risk assessment**

**Abstract.** The paper presents a concept of threat protection pairs as virtual elements of a structure of an object, to indicate its potential capacity to safeguard against specific risks. Neutrality of the pair occurs in a situation of full calm or full protection against the threat assigned to this situation. Degrees of the neutrality violation (defined by the probabilities) are the inputs to determine: the object security and the risk of servicing and risk of compensation for the downtime. It can be noted that the results of the work may be used for many other issues, e.g. to optimize the full conditional programs for diagnosing.

**Keywords:** threat protection pair, security, risk of servicing, risk of compensation for the downtime, diagnostics program, invasion, fault

