Jerzy FELIKS*, Katarzyna MAJEWSKA*

WYKORZYSTANIE FUNKCJI KOSZTÓW METTASA DO ALOKACJA NIEUSZKADZALNOŚCI W SYSTEMACH LOGISTYCZNYCH

Streszczenie

Artykuł dotyczy zagadnienia alokacji nieuszkadzalności w systemach logistycznych w oparciu o funkcję kosztów Mettasa. Przedstawiono problem optymalizacji nieliniowej w postaci minimalizacji wykładniczej funkcji kosztów zależnej od nieuszkadzalności komponentów systemu przy ograniczeniach nałożonych na nieuszkadzalność systemu i poszczególnych jego elementów. Pokazano zastosowanie omówionego modelu do alokacji nieuszkadzalności w przykładowym systemie logistycznym. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie BlockSim firmy ReliaSoft, które ma zaimplementowaną opisaną metodę optymalizacji. Porównano także wyniki alokacji nieuszkadzalności z odpowiadającą jej alokacją redundancji, która jest dodatkowym wynikiem zastosowania optymalizacji niezawodności w programie.

Słowa kluczowe: alokacja nieuszkadzalności, niezawodność systemów, system logistyczny, optymalizacja niezawodności, funkcja kosztów Mettasa

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach niezawodność systemów cieszy się coraz większym zainteresowaniem, głownie ze względu na wzrost zaawansowania technologicznego procesów oraz rosnący poziom skomplikowania systemów inżynieryjnych.

Problem alokacji jest jednym z podstawowych problemów niezawodnościowych [3], [4], [5], [6]. W podstawowej formie polega on na wyznaczeniu, w oparciu o funkcję kosztów, wartości nieuszkadzalności poszczególnych komponentów systemu tak, aby uzyskać pożądana wartość nieuszkadzalności całego systemu. Z problemem alokacji mamy do czynienia głównie na etapie projektowania, ale również na etapie eksploatacji. Rozwiązanie problemu można uzyskać przy pomocy programowania nieliniowego, dokonując minimalizacji funkcji kosztów będącej funkcją nieuszkadzalności elementów systemu z ograniczeniami nałożonymi na te nieuszkadzalności, jak również na nieuszkadzalność systemu [8], [11].

Jakakolwiek próba polepszenia niezawodności systemu powoduje konieczność włożenie nakładów finansowych, organizacyjnych, itp. i generalnie powinno się inwestować w poprawę elementów najbardziej istotnych oraz najmniej kosztownych. Należy również dokonać wyboru między redundancją fizyczną a zastosowaniem lepszego komponentu. Przy nadmiarowości fizycznej elementów trzeba pamiętać, że wraz ze wzrostem niezawodności systemu dochodzi także do zmiany struktury i wzrostu jej złożoności. Przy optymalnej alokacji nieuszkadzalności ryzykujemy tylko wzrost kosztów.

Znane metody alokacji nieuszkadzalności, takie jak np. równego przydziału, AGREE, ARINC stosuje się z założeniami wykładniczego czasu zdatności oraz struktury szeregowej systemu. W przypadku systemów złożonych, o czasach zdatności podlegających innym niż wykładniczy rozkładom, zasadne jest stosowanie metod opartych na funkcji kosztów. Metody te jeszcze do niedawna nie były szeroko stosowane przez inżynierów niezawodności ze względu na brak ich implementacji komputerowych oraz konieczność określenia

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania

analitycznych formuł na nieuszkadzalność systemu i koszty, jako funkcji nieuszkadzalności elementów. Istnieje wiele miar stosowanych w alokacji nieuszkadzalności [6], [12], [13], różnią się one jednak liczbą i znaczeniem stosowanych parametrów i często zdarza się, że informacje na temat tych parametrów nie są dostępne. W artykule przybliżona zostanie jedna z miar, posiadającą parametr mówiący o stopniu trudności poprawy nieuszkadzalności elementu, tj. funkcja Mettasa [8]. Funkcja została zaimplementowana w oprogramowaniu BlockSim firmy ReliaSoft [10], które daje również możliwość wyznaczania analitycznych formuł na nieuszkadzalność systemów prostych oraz złożonych. Cechą oprogramowania jest łatwość obsługi, elastyczność, szybkość obliczeń oraz możliwość zastosowania różnych rozkładów dla czasów zdatności. Powyższe cechy powodują, że jest ono narzędziem chętnie wykorzystywanym przez inżynierów niezawodności na całym świecie.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU OPTYMALIZACJI

W zadaniu optymalizacji przyjęto następujące założenia:

a) możemy określić w sposób analityczny formułę na nieuszkadzalność systemu,
b) elementy systemu są niezależne, tj. uszkodzenie jednego elementu nie powoduje uszkodzenia innego elementu,
c) system i elementy są dwustanowe (zdatny - niezdatny),
d) koszt całkowity równy jest sumie kosztów dla poszczególnych elementów.

Zadanie polega na zagwarantowaniu odpowiedniej wartości nieuszkadzalności systemu, minimalizując przy tym funkcję kosztów, poprzez alokację nieuszkadzalności do wszystkich lub wybranych elementów systemu. Zadanie możemy zapisać jako problem minimalizacji [4], [5], [7], [8]:

$$\min C = \sum_{i=1}^{n} C_i(R_i)\,, \tag{1}$$

przy czym C oznacza koszt całkowity dla systemu, $c_i(R_i)$ oznacza koszt dla komponentu i, R_i oznacza nieuszkadzalność komponentu i, a n oznacza liczbę elementów podlegających optymalizacji. Ograniczenia nakładamy na nieuszkadzalność systemu oraz nieuszkadzalności komponentów:

$$R_s \geq R_z\,, \tag{2}$$

przy czym R_s oznacza nieuszkadzalność systemu, a R_z oznacza pożądaną wartość nieuszkadzalności systemu.

$$R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max}\,,\ i = 1, 2, \ldots, n, \tag{3}$$

przy czym R_{imin} oznacza minimalną, czyli w chwili rozpoczęcia procesu modernizacji, wartość nieuszkadzalności komponentu i, natomiast R_{imax} maksymalną osiągalną wartość nieuszkadzalności komponentu i. R_{imax} zależy głównie od ograniczeń technologicznych.

Zadaniem alternatywnym może być maksymalizacja nieuszkadzalności systemu R_s ($\max R_s = f(R_i)$), przy ograniczeniach kosztów ($C \leq C_z$) oraz nieuszkadzalności elementów ($R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max}$, $i = 1, 2, ..., n$) [5], [7], [12].

Rozwiązanie problemu optymalizacji przebiega w kilku krokach. W pierwszym kroku należy uzyskać formułę na nieuszkadzalność systemu jako funkcję nieuszkadzalności elementów, np. na podstawie schematu blokowego niezawodności [3] lub z wykorzystaniem programu komputerowego [10]. Drugi krok to określenie funkcji kosztów dla poszczególnych elementów. Funkcja kosztów Mettasa przyjmuje postać wykładniczą [8], [11]:

$$C_i(R_i; f_i, R_{i,\min}, R_{i,\max}) = \exp\left[(1 - f_i)\frac{R_i - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i}\right], \tag{4}$$

przy czym $f_i \in (0,1)$ i oznacza łatwość podniesienia nieuszkadzalności komponentu i, a R_i jest wyjściową wartością nieuszkadzalności dla konkretnego czasu. Funkcja c_i spełnia następujące warunki [8]:

a) jest monotonicznie rosnąca,
b) koszt dla dużych R_i jest bardzo duży,
c) koszt dla małych R_i jest bardzo mały,
d) pochodna c_i jest monotonicznie rosnąca.

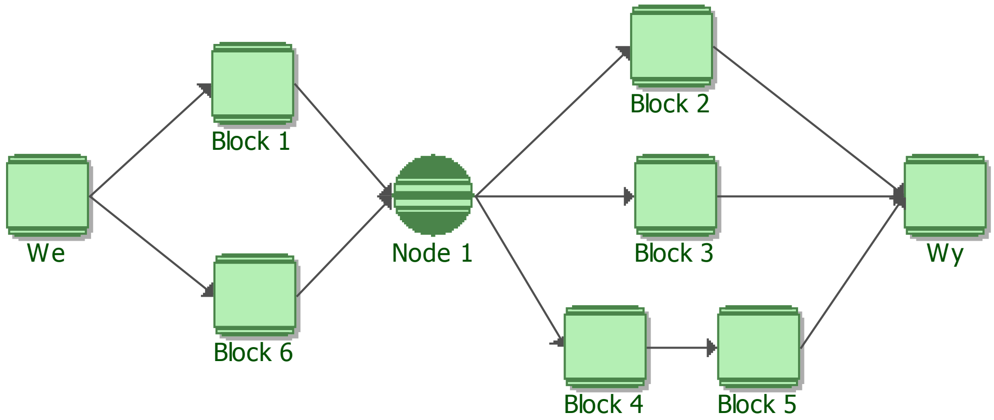
Współczynnik f_i zależy m. in. od trudności dostępu do elementu, jego złożoności, nakładów finansowych i ograniczeń technologicznych. Powinien być wyznaczany na podstawie wiedzy ekspertów oraz w odniesieniu do innych komponentów, a jego określenie może nie być łatwe. Jest on współczynnikiem skali i im jest większy, tym koszt zwiększenia nieuszkadzalności jest mniejszy.

Powyżej zdefiniowany problem został zaimplementowany w oprogramowaniu BlockSim firmy ReliaSoft [10], [11]. Funkcja Mettasa jest domyślną funkcją kosztów, jednak oprogramowanie BlockSim umożliwia wprowadzenie innych formuł zamiast funkcji (4).

3. MODEL PRZYKŁADOWEGO SYSTEMU LOGISTYCZNEGO

Przez system logistyczny należy rozumieć zespół czynności związanych z celowym przemieszczaniem i rozmieszczaniem w czasie i przestrzeni ładunków i związanych z nimi informacji [9]. Czynności te są realizowane z wykorzystaniem zasobów zarówno sprzętowych, jak i ludzkich. Ocena niezawodności wykonania zadania złożonego z wielu czynności jest określona spełnieniem wielu kryteriów, niekoniecznie technicznych, ale także organizacyjnych, czy związanych z zadowoleniem klienta i jest często bardziej złożona niż ocena niezawodności systemów technicznych.

W omawianym systemie logistyki zaopatrzenia wyszczególniono czynności związane z przygotowaniem zamówienia oraz jego realizacją. Uproszczony schemat blokowy systemu (o strukturze mieszanej) przedstawia rysunek 1. Bloki 1 i 6 reprezentują podsystem przygotowania zamówienia, natomiast bloki od 2 do 5 podsystem realizujący zamówienie.



Rys. 1 Schemat blokowy niezawodności przykładowego systemu logistycznego

Funkcję nieuszkadzalności badanego systemu wyznaczoną w oparciu o RBD wyraża formuła:

$$R_s = (R_1 + R_6 - R_1R_6)(R_2 + R_3 - R_2R_3 + R_4R_5 + R_2R_3R_4R_5 - R_2R_4R_5 - R_3R_4R_5) \qquad (5)$$

gdzie $R_i = R_i(t)$, dla $i = s, 1, ..., 6$. Dla dalszej analizy założono t równe 500 jednostek czasu działania (np. godzin, dni, cykli pracy, …).
Przyjęte rozkłady czasu zdatności dla elementów systemu przedstawione są w tabeli 1. Wartości nieuszkadzalności dla poszczególnych elementów i całego systemu zawiera tabela 2.

Tabela 1 Przyjęte parametry rozkładów czasów działania elementów badanego systemu.

Element	Rozkład czasu zdatności
Blok 1	Exponential m=1000
Blok 2	Weibull b=3 a=1000
Blok 3	Weibull b=1,5 a=1000
Blok 4	Weibull b=2 a=1000
Blok 5	Weibull b=3 a=1000
Blok 6	Exponential m=1000

Tabela 2 Wartości nieuszkadzalności R dla t = 500 jednostek czasu działania

Element	Ri [%]
Blok 1	60,7
Blok 2	88,3
Blok 3	70,2
Blok 4	77,9
Blok 5	88,3
Blok 6	60,7
System	83,6

4. ZADANIE ALOKACJI DLA BADANEGO SYSTEMU

Zadanie polega na alokacji nieuszkadzalności w taki sposób, aby nieuszkadzalność systemu dla t = 500 jednostek czasu wzrosła z 83,6% do 95%. Przeanalizowane zostaną następujące przypadki:

e) wszystkie elementy podlegają optymalizacji i mają taki sam współczynnik fi = 0,5 (co oznacza, że poprawienie nieuszkadzalności komponentu jest zadaniem średnio trudnym)
f) wszystkie elementy systemu podlegają optymalizacji, ale mają różne współczynniki f_i : $f_1 = 0,3$, $f_2 = 0,9$, $f_3 = 0,8$, $f_4 = 0,7$, $f_5 = 0,9$, $f_6 = 0,3$ (zmiana nieuszkadzalności dla elementów 1 i 6 jest najbardziej kosztowna).
g) optymalizacji podlegają tylko elementy krytyczne systemu 1 i 6 (wyznaczenie krytyczności systemu w oparciu o wskaźnik Birnbauma [1]) i mają taki sam współczynnik f_i = 0,8 (poprawienie nieuszkadzalności systemu jest łatwe).
h) optymalizacji podlegają tylko elementy krytyczne systemu 1 i 6 oraz mają różne współczynniki f_i: f_1 = 0,8, f_6 = 0,2 (łatwe poprawienie nieuszkadzalności dla elementu 1, trudne dla elementu 6).

W przypadku a i b zadanie optymalizacji (1)-(3) sprowadza się do znalezienia minimum kosztów całkowitych:

$$\min C = \sum_{i=1}^{6} C_i(R_i) = \sum_{i=1}^{6} \exp\left[(1-f_i)\frac{R_i - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i}\right] \tag{6}$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{gathered} R_s \geq 0,950 \\ 0,607 \leq R_1 \leq 0,99 \\ 0,883 \leq R_2 \leq 0,99 \\ 0,702 \leq R_3 \leq 0,99 \\ 0,779 \leq R_4 \leq 0,99 \\ 0,883 \leq R_5 \leq 0,99 \\ 0,607 \leq R_6 \leq 0,99, \end{gathered}$$

przy czym wartości $R_{i,min}$ odpowiadają wartościom R_i dla badanego czasu (tabela 1), $R_{i,max}$ są takie same dla wszystkich elementów i wynoszą 99%, natomiast f_i przyjmują wartości zgodnie z założeniami przypadku a) i b).

Dla przypadków c) i d) otrzymujemy odpowiednio formuły (7) i (8):

$$\min C = \sum_{i=1}^{2} C_i(R_i) = 2 \cdot \exp\left[(0,2)\frac{R_i - 0,607}{0,999 - R_i}\right] \tag{7}$$

i

$$\min C = \sum_{i=1}^{2} C_i(R_i) = \exp\left[(0,2)\frac{R_i - 0,607}{0,999 - R_i}\right] + \exp\left[(0,8)\frac{R_i - 0,607}{0,999 - R_i}\right] \tag{8}$$

$$\text{oraz } R_s \geq 0,950 \text{ i } 0,607 \leq R_{1,6} \leq 0,99.$$

5. WYNIKI OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH

Tabele od 3 do 6 przedstawiają wyniki optymalizacji w programie BlockSim dla przypadków odpowiednio od a) do d). Drugie kolumny tabel zawierają wyjściowe wartości nieuszkadzalności poszczególnych elementów i całego systemu dla czasu t = 500 jednostek czasu. W trzecich kolumnach umieszczono wartości nieuszkadzalności po alokacji, natomiast w kolumnie czwartej wyniki alokacji redundancji (NEPU – number of equivalent parallel units) z zaokrągleniem do liczb całkowitych.

Tabela 3 pokazuje, że w przypadku a) największe zmiany nieuszkadzalności (wzrost nieuszkadzalności o 19,5%) powinno się zastosować dla elementów 1 i 6. Są to elementy o stosunkowo małej wartości nieszkadzalności i najbardziej istotne, więc koszt zmiany jest niewielki, a wpływ na nieuszkadzalność systemu znaczna. Dla pozostałych elementów zmiany są niezauważalne, co wynika z mniejszej istotności niezawodnościowej tych komponentów oraz większych wartości wyjściowych ich nieuszkadzalności. Również alokacja nadmiarowości ukazała, że należałoby zrównoleglić bloki 1 i 6, czyli elementy najbardziej istotne.

W przypadku b) założono największe trudności w zwiększaniu nieuszkadzalności dla bloków najbardziej istotnych niezawodnościowo (1 i 6). W wyniku tego zmiana ich nieuszkadzalności jest mniejsza niż w przypadku a) (wzrost nieuszkadzalności o 18%), natomiast część odpowiedzialności za nieuszkadzalność systemu przeniesiono na bloki 2 i 3 (wzrost nieuszkadzlności o odpowiednio 6% oraz 3,5%), dla których polepszenie nieuszkadzalności odbywa się łatwiej jednak dla większych wartości. Alokacja nadmiarowości jest taka sama jak w przypadku a).

Podobny wpływ współczynnika f_i na wyniki alokacji zaobserwować można dla przypadków c) i d), które pomijają w optymalizacji elementy nieistotne. Jak widać z tabeli 5 pominięcie elementów 2-5 nie wpłynęło na alokację nieuszkadzalności elementów 1 i 6 (wzrost dalej na poziomie 19,5%). Oczywiście różnica współczynnika f_i (przypadek d) ma zasadniczy wpływ na alokację nieuszkadzalności i dla równie istotnych identycznych elementów spowodowała różnice w przypisanej nieuszkadzalności (wzrost nieuszkadzalności dla bloku 1 wyniósł 27,6%, a dla bloku 6 tylko 5,9%).

Tabela 3 Wyniki optymalizacji dla przypadku a (wszystkie elementy podlegają optymalizacji, trudność zmiany nieuszkadzalności elementów jest taka sama)

Nazwa bloku	R(500)	R_goal(500)	Zmiana R(%)	N.E.P.U.
Block 1	0,6065	0,8012	19,5	1,7319 → 2
Block 2	0,8825	0,8826	0,0	1,0003 → 1
Block 3	0,7022	0,7023	0,0	1,0004 → 1
Block 4	0,7788	0,7788	0,0	1,0001 → 1
Block 5	0,8825	0,8828	0,0	1,0011 → 1
Block 6	0,6065	0,8012	19,5	1,7319 → 2
System	0,8359	0,95	11,4	0,97

Tabela 4 Wyniki optymalizacji dla przypadku b (wszystkie elementy podlegają optymalizacji, trudność zmiany nieuszkadzalności elementów jest różna)

Nazwa bloku	R(500)	R_goal(500)	Zmiana R(%)	N.E.P.U.
Block 1	0,6065	0,7867	18,0	1,6562 → 2
Block 2	0,8825	0,9426	6,0	1,3342 → 1
Block 3	0,7022	0,7371	3,5	1,1028 → 1
Block 4	0,7788	0,7788	0,0	1
Block 5	0,8825	0,8836	0,1	1,0043 → 1
Block 6	0,6065	0,7867	18,0	1,6562 → 2
System	0,8359	0,95	11,4	R_s = 0,97

Tabela 5 Wyniki optymalizacji dla przypadku c (optymalizacji podlegają elementy najbardziej istotne 1 i 6, trudność zmiany nieuszkadzalności elementów jest taka sama)

Nazwa bloku	R(500)	R_goal(500)	Zmiana R(%)	N.E.P.U.
Block 1	0,6065	0,8013	19,5	1,7323 → 2
Block 6	0,6065	0,8013	19,5	1,7323 → 2
System	0,8359	0,95	11,4	R_s = 0,97

Tabela 6 Wyniki optymalizacji dla przypadku d (optymalizacji podlegają elementy najbardziej istotne 1 i 6, trudność zmiany nieuszkadzalności elementów jest różna)

Nazwa bloku	R(500)	R_goal(500)	Zmiana R(%)	N.E.P.U.
Block 1	0,6065	0,8821	27,6	2,2919 → 3
Block 6	0,6065	0,6650	5,9	1,1726 →1
System	0,8359	0,95	11,4	R_s = 0,97

W rozważaniach bloki 1 i 6 reprezentują dwa identyczne pod względem funkcji, istotności niezawodnościowej i wartości $R_{i,min}$ obiekty, więc przy takim samym parametrze f_i praktycznie nie ma znaczenia, czy dołożymy dwa dodatkowe bloki 1, czy po jednym dodatkowym bloku 1 i 6. Załóżmy jednak, że koszty polepszenia nieuszkadzalności tych bloków, np. nakłady finansowe, są różne, co przekłada się na wartość współczynnika f_i. Tabela 7 zawiera przykładowe ceny urządzeń wchodzących w skład bloku 1 i 6 w zależności od wartości niuszkadzalności.

Tabela 7 Ceny komponentów 1 i 6

Nieuszkadzalność (t = 500)	Koszt [zł] Blok 1	Koszt [zł] Blok 6
0,60	2 tys.	3 tys.
0,70	2,5 tys.	4 tys.
0,80	3 tys	5,5 tys.
0,90	3,5 tys.	7 tys.

Zgodnie z tabelami 6 i 7 otrzymujemy następujące nakłady finansowe zwiększenia nieuszkadzalności systemu dla różnych rozwiązań:

Tabela 8 Koszty finansowe zwiększenia nieuszkadzalności systemu

Rodzaj metody	Koszt [zł]	Uzyskana nieuszkadzalność systemu [%]	Uwagi
Alokacja nieuszkadzalności - przypadek c (brak uwzględnienia cen na wartość współczynnik f_i)	8,5 tys.	95	Zastosowano blok 1 o $R_1 = 0,8$ i blok 6 o $R_6 = 0,8$
Alokacja nieuszkadzalności - przypadek d (uwzględnienie cen na wartość współczynnik f_i)	7,5 tys	96	Zastosowano blok 1 o $R_1 = 0,9$ i blok 6 o $R_6 = 0,7$
Alokacja nadmiarowości - przypadek c (brak uwzględnienia cen na wartość współczynnik f_i)	10 tys.	97	Zastosowano dwa bloki 1 oraz dwa bloki 6 o $R_{1,6} = 0,6$
Alokacja nadmiarowości - przypadek d (uwzględnienie cen na wartość współczynnik f_i)	9 tys.	97	Zastosowano trzy bloki 1 i jeden blok 6 o $R_{1,6} = 0,6$

Z tabeli 8 widać, że alokacja nieuszkadzalności przynosi w tym przypadku lepsze wyniki ekonomiczne niż alokacja nadmiarowości oraz że brak rozróżnienia współczynnika f_i w oparciu o nakłady finansowe na komponenty przynosi większe straty w realizacji wyników zadania optymalizacji. Pamiętając, że zastosowanie nadmiarowości zwiększa wymiary systemu i stopień jego skomplikowania należy starać się stosować alokację nieuszkadzalności, a tylko tam gdzie to jest niemożliwe (np. z powodu ograniczeń maksymalnej wartości nieuszkadzalności elementów) stosować alokację redundancji.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodę alokacji nieuszkadzalności w systemach logistycznych w oparciu o funkcję kosztów Mettasa. Dokonano obliczeń dla różnych przypadków w odniesieniu do liczby optymalizowanych elementów oraz wartości współczynnika określającego trudność zwiększania nieuszkadzalności. Wyniki pokazały, że duży wpływ na alokację nieuszkadzalności ma istotność elementu oraz wartość początkowa nieuszkadzalności. Optymalizacji dokonano dla prostego systemu logistycznego, ale przedstawiana metoda oraz jej implementacja komputerowa daje możliwość zastosowania jej do systemów o strukturach dużo bardziej rozbudowanych i skomplikowanych.

Przedstawioną metodę optymalizacji stosuje się przy założeniu niezależności oraz dwustanowości (zdatny lub niezdatny) elementów systemu, co sprawdza się w wielu przypadkach praktycznych. Czasami jednak istnieje konieczność uwzględnienia wielostanowości (od całkowitej zdatności do kompletnej niezdatności elementu/systemu) oraz zależności elementów (uszkodzenie jednego powoduje uszkodzenie drugiego). Badania nad ogólnymi przypadkami z zastosowaniem metod niekonwencjonalnych, również symulacyjnych, są podejmowane w ostatnich latach [5], [12] głównie w odniesieniu do struktur prostych (szeregowych lub równoległych), mieszanych (szeregowo-równoległych oraz równoległo-szeregowych) oraz progowych.

Dodatkowymi założeniami przyjętymi w referacie są: funkcja kosztów zależna od współczynnika łatwości zmiany nieuszkadzalności elementów, a także wyznaczanie krytyczności elementu w oparciu o jego wskaźniki nieuszkadzalności i umiejscowienie w strukturze. Rozszerzenie badań w kierunku określania wielokryterialnych kosztów, np. w oparciu o zasady przedstawione w [6] oraz wyznaczanie istotności elementów z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych [2] dałoby możliwość stworzenia ogólnej metody alokacji nieuszkadzalności w systemach logistycznych.

LITERATURA:

[1] Brinbaum Z. W., *On the Importance of Different Components in a Multicomponent System*, Multivariate Analysis II, Edited by P. R. Krishnaiah, Academic Press, 1969

[2] Feliks J., Majewska K., Application of fuzzy logic to selection and realization of optimal maintenance tasks, Proceedings of the 16th International Conference on Systems Science, 4-6 September 2007, Wrocław, Vol. II

[3] Kececioglu D, *Reliabiliy engineering handbook*, v.2, Prentice Hall PTR Engelwood Cliffs, New Jersey 1991

[4] Kuo W., Prasad VR, Tilman FA , Hwang CL, *Optimal Reliability Design: Fundamentals and applications,* UK: Cambridge University Press, 2001

[5] Kuo W., Wan R., *Recent Advances in Optimal Reliability Allocation*, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, Vol. 37, No 2, 2007

[6] Lee GL et all., *Optimal Allocation for Improving System Reliability Using AHP*, IEEE ICSET, 2008
[7] Y. K. Malaiya, *Reliability Allocation*, Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability, John Wiley & Sons, March 2008.
[8] Mettas A., *Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems*, Annul Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles CA, 2000
[9] Nowakowski T., *Niezawodność systemów logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011
[10] ReliaSoft Corporation, *BlockSim 7 Users Guide*, Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing, 2007.
[11] ReliaSoft, *Reliability Importance and Optimized Reliability Allocation (Analytical)* http://www.weibull.com/SystemRelWeb/blocksimtheory.htm, 2003.
[12] Yalaoui A, Chu Ch, Chatelet E, *Reliability Allocation in a series-parallel system*, Reliability Engineering and System Safety 90, 2005
[13] Tillman FA, Hwang CL, Kuo W, *Optimization of System Reliability*, New York: Marcel Dekker, 1980

THE USE OF METTAS COST FUNCTION TO RELIABILITY ALLOCATION IN LOGISTIC SYSTEMS

Abstract

Papers deals with application of reliability allocation using Mettas cost function in logistic systems. It shows nonlinear optimization problem in a form of minimalization of exponential cost function depending on component reliability under limitation on system reliability and achievable component reliabilities. En example of allocation calculation for certain logistic system with the use of ReliaSoft BlockSim software was presented. A comparison with the results of adequate redundancy allocation was made.

Keywords: reliability allocation, systems dependability, logistic system, reliability optimization, Mettas cost function