

Algorytmy heurystyczne w optymalizacji naprawialnych systemów technicznych

Mateusz Oszczyła, Jarosław Ziolkowski, Aleksandra Łegas, Jakub Konwerski, Jerzy Małachowski

Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna

email: mateusz.oszczyła@wat.edu.pl, jaroslaw.ziolkowski@wat.edu.pl, aleksandra.legas@wat.edu.pl, jakub.konwerski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W przeprowadzonych badaniach przeanalizowano problem alokacji redundancji (RAP) w trzech podstawowych strukturach niezawodnościowych systemu: szeregowej, szeregowo-równoległej oraz złożonej mostkowej. System składa się z binarnych, heterogenicznych i naprawialnych komponentów, które działają w trybie zimnego czuwania. Celem optymalizacji było maksymalizowanie dostępności systemu przy jednoczesnym zachowaniu określonych ograniczeń kosztowych. Do oszacowania dostępności zarówno całego systemu, jak i jego podsystemów, opracowano model oparty na ciągłym procesie Markowa. W pracy zaproponowano dwa podejścia do rozwiązania problemu RAP: algorytm genetyczny oraz algorytm iteracyjny oparty na mierze ważności dostępności (AIM). Wyniki analiz numerycznych wykazały, że algorytm genetyczny charakteryzował się wyższą skutecznością, jednak algorytm AIM był znacznie szybszy w przypisywaniu komponentów w trybie gotowości.

SŁOWA KLUCZOWE: problem alokacji redundancji, procesy Markowa, algorytmy genetyczne, miara ważności dostępności

1. Wprowadzenie

Ze względu na dużą różnorodność istniejących struktur systemów oraz typów komponentów, optymalizacja redundancji jest złożonym i rozbudowanym zagadnieniem badawczym [1]. W literaturze naukowej komponenty klasyfikuje się według kilku kryteriów, takich jak liczba możliwych stanów (binarne lub wielostanowe), stopień jednorodności (homogeniczne lub heterogeniczne), możliwość naprawy (nienaprawialne lub naprawialne), zmienność intensywności uszkodzeń i napraw w czasie (stała lub zależna od czasu) oraz tryb gotowości (zimny, ciepły lub gorący) [2]. Proces optymalizacji rozmieszczenia komponentów w trybie gotowości w strukturach niezawodności systemu jest realizowany w odniesieniu do funkcji celu, która może obejmować maksymalizację niezawodności [3], maksymalizację dostępności [4] lub minimalizację kosztów [5].

Jednym z powszechnie stosowanych podejść do rozwiązywania problemu alokacji redundancji (RAP) są meta-heurystyczne algorytmy ewolucyjne (EA), zwłaszcza algorytmy genetyczne (GA). Przykładem zastosowania GA w celu maksymalizacji niezawodności systemu przy ograniczeniach kosztowych jest praca [6], w której autorzy opracowali własny algorytm do optymalizacji niezawodności systemu szeregowo-równoległego. Inny przykład zastosowania GA do zwiększenia dostępności systemu o ważonej struktury progowej „k z n” został przedstawiony w publikacji [7].

Wysoka skuteczność algorytmów ewolucyjnych w przeszukiwaniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych problemu optymalizacyjnego jest powodem ich przydatności w rozwiązywaniu RAP. Z drugiej strony stosunkowo długi czas obliczeń stwarza potrzebę poszukiwania alternatywnych podejść. Niniejsze badanie

odnosi się do tych zagadnień, proponując podejście oparte na mierze ważności dostępności, które zostało opracowane i następnie porównane z algorytmem genetycznym. Aby ocenić wydajność dwóch opracowanych algorytmów, przeprowadzono optymalizację trzech systemów wzorcowych: szeregowego, szeregowo-równoległego i mostkowego.

2. Metodologia

W analizowanym problemie alokacji redundancji przyjęto następujące założenia:

- 1) System składa się z naprawialnych heterogenicznych komponentów;
- 2) Istnieją trzy możliwe stany komponentów: praca, stan zimnej gotowości i awaria;
- 3) Awarie i naprawy są niezależnymi procesami Markowa;
- 4) Intensywności awarii i napraw komponentów są stałe;
- 5) Koszty komponentów są stałe;
- 6) W czasie $t = 0$ wszystkie komponenty są sprawne;
- 7) Zakłada się, że czas przełączenia ze stanu zimnej gotowości do stanu pracy jest równy 0 (przełącznik idealny).

RAP z jednokryterialną funkcją celu, reprezentowaną jako maksymalizacja dostępności systemu jest zgodny z zależnością (1):

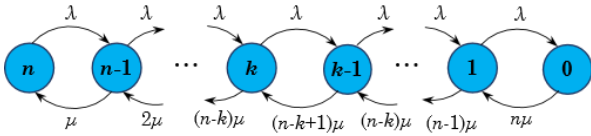
$$\text{Maximize } A_s(A_i : i \in \{1, \dots, m\}). \quad (1)$$

Głównym ograniczeniem jest całkowity koszt systemu, wyrażony jako suma kosztów wszystkich jego komponentów:

$$\sum_{i=1}^m n_i c_i \leq C. \quad (2)$$

Jeden aktywny komponent wspierany przez $n-1$ komponentów rezerwowych można przedstawić jako

podsystem 1 z n . Aktywny komponent ulega uszkodzeniu ze stałą intensywnością λ , podczas gdy inne sprawne komponenty w trybie zimnej gotowości nie mogą ulec awarii. Każdy uszkodzony komponent jest naprawiany niezależnie ze stałą intensywnością μ . Graf przejść międzystanowych modelu Markowa przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Graf przejść międzystanowych modelu Markowa.

W przypadku naprawialnych systemów technicznych znaczenie komponentów (podsystemów) dla niezawodności systemu określa się za pomocą miary ważności dostępności (AIM) według wzoru (3):

$$I_i^A = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (3)$$

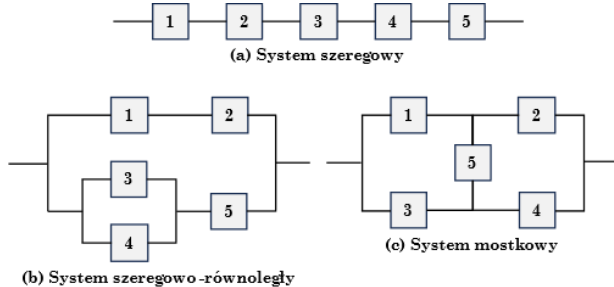
Wysoka wartość wskaźnika AIM i wzrost dostępności podsystemu poprzez dodanie zapasowego komponentu przemawiają za alokacją redundancji w danym podsystemie, podczas gdy koszt dodania komponentu działa na niekorzyść takiej decyzji. Bazując na tych rozważaniach, zaproponowano wskaźnik Z_i , który określa priorytet przydzielania komponentów zapasowych do i -tego podsystemu, zgodnie z poniższą zależnością (4):

$$Z_i = \frac{I_i^A (A_i(n_i + 1) - A_i(n_i))}{c_i} \quad (4)$$

GA opiera się na trzech kluczowych procesach: selekcji, krzyżowaniu i mutacji. W procesie selekcji, przy użyciu metody selekcji stanu ustalonego, wybierane są 4 najlepsze rozwiązania pod względem dostępności systemu z populacji liczącej 16 rozwiązań. Wybrane rozwiązania stają się rodzicami nowej generacji, tworzonej poprzez jednopunktowe krzyżowanie. Aby uniknąć lokalnych ekstremów, mutacja chromosomów potomnych jest przeprowadzana z prawdopodobieństwem 0,1. Procesy te są powtarzane, aż do osiągnięcia kryterium zatrzymania, którym jest 100 pokoleń.

3. Wyniki

W przeprowadzonych badaniach przeanalizowano trzy studia przypadku: system szeregowy, system szeregowo-równoległy i system mostkowy. Każdy z nich składa się z pięciu podsystemów ($m = 5$) o strukturze progowej 1 z n . Schematy struktur niezawodności przedstawiono na Rys. 2. Wyniki badań przedstawiono w Tabeli 1.



Rys. 2. Analizowane studia przypadku.

Tabela 1. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem GA i AIM.

System	Ograniczenie	Algorytm	Dostępność systemu	Czas obliczeń (s)
Szeregowy	C = 20	GA	0.73106499	0.8906
		AIM	0.73106499	0.0938
	C = 25	GA	0.88466325	1.0938
		AIM	0.88466325	0.0625
	C = 30	GA	0.95602546	1.2656
		AIM	0.95285811	0.0156
Szeregowo-równoległy	C = 20	GA	0.99922198	1.6406
		AIM	0.99470928	0.0156
	C = 25	GA	0.99998975	1.3281
		AIM	0.99937553	0.0156
	C = 30	GA	0.99999988	1.1406
		AIM	0.99968094	0.0156
Mostkowy	C = 20	GA	0.99835470	0.9688
		AIM	0.99833334	0.0313
	C = 25	GA	0.99988572	1.1094
		AIM	0.99997730	0.0313
	C = 30	GA	0.99999915	1.3438
		AIM	0.99999915	0.0156

4. Podsumowanie

Podsumowując, uzyskane wyniki badań nad optymalizacją systemów technicznych wskazują na następujące wnioski:

- 8) Algorytm genetyczny osiąga wysoką skuteczność w znajdowaniu rozwiązań maksymalizujących dostępność systemu.
- 9) GA wymaga znacznie dłuższego czasu obliczeń w porównaniu do algorytmu iteracyjnego opartego na AIM.
- 10) Przebieg zmian wartości funkcji celu w kolejnych iteracjach algorytmu opartego na AIM jest zawsze taki sam dla danych założeń i parametrów.

Literatura

- [1] Oszczypta M, Ziółkowski J, Małachowski J. Redundancy allocation problem in repairable k-out-of-n systems with cold, warm, and hot standby: A genetic algorithm for availability optimization. *Applied Soft Computing* 2024;165:112041. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112041>.
- [2] Sharifi M, Taghipour S. Optimal inspection interval for a k-out-of-n system with non-identical components. *Journal of Manufacturing Systems* 2020;55:233–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.007>.
- [3] Yeh W-C, Su Y-Z, Gao X-Z, Hu C-F, Wang J, Huang C-L. Simplified swarm optimization for bi-objective active reliability redundancy allocation problems. *Applied Soft Computing* 2021;106:107321. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107321>.
- [4] Zaretalab A, Sharifi M, Guilani PP, Taghipour S, Niaki STA. A multi-objective model for optimizing the redundancy allocation, component supplier selection, and reliable activities for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2022;222:108394. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108394>.
- [5] Li Y-F, Zhang H. The methods for exactly solving redundancy allocation optimization for multi-state series-parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2022;221:108340. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108340>.
- [6] Gholinezhad H, Zeinal Hamadani A. A new model for the redundancy allocation problem with component mixing and mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering & System Safety* 2017;164:66–73. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.009>.
- [7] Khorshidi HA, Gunawan I, Ibrahim MY. A value-driven approach for optimizing reliability-redundancy allocation problem in multi-state weighted k-out-of-n system. *Journal of Manufacturing Systems* 2016;40:54–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.06.002>.