

Podstawowe struktury niezawodnościowe złożonych obiektów technicznych

DR INŻ. LESZEK CHYBOWSKI, CRP
Wydział Mechaniczny
Akademia Morska w Szczecinie

Efektywne utrzymanie ruchu w zakładach produkcyjnych związane jest bezpośrednio z niezawodną pracą wielu współpracujących ze sobą obiektów. W celu oceny poziomu niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy systemów przemysłowych prowadzi się analizy niezawodnościowe.

Eksplotacja ukierunkowana na zapewnienie optymalnej gotowości maszyn i urządzeń pozwala na maksymalizację zysków przedsiębiorstwa. Każdy system techniczny stanowi pewną całość zbudowaną z elementów składowych i realizującą założoną funkcję. Aby możliwe jednak było wykonanie zadania przez system, elementy składowe muszą ze sobą współpracować w odpowiedni i zaplanowany sposób. Relacje między elementami związane z przekazywaniem energii, masy i informacji tworzą tzw. strukturę systemu. W zależności od przedmiotu analizy struktura ta może odzwierciedlać:

- generalny opis systemu (struktura ogólna),
- konstrukcję systemu (struktura konstrukcyjna),
- funkcjonowanie systemu (struktura funkcjonalna),
- proces oceny stanu technicznego (struktura diagnostyczna),
- odwzorowanie wpływu uszkodzeń elementów na uszkodzenie systemu (struktura niezawodnościowa).

Ta ostatnia jest szczególnie przydatna w analizie niezawodności i bezpieczeństwa funkcjonowania maszyn i urządzeń. Aby uzyskać ilościowe dane o racjonalnych czasach międzyawaryjnych, wymaganej liczbie części zamiennych, poziomie bezpieczeństwa itp., prowadzi się analizy bazujące na

strukturze niezawodnościowej systemu. Struktura ta może być przedstawiona z wykorzystaniem wielu różnych sposobów reprezentacji^[3]. W każdym systemie technicznym struktura niezawodnościowa zależy od:

- przyjętego w analizie poziomu dekompozycji systemu i sposobu podziału na części składowe,
- funkcjonalnych relacji między elementami systemu,
- przyjętych kryteriów uznania stanu technicznego elementu lub systemu za stan niezdatności,
- funkcji realizowanej przez system.

Systemy techniczne mają zwykle złożoną i nie w pełni znaną strukturę niezawodnościową. W ocenie niezawodności analityk sprowadza rzeczywistą strukturę niezawodnościową systemu do postaci, które zawierają wyłącznie kombinację struktur podstawowych przedstawionych w dalszej części.

Najprostsze struktury mają tzw. systemy trywialne (zawsze zdalny, zawsze niezdatny) oraz systemy jednoelementowe^[4]. Niemniej jednak spotykane w technice systemy składają się z wielu elementów o określonej uszkodzalności. Do podstawowych struktur niezawodnościowych systemów wieloelementowych należą:

- struktury proste: szeregową, równoległą, szeregowo-równoległą i równoległo-szeregową,

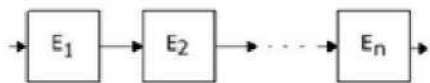
- struktury złożone: mostkowa, progowa oraz struktury liniowo-kolejne k-z-n i okrężnie-kolejne k-z-n.

Jednym z najpopularniejszych sposobów odwzorowania struktury niezawodnościowej systemu są blokowe schematy niezawodności (ang. Reliability Block Diagram, RBD), które modelują strukturę niezawodnościową systemu poprzez graficzne przedstawienie relacji niezawodnościowych pomiędzy elementami systemu jako linie/strzałki (łączniki). Po szczególne elementy przedstawione są z wykorzystaniem bloków. Pomocniczym elementem w modelowaniu systemów mogą być węzły, które są przydatne w tworzeniu złożonych struktur niezawodnościowych. Na tworzenie schematu niezawodnościowego systemu technicznego składa się:

1. Analiza funkcjonowania systemu.
2. Wyodrębnienie w systemie elementów, których niezawodność ma wpływ na niezawodność systemu.
3. Odwzorowanie wyróżnionych elementów w postaci bloków.
4. Graficzne odwzorowanie zależności między stanami niezawodnościowymi elementów a stanem niezawodnościowym systemu z wykorzystaniem łączników.

Najprostszą wieloelementową i nienadmiarową strukturą niezawodnościową jest struktura szeregową (ang. series reliability structure).

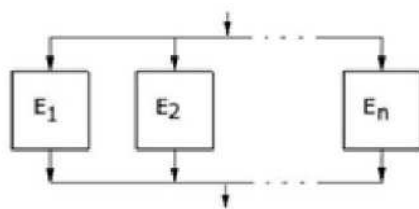
Charakteryzuje się ona tym, że uszkodzenie dowolnego elementu systemu powoduje uszkodzenie całego systemu. Graficzny model systemu o szeregowej strukturze niezawodnościowej z elementami E_1, E_2, \dots, E_n przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Szeregowa struktura niezawodnościowa

Szeregowa struktura niezawodnościowa występuje w przeważającej większości maszyn i urządzeń stanowiących elementy (podsystemy) bardziej złożonych systemów. Przykładowo struktura taka odpowiada zespołowi pompowemu z pompą odśrodkową (rys. 2). W systemie tym każdy element (wał, wirnik, korpus, łożyska, uszczelnienia, sprzęgło, silnik elektryczny itp.) stanowi blok szeregowej struktury niezawodnościowej.

Kolejną spośród prostych struktur niezawodnościowych jest struktura równoległa (ang. parallel reliability structure), czyli taka, w której przebywanie dowolnego elementu w stanie zdatności zapewnia zdatność całego systemu. Graficzny model systemu o równoległej strukturze niezawodnościowej z elementami E_1, E_2, \dots, E_n przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Równoległa struktura niezawodnościowa

Struktura równoległa odpowiada układom, w których występuje tzw. rezerwa gorąca. To znaczy układ składa się z więcej niż jednego elementu danego rodzaju, podczas gdy do realizacji określonego zadania przez system wystarcza tylko jeden element. Elementy nadmiarowe stanowią rezerwę strukturalną. Wszystkie elementy takiego systemu podczas pracy podlegają jednakowym obciążeniom związanym z realizacją zadania przez system. Przykład takiego systemu stanowią dyski RAID zapisujące równoległe dane w systemie sterowania procesem produkcji (rys. 4).

Do redukowalnych struktur niezawodnościowych należą struktura szeregowo-równoległa (ang. series-parallel reliability structure) oraz struktura równoległo-szeregowa (ang. parallel-series reliability structure) pokazane na rys. 5.

Struktury takie stanowią kombinację struktury szeregowej i równoległej. Przykład równoległo-szeregowej struktury niezawodnościowej stanowi układ przedstawiony na rys. 6. System taki składa się z nadmiarowych serwerów SCADA, zdublowanych urządzeń sieciowych oraz nadmiarowych terminali w systemie zarządzania procesem produkcyjnym. System jest zdalny tak dłu-



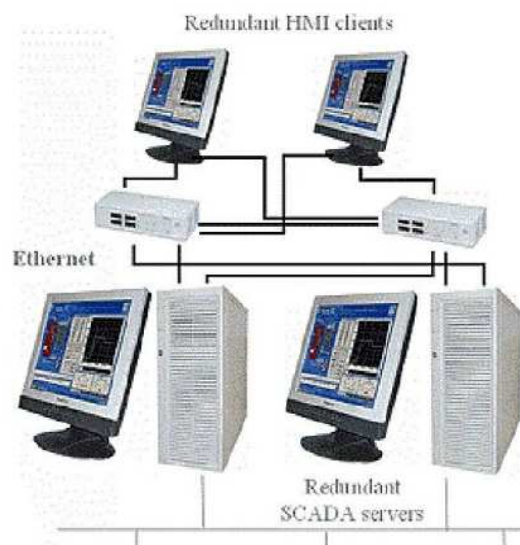
Rys. 4. Macierz dyskowa jako system o równoległej strukturze niezawodnościowej

go, jak co najmniej jedno urządzenie każdego rodzaju jest zdalne. Uszkodzenie wszystkich elementów danego rodzaju, np. wszystkich serwerów, spowoduje awarię systemu sterowania.

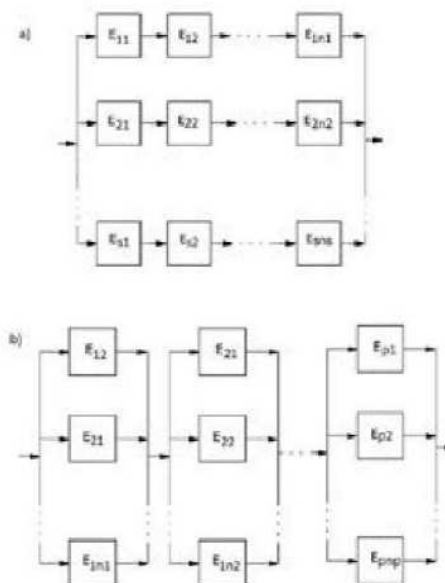
Struktury złożonych systemów stanowią zwykle kombinację struktury szeregowej i równoległej. Różne części systemu mogą wówczas być rozpatrywane jako podsystemy o szeregowej lub równoległej strukturze niezawodnościowej. Redukowanie kolejnych bloków systemów z wykorzystaniem zastępczych bloków opisujących szeregową lub równoległą strukturę umożliwia uzyskanie struktury prostej w analizie. Ilustracja tego procesu na przykładzie złożonej struktury niezawodnościowej została przedstawiona na rys. 7.

Zaprezentowany na rys. 7A system zbudowany jest z elementów $E_1, E_2, E_3, E_4,$ i E_5 . W pierwszym kroku (rys. 7B) redukcji podlegają elementy E_1, E_2 , które tworzą razem strukturę równoległą równoważną zastępczemu blokowi E_{12} .

Rys. 6. System transmisji danych w systemie SCADA z równoległo-szeregową strukturą niezawodnościową



Rys. 2. Zespół pompowy jako system o szeregowej strukturze niezawodnościowej

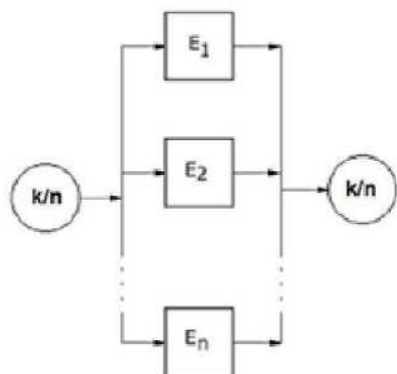


Rys. 5. Struktura niezawodnościowa
a) szeregowo-równoległa
b) równoległo-szeregowa

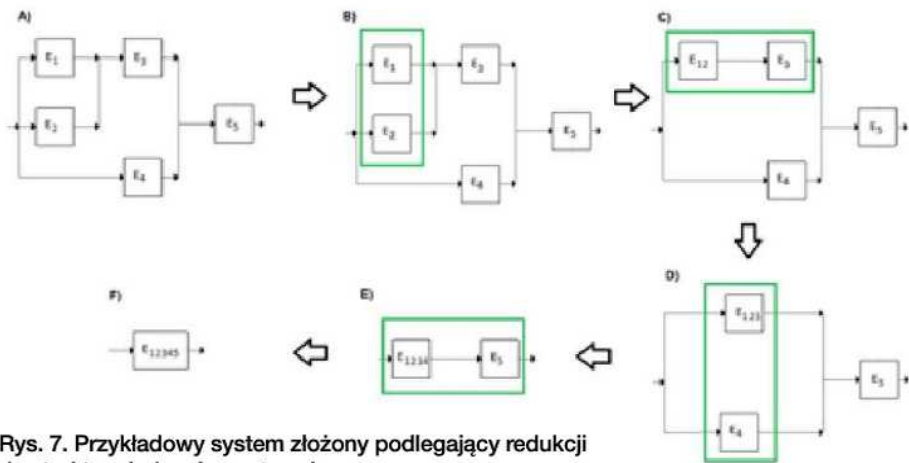
Następnie (rys. 7C) redukowane są bloki E12 i E3 tworzące szeregową strukturę niezawodnościową równoważną zastępczemu blokowi E123. Kolejno (rys. 7D) redukowane są równoległe bloki E123 i E4, w wyniku czego powstaje zastępczy blok E1234 (rys. 7E). Jako ostatni krok procedury bloki E1234 oraz E3 redukowane są do zastępczego bloku E12345 (rys. 7F).

Nie wszystkie struktury podlegają redukcji. Przykładem takiej struktury jest mostkowa struktura niezawodnościowa (ang. bridge reliability structure) przedstawiona na rys. 8. Struktura taka składa się z pięciu elementów, spośród których: elementy E1 i E2 są elementami wejściowymi; elementy E3 i E4 elementami wyjściowymi, zaś element E5 jest elementem mostkującym (mostkiem). System taki jest zdatny wtedy i tylko wtedy, gdy zdatne są E1, E3 lub E2, E4, lub E1, E5, E4, lub E2, E5, E3. Struktura mostkowa jest strukturą nieredukowalną, gdyż nie może zostać sprowadzona do prostej postaci struktury szeregowej lub równoległej bez powielania określonych bloków w modelu (rys. 8b). Analizę takich struktur realizuje się z wykorzystaniem metody zwanej dekompozycją^[3].

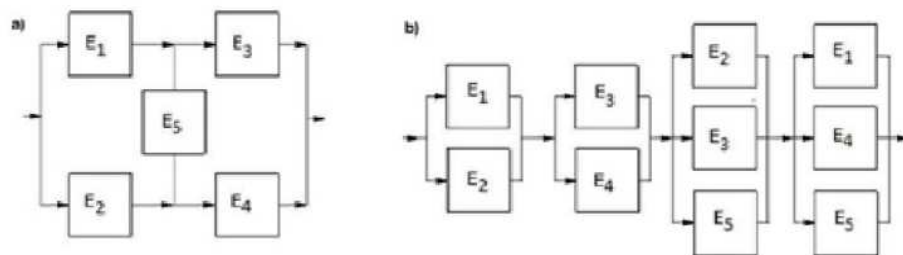
Innymi strukturami nieredukowalnymi są progowe struktury niezawodnościowe typu k-z-n (ang. k-out-of-n:G reliability structure, gdzie G oznacza notację pozytywną: Good). System o takiej strukturze jest zdatny wtedy i tylko wtedy, gdy co najmniej k spośród wszystkich n elementów jest w stanie zdatności. Graficzny model systemu o progowej strukturze niezawodnościowej pokazano na rys. 9. Oczekujące na pracę elementy stanowią rezerwę i w zależności od ich obciążenia i specyfiki systemu układ będzie posiadał rezerwę zimną (zespoły rezerwowe oczekują na załączenie do pracy), rezerwę ciepłą (rezerwowe zespoły elementy znajdują się w stanie częściowego obciążenia) lub rezerwę gorącą (elementy rezerwowe obciążone są na równi z elementami podstawowymi).



Rys. 9. Progowa struktura niezawodnościowa



Rys. 7. Przykładowy system złożony podlegający redukcji do struktury jednoelementowej



Rys. 8. Mostkowa struktura niezawodnościowa; a) model RBD bez powielania elementów; b) równoważny model RBD z powielonymi blokami

Przykład systemu progowego 2/4 może stanowić elektrownia wyposażona w cztery zespoły prądotwórcze, z których dwa muszą być w stanie zdatności, aby system był zdatny. Inny przykład mogą stanowić współpracujące elementy systemu procesowego, jak np. wirówki paliwa przedstawione na rys. 10. W układzie tym dwie spośród trzech wirówek muszą pracować dla zapewnienia ciągłości procesu technologicznego. Jest to więc struktura progowa typu 2/3.

W wymagających zapewnienia wysokiej niezawodności nowoczesnych systemach komunikacyjnych, energetycznych i mechatronicznych stosuje się rozbudowane struktury niezawodnościowe typu liniowo-kolejne k-z-n oraz okrężnie-kolejne k-z-n^[4]. Oprócz wymienionych w niniejszym materiale struktur niezawodnościowych, w literaturze^[5, 6] można spotkać klasyfikacje koncentrujące się na lokalizacji i sposobie załączania elementów rezerwowych w systemie, jak na przykład struktura: przekąźnikowa (kaskadowa), szeregowo-prze-

kaźnikowa, równoległo-przełącznikowa i progowo-przełącznikowa – które odpowiednio wykorzystują wcześniej przedstawione struktury zasadnicze.

Każda struktura niezawodnościowa może zostać przedstawiona za pomocą pewnych zbiorów elementów systemu określanych jako przekroje niezdatności (analiza zorientowana na uszkodzenie systemu) lub ścieżki zdatności (analiza zorientowana na zdatność systemu).

Przekrojem niezdatności analizowanego systemu nazywa się zbiór elementów, w przypadku których jednoczesne zaistnienie stanu niezdatności powoduje niezdatność systemu. Przekroje zdatności nazywane są również cięciami systemu. Przekrój nazywa się minimalnym, jeśli nie jest możliwe zredukowanie zbioru elementów wchodzących w jego



Rys. 10. System wirówek paliwa jako przykład progowej struktury niezawodnościowej

skład, bez utraty jego statusu przekroju niezdatności. W praktyce minimalny przekrój niezdatności jest często określany w skrócie jako przekrój minimalny lub cięcie minimalne.

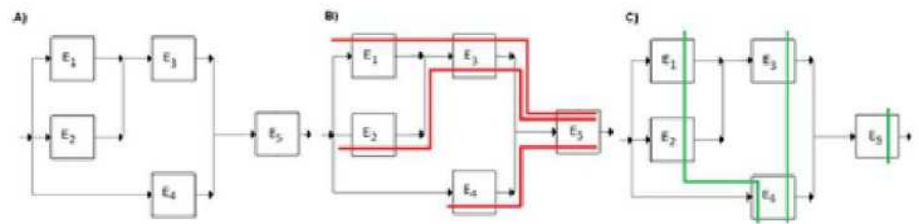
Ścieżką zdatności systemu nazywa się zbiór elementów, których jednocześnie przebywanie w stanie zdatności zapewnia stan zdatności systemu. Ścieżki zdatności nazywane są również drogami zdatności. Ścieżkę nazywa się minimalną, jeśli zbiór elementów wchodzących w jej skład nie może zostać zredukowany bez utraty jej statusu ścieżki zdatności. W praktyce minimalna ścieżka zdatności jest często określana w skrócie jako ścieżka minimalna.

Przykład ilustrujący istotę przekrojów niezdatności oraz ścieżek zdatności przedstawiono na rys. 11. W tym przypadku 5-elementowy system o złożonej strukturze niezawodnościowej składający się z elementów oznaczonych jako E1, E2, E3, E4 i E5 (rys. 11A) został poddany procesowi poszukiwania minimalnych ścieżek zdatności oraz minimalnych przekrojów niezdatności.

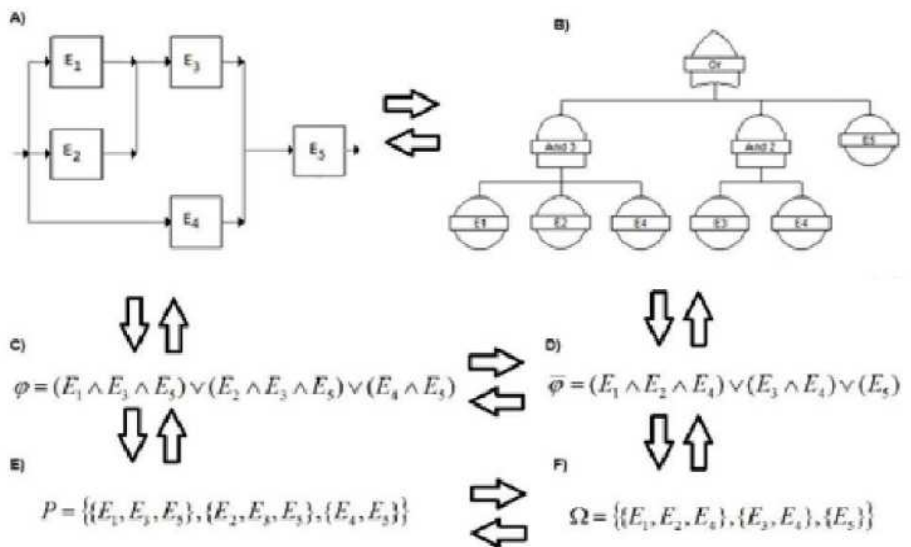
Na rys. 11B połączono za pomocą czerwonych linii elementy, które tworzą minimalne ścieżki zdatności systemu. Analogicznie na rys. 11C przedstawiono minimalne przekroje niezdatności systemu tworzone przez elementy połączone za pomocą zielonych linii.

Model struktury niezawodnościowej może zostać skonwertowany do innej postaci. Przykład różnych sposobów reprezentacji struktury niezawodnościowej systemu przedstawiono na rys. 12. System przedstawiony w postaci schematu blokowego (rys. 12A) można dla przykładu zamodelować równoważnym drzewem niezdatności (rys. 12B). Modele graficzne można przedstawić w postaci logicznej funkcji strukturalnej Φ w ujęciu pozytywnym pokazanych na rys. 12C (analiza ukierunkowana na poprawne działanie systemu) oraz $\bar{\Phi}$ w ujęciu negatywnym przedstawionym na rys. 12D (analiza ukierunkowana na uszkodzenie systemu)^[4]. Funkcje te można zamienić na równoważne modele w postaci odpowiednio zbioru minimalnych ścieżek zdatności (rys. 12E) oraz zbioru minimalnych przekrojów niezdatności (rys. 12F). Analogicznie zapis matematyczny może zostać zamieniony na model graficzny.

Część struktur nie jest przydatna w analizie złożonych systemów technicznych ze względu na obecność tzw. elementów pasywnych, czyli takich, które nie wpływają na stan niezawodnościowy systemu (np. elementy popra-



Rys. 11. Graficzna ilustracja pojęć ścieżki i przekroju systemu; A) przykładowy system; B) minimalne ścieżki zdatności; C) minimalne przekroje niezdatności



Rys. 12. Ilustracja różnych sposobów reprezentacji struktury niezawodnościowej systemu

wiające estetykę). Struktury zawierające elementy pasywne są strukturami redukowalnymi, gdyż do opisu stanów elementów systemu i stanów systemu wystarczy funkcja o liczbie argumentów mniejszej niż całkowita liczba elementów.

W rzeczywistych obiektach technicznych istnieje wiele struktur nadmiarowych, zarówno znanych, jak i niedających się zidentyfikować. W praktyce zawsze mamy do czynienia ze strukturą nadmiarową, a stosowanie przedstawionych modeli wynika z założeń upraszczających prowadzoną analizę^[1, 3].

Definicje struktur nadmiarowej oraz nienadmiarowej nie są precyzyjne i powinny zostać uszczegółowione w prowadzonej analizie^[2]. Dotyczy to zarówno wielu rodzajów nadmiarów (strukturalny, wytrzymałości, parametryczny, obsługiwania, użytkowania, elementowy, informacyjny, czasowy itp.), jak i rosnącej złożoności współczesnych systemów (istnienie wielu znanych i nieznanymi sprzężeń zwrotnych strumieni informacji, masy i energii oraz opóźnień czasowych).

Pomimo problemów z identyfikacją struktury niezawodnościowej systemu przedstawione modele umożliwiają zwykle efektywną analizę niezawodności

układów procesowych oraz wspomagają ocenę bezpieczeństwa eksploatacyjnego złożonych systemów przemysłowych.

Bibliografia

- [1] Chybowski L., Tendencje rozwojowe w ocenie ważności elementów i grup elementów w strukturze niezawodnościowej systemów. Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą, Nr 45, Bydgoszcz 2011, s. 77-86.
- [2] Chybowski L., The problems of modeling the reliability structure of the complex technical system on the basis of a steam-water system of the engine room. Management Systems in Production Engineering Vol. 2(6), 2012, s. 12-17.
- [3] Inżynieria niezawodności – poradnik. Praca zbiorowa pod red. J. Migdałskiego. ATR Bydgoszcz; ZETOM, Warszawa 1992.
- [4] Karpiński J., Korczak E., Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych. Instytut Badań Systemowych PAN, Omnitech Press, Warszawa 1990, s. 162-165.
- [5] Prażewska M., Korczak E., Zaremba M., Tuszyńska J., Tuszyński J., Niezawodność urządzeń elektronicznych. WKiŁ, Warszawa 1987.
- [6] System Analysis Reference. System Reliability, Maintainability, Availability, Throughput and Optimization Analysis. ReliaSoft Publishing. Tucson 2007.