

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
Nr 18

Maciej Woropay

METODA BUDOWY
WIELOPOZIOMOWYCH SYSTEMÓW
DO BADANIA NIEZAWODNOŚCI Z ELEMENTÓW
O WYZNACZONEJ A PRIORI ISTOTNOŚCI



**AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY**

Rozprawy

Nr 18

Maciej Woropay

**METODA BUDOWY
WIELOPOZIOMOWYCH SYSTEMÓW
DO BADANIA NIEZAWODNOŚCI Z ELEMENTÓW
O WYZNACZONEJ A PRIORI ISTOTNOŚCI**

BYDGOSZCZ - 1983

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
doc. dr hab. Juliusz Skonieczny

OPINIODAWCY

prof. dr hab. inż. Tomasz Otmianowski
prof. zw. dr hab. inż. Stefan Ziemia

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Halina Koziolkiewicz, Alfons Grzenkovicz



Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Nakład 100+50. Ark. wyd. 6,5. Ark. druk. 6,5. Papier kl. V.
Oddano do druku w sierpniu 1983 r. Druk ukończono we wrześniu 1983 r.
Zam. nr 376/83 Cena 78 zł MNSzWiT TR 8
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii w Bydgoszczy

30.53

SPIS TREŚCI

str.

Wykaz symboli i oznaczeń	5
--------------------------------	---

Część I

1. WPROKADZENIE	7
2. OBIEKT BADAŃ	14

Część II

3. POJĘCIA PODSTAWNE - PRZESŁANKI TEORETYCZNE	17
3.1. System, struktura ogólna systemu	17
3.2. Budowa systemu	18
3.3. Model systemu	20
3.4. Dekompozycja systemu	21
3.5. Struktura ogólna systemu jako graf pełny skierowany	27
3.6. Znaczenie i zakres pojęcia sprzężenia elementów systemu technicznego	28
3.7. Metoda budowy przekrojów systemu technicznego o wyróżnionych monostrukturach	32
3.7.1. Graficzne przedstawienie przekroju systemu	32
3.8. Struktura funkcjonalna systemu	35
3.9. niezawodność i trwałość systemu	35
3.9.1. Definicja uszkodzenia systemu	36
3.9.2. Struktura niezawodnościowa systemu	39
3.9.3. Przekrój systemu z punktu widzenia jego niezawodności	40
3.10. Struktura diagnostyczna systemu	41
4. ZASADY IDENTYFIKACJI ELEMENTÓW ISTOTNYCH ZŁOŻONEGO SYSTEMU TECHNICZNEGO Z PUNKTU WIDZENIA NIEZAWODNOŚCI	44
4.1. Pojęcie istotności elementów systemu	44
4.2. Zasady budowy kryteriów oceny istotności elementów systemu	46
4.3. Zasady wyznaczania istotności elementów systemu	47
4.4. Ocena ważności kryteriów	49
5. BUDOWA MODELU WYNIKOWEGO	52
5.1. Model nominalny	52
5.1.1. Graficzne odmierowanie modelu nominalnego	54

5.2. Zagadnienie wyboru optymalnego modelu wynikowego	57
---	----

Część III

6. PRZYKŁAD	61
6.1. Okrętowy silnik napędu głównego statku Sulzer typu RD	61
6.1.1. Identyfikacja systemu	62
6.1.2. Budowa przekroju systemu z punktu widzenia niezawodności	84
6.1.3. Kryteria oceny istotności elementów silnika napędu głównego ze względu na niezawodność	66
6.1.4. Zasady stosowania kryteriów do oceny istotności elementów silnika napędu głównego	70
6.1.5. Elementy istotne, z punktu widzenia niezawodności okrętowego silnika Sulzer typu RD-68 i RD-76	71
6.1.6. Weryfikacja przyjętego sposobu wyznaczania istotności elementów systemu, z punktu widzenia niezawodności ...	74
6.1.7. Budowa i opis modelu wynikowego	79
6.2. Kombajn zbożowy Bizon-Super	83
6.2.1. Charakterystyka kombajnów zbożowych Bizon-Super Z050 i Z056	84
6.2.2. Opis badań	84
6.2.3. Kryteria oceny istotności elementów kombajnu zbożowego ze względu na niezawodność	85
6.2.4. Elementy istotne, z punktu widzenia niezawodności, kombajnu zbożowego	87
6.2.5. Weryfikacje przyjętego sposobu wyznaczania istotności elementów systemu z punktu widzenia niezawodności	87
6.3. Algorytm budowy modelu wynikowego	91
7. WNIOSKI	93
8. LITERATURA	95

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ

- α_i - parametry systemu
- $B(i,j,k,l)$ - funkcja zdaniowa, opisująca powiązania między podsystemami systemu
- B_i - macierz opisu istotności podsystemu
- B_j - parametry charakteryzujące działanie otoczenia
- C_{M_i} - i-ta cecha mierzalna
- C_{N_j} - j-ta cecha niemierzalna
- $C(\Delta_i)$ - cenność informacji
- D_f - zdarzenie, polegające na uszkodzeniu podsystemu
- $d(v_i)$ - stopień wierzchołka grafu
- E_N - zbiór elementów systemu
- E_i - zbiór elementów /podsystemów/ i-tego poziomu dekompozycji systemu
- $E_i^{(n_k+1-w)}$ - podzbiór elementów i-tego poziomu dekompozycji, spełniających w-kryteriów
- E_s - podzbiór elementów aktywnych
- E_p - podzbiór elementów podstawowych
- E_r - podzbiór elementów rezerowych
- E_z - podzbiór elementów pasywnych
- $\Phi(f)$ - wartość funkcjonału
- $F(s_{ij}, K_q)$ - operator
- $\Phi(e)$ - funkcje zdaniowa
- Γ - zbiór krawędzi grafu
- γ_1 - 1-ta krawędź grafu
- H - graf-drzewo
- H_{wr} - elementarny graf skierowany
- h_{wr} - podgraf grafu H_{wr}
- I - istotność podsystemu
- K_q - q-te kryterium oceny istotności podsystemu
- $k_1(q)$ - 1-te podkryterium q-tego kryterium
- $K(\Delta_i)$ - koszt zdobycia informacji
- $\Lambda_i(n_k+1-w) = E_i^{(n_k+1-w)}$ - warstwa - podzbiór elementów i-tego poziomu dekompozycji, spełniających w-kryteriów
- λ_{iwr} - podwarstwa - podzbiór elementów systemu i-tego poziomu dekompozycji, spełniających w-kryteriów według r-tej kombinacji

M	- macierz relacji
$K(z)$	- funkcja niezawodności systemu
n_{war}	- liczba podzespołów w warstwie (n_{k+1-w})
$O(\Delta 1)$	- opłacalność zdobycia informacji
P	- zadanie ogólne systemu S
P_s	- s -te podzadanie systemu S
$\Psi(t)$	- funkcja opisująca oddziaływanie czynników wymuszających
R_n^o	- wskaźnik efektywności systemu złożonego przy założeniu, że wszystkie elementy są w stanie zdatności
R_n^x	- wskaźnik efektywności rzeczywistego systemu, w którym uszkodzenia elementów występują z intensywnością zgodną z danymi charakterystykami probabilistycznymi
R_k	- relacje k -członowe
R_{1j}	- struktura łączna dwóch systemów
$f_1(s)$	- predykat jednoargumentowy opisujący zadanie P_1 podsystemu
R_k^q	- relacja
Q_x^q	- kryterium jakości modelu
$q_{s_{1j}} \cdot q_{k1}$	- prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia podsystemu s_{1j} pod warunkiem uszkodzenia jego podsystemu s_{k1}
S	- system
s_{1j}	- podsystem systemu S
I	- sygnał sterujący
Θ	- relacja przedstawiająca zależności funkcjonalne między podsystemami systemu
V	- zbiór wierzchołków grafu
v_1	- 1 -ty wierzchołek grafu
w	- liczba spełnionych przez podsystem kryteriów

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych problemów, występujących w trakcie badań, a w szczególności przy ocenie niezawodności złożonych systemów technicznych, jest zagadnienie budowy ich modeli. Jest to problem złożony, ponieważ w wielu przypadkach tradycyjne metody budowy modeli, w których wykorzystuje się zasady wynikające z teorii niezawodności, praktycznie są bezużyteczne w zastosowaniach do obecnie istniejących systemów technicznych.

Istnieje wiele przyczyn stwarzających ograniczenia w stosowaniu dotychczas znanych modeli do szacowania niezawodności złożonych systemów technicznych. Jako najważniejsze można wymienić :

- duża liczność zbioru elementów systemu,
- duża różnorodność podzbiorów cech charakteryzujących poszczególne elementy,
- zróżnicowany wpływ uszkodzeń poszczególnych elementów na ograniczenie możliwości realizacji zadania przez system,
- duża różnorodność funkcji spełnianych przez elementy w łańcuchu działań zapewniających realizację zadania przez system,
- niemożliwość oznaki stanu pracującej liczby elementów systemu w dowolnej chwili czasu t_0 ,
- różnorodność czynników wywołujących, działających na elementy oraz losowe zmiany położenia ich oddziaływań,
- zróżnicowane możliwości odnowy elementów systemu itd.

Przy tym wskaźniki niezawodności, stosowane do oceny niezawodności systemów prostych, w stosunku do wielu złożonych systemów technicznych nie mają żadnego sensu praktycznego [17][21][108]. Zbyt dużo uwagi poświęcają one samemu faktowi uszkodzenia, niewiele zaś mówią o wpływie uszkodzenia na końcowy efekt działania systemu.

Wiele złożonych systemów technicznych może spełniać swoje funkcje pod warunkiem, że pewna liczba elementów ich podzbiory są w stanie zdolności [17][42][47][109][114].

W wypadku gdy pewna liczba elementów systemu uległa uszkodzeniu nie zawsze mamy do czynienia z uszkodzeniem systemu lecz z pogorszeniem efektywności jego pracy [17][47][109].

Często mają miejsce również takie zdarzenia, kiedy uszkodzenia niektórych elementów nie zmieniają skuteczności działania systemu, tylko obniżają jednak jego obsłużalność lub też pozostają niezidentyfikowane [114].

Powyższe ma na celu podkreślenie, że decydującymi czynnikami w ocenie niezawodności systemów złożonych jest prawidłowe uwzględnienie skut-

ków, z punktu widzenia efektu końcowego działania systemu, do których może doprowadzić uszkodzenie tych lub innych elementów systemu [17].

Przy rozwiązywaniu problemów, związanych z oceną niezawodności rozpatrywanych systemów, należy zatem przyjąć taki punkt widzenia, który by uwzględnił zróżnicowany wpływ uszkodzeń jego elementów na niezawodność i efektywność systemu jako całości.

Jest to zadanie szczególnie ważne w badaniach tych systemów, przed którymi stawia się wysokie wymagania wynikające z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa ich użytkownika, np. w lotnictwie, górnictwie, kolejnictwie, żegludze morackiej, rolnictwie itd., jak również z konieczności zapewnienia ciągłości ich ruchu w wyznaczonym przedziale czasu, np. w rolnictwie, przemyśle spożywczym itd.

W tego rodzaju przypadkach zachodzi potrzeba wyodrębnienia z pojęcia niezawodności - pojęcia bezpieczeństwa systemu technicznego, pod którym, w sensie opisowym, należy rozumieć wg [42] odporność systemu na błędy jego działania, powodujące zagrożenie tego systemu, systemów z nim współpracujących, środowiska i życia ludzkiego. Przy tym przez błędy działania systemu rozumia się zarówno uszkodzenia systemu jak też błędy sterowania tym systemem.

Oznacza to, że bezpieczeństwo systemu technicznego determinowane jest wartością prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia zagrożenie w systemie, pod warunkiem uszkodzenia się elementu systemu lub pod warunkiem popełnienia błędu w operacji sterowania.

Jest oczywiste, że uszkodzeniem różnych elementów systemu z różnym skutkiem i z różnym prawdopodobieństwem powoduje jego zagrożenie.

Na ogół powija się milczeniem te istotne własności elementów systemów technicznych i budując modele systemów stosuje się teorię niezawodności w jej konwencjonalnej postaci, traktując elementy powiązane strukturą niezawodnościową jako elementy jednakowo ważne [108]. Przyjmuje się również często założenie odległe od stanu rzeczywistego o możliwości identyfikacji uszkodzenia każdego elementu modelu istniejącymi środkami diagnostyki.

Konieczne jest zatem inne podejście i inny sposób budowy modeli, jak również inny sposób oceny danych statystycznych w przypadku złożonych systemów technicznych niż tradycyjnie stosowane metody do oceny niezawodności systemów prostych.

Problemy oceny niezawodności złożonych systemów technicznych są poruszane w licznych publikacjach. Na uwagę zasługuje praca S. Ziembę [117], w której autor przedstawił i uwypukla specyfikę złożonych systemów technicznych oraz podaje sposób podejścia przy ocenie ich niezawodności.

Natomiast w pracach Z. Smalki [86] oraz L. Dwilińskiego [25] problematyka zostaje zawężona do oceny niezawodności złożonych systemów mechanicznych.

Zagadnienia te poruszane są również w pracach N. Buslenki, W. Kałasznikowa, I. Kowalenki [17] i A. Czerwonowa [21]. Autorzy tych prac proponują jako wskaźnik niezawodności złożonego systemu wartość różnicy

$$\Delta R_n^0 = R_n^0 - R_n^*$$

gdzie: R_n^0 - wskaźnik efektywności systemu złożonego przy założeniu, że wszystkie elementy są w stanie zdadności,

R_n^* - wskaźnik efektywności rzeczywistego systemu, w którym uszkodzenia elementów występują z intensywnością zgodną z danymi charakterystykami probabilistycznymi.

Wielkość ΔR_n^0 wskazuje jak zaniejżają się efektywność systemu w przypadku możliwych uszkodzeń elementów w porównaniu z efektywnością systemu, którego elementy przyjmuje się jako absolutnie niezawodne.

Jeżeli wartość różnicy ΔR_n^0 jest mała, oznacza to, że uszkodzenia elementów nieznacznie tylko wpływają na efektywność i niezawodność systemu.

Wyniki badań eksploatacyjnych potwierdzają celowość stosowania proponowanej miary, ponieważ istnieją w systemie elementy, których uszkodzenia decydują o jego niezawodności i efektywności [3][114].

Wyznaczenie tych elementów empirycznie jest jednak bardzo pracochłonnym i długotrwałym procesem, ponieważ omawiany wskaźnik R zależy od wielu parametrów, wśród których podstawową rolę odgrywają parametry systemu $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ oraz parametry charakteryzujące działania otoczenia $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ ($R = R/\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$), jak również z tego powodu, że system złożony zawiera dużą liczbę różnorodnych elementów o bardzo zróżnicowanej niezawodności i trwałości.

Interesująca z punktu widzenia sposobu ujęcia omawianej problematyki jest praca zbiorowa [3][114], w której autorzy przedstawiają metodę budowy modeli złożonych systemów mechanicznych. Jako punkt wyjścia do budowy prezentowanego modelu autorzy przyjęli fakt, ustalony w trakcie badań dotyczących oceny niezawodności okrętowych silników spalinowych oraz kombajnów zbożowych, że uszkodzenia poszczególnych elementów obiektu badań w różny sposób oddziałują na jego niezawodność i efektywność. Rozminięciem powyższych sugestii jest praca doktorska [109] autora niniejszego opracowania, w której przedstawiono metodę ustalania istotności elementów systemu technicznego poprzez zastosowanie wielokryterialnych ocen, dotyczących cech elementów oraz relacji zachodzących między nimi.

Z dostępnej autorowi literatury na temat niezawodności systemów technicznych oraz teorii systemów wynika, że istotność elementów systemu, przedstawiona tak jak w pracy [110], nie jest przedmiotem rozpatrywania i analizy sensu stricto w żadnej z obu wspomnianych teorii. Natomiast na uwagę zasługują prace dotyczące teorii złożonych systemów /wielkich/, w których omawia się pewne własności tych systemów, a w szczególności ich budowę hierarchiczną. W. Sadowski w pracy [82] przedstawia koncepcję hierarchicznej budowy systemów, której założenia opiera na potencjalnej podzielności elementów systemu i różnorodności sprzężeń i relacji.

Fakt potencjalnej podzielności elementów danego systemu oznacza, że

elementy te mogą być z kolei rozważane jako systemy. Jednocześnie dany system może występować jako element innego, szerszego systemu. Budowa hierarchiczna cechuje także relacje i sprzężenia dowolnego systemu, które mogą być rozłożone na bardziej elementarne, na podstawie których tworzy się systemy na niższym poziomie.

Natomiast w pracach M. Masserowica, P. Macko, Y. Takahary [66], G. Klira [50], W. Findensejns [27], R. Kulikowskiego [53] oraz H. Góreckiego w [34] i [35] rozpatruje się zagadnienia dotyczące sterowania złożonymi systemami. Podano tam kilka przykładów typowych struktur hierarchicznych. Wspólną ich cechą jest wyróżnienie relacji podrzędności i nadrzędności, zachodzących między elementami systemu i rozmieszczonych na różnych poziomach hierarchicznych.

Właściwości systemów hierarchicznych zostały omówione również w pracach A. Gosiewskiego, T. Mulicy [33], I. Gutenbauma, F. Nicole [37] oraz w pracy J. Kacprzyka, R. Weinfeldta [46] celem przedstawienia metod optymalizacji ich sterowania. Należy również zwrócić uwagę na prace G. Sestovej, A. Kockina [83], I. Vsaikova oraz K. Kapłona [47], w której autorzy analizują niezawodność i efektywność hierarchicznego systemu sterowania oraz przedstawiają propozycję miar niezawodności systemu.

Wykorzystanie wybranych zasad opisu systemów organizacyjnych i systemów sterowania; wynikających z przyjęcia koncepcji ich hierarchicznej budowy, jak również przyjęcie jako podstawy do dalszego rozważania zróżnicowanej istotności elementów systemu /por. p.4.1./ umożliwiło przedstawienie w niniejszej pracy metody budowy modeli złożonych systemów technicznych do badania ich niezawodności.

Złożone systemy techniczne zawierają zbiory elementów, które z kolei mogą być także złożonymi systemami, powiązаныmi funkcjonalnie ze sobą i podporządkowane realizacji wyznaczonych zadań.

Elementy złożonych systemów technicznych posiadają charakterystyczne dla nich cechy, pozwalające na realizowanie przydzielonych im różnych zadań w konkretnych warunkach eksploatacyjnych.

W trakcie analizy niezawodności złożonych systemów technicznych dokonujemy ich dekompozycji na podsystemy, które nazywamy elementami składowymi lub podsystemami pierwszego poziomu dekompozycji.

Każdy podsystem pierwszego poziomu dekompozycji można zdekomponować na podsystemy drugiego poziomu, podsystemy drugiego poziomu na podsystemy trzeciego poziomu itd. Proces podziału złożonego systemu na podsystemy, realizujemy tylokrotnie, aż otrzymamy podsystemy, dla których dalszy podział uznamy za niecelowy z punktu widzenia celu „zadaniowego” systemu, celu „problemowego” modelu lub względów metodycznych.

Należy podkreślić, że liczba podsystemów na każdym poziomie dekompozycji, jak również liczba tych poziomów, mogą być z reguły dowolne. Ważne jest jednak to, aby podsystemy niższego poziomu dekompozycji, współdziałające ze sobą, wypełniały wszystkie funkcje podsystemów rozmieszczonych na najbliższym, wyższym poziomie dekompozycji.

W niniejszej pracy rozważania dotyczą wszystkich podsystemów złożonego systemu, rozmieszczonych na kolejnych poziomach dekompozycji. po-

częwszy od najwyższego poziomu granicznego, a kończąc na najniższym poziomie granicznym. Nazwano je elementami złożonego systemu technicznego.

Dokonując podziału systemu na podsystemy, dekomponujemy również relacje i sprzężenia na bardziej elementarne oraz ustalamy relacje, zachodzące między podsystemami rozmieszczonymi na różnych poziomach dekompozycji.

Ustalenie takie jest w pewnym stopniu arbitralne i zależy od przyjętego punktu widzenia, który w niniejszej pracy dotyczy wpływu uszkodzeń elementów na niezawodność i efektywność podsystemów nadrzędnych, jak również podsystemów usytuowanych na wyższych poziomach dekompozycji aż do systemu jako całości włącznie.

Na tym tle wyraźnie rysuje się znaczenie problemu identyfikacji, w którym podstawowym celem jest zbudowanie adekwatnych modeli matematycznych, możliwie najlepiej, z punktu widzenia przyjętego kryterium, opisujących zachowanie się rzeczywistego systemu technicznego, a z drugiej strony na tyle prostych, że możliwa jest ich wszechstronna analiza aktualnie dostępnymi środkami.

Badania złożonego systemu w warunkach normalnej eksploatacji lub w warunkach ekstremalnych np. awaryjnych, może być przeprowadzone na drodze symulacji, najczęściej symulacji cyfrowej. Jeżeli przyjmiemy, że symulacja jest metodą badania systemów, której istotną cechą jest dokonywanie wielokrotnych prób w celu uzyskania danych pozwalających na odwzorowanie /zgodnie z założonym planem/ ciągów stanu badanego systemu, to widzimy, że problem adekwatności i systemu jest tu zagadnieniem podstawowym. Informacje uzyskane w czasie badań symulacyjnych są tylko w takim stopniu informacjami o systemie rzeczywistym, w jakim model jest odzwierciedleniem systemu.

Z metodologicznego punktu widzenia proces formułowania modelu złożonego systemu technicznego powinien być realizowany przy pomocy kolejnych etapów, poczynając od modelu możliwie najprostszego. Budowa kolejnych modeli może być przeprowadzona metodami dedukcyjnymi, które kolejną wersję modelu wyprowadzają jako logiczne następstwo modelu poprzedniego i nowych informacji o systemie rzeczywistym [105].

Z tych względów jako cel pracy przyjęto opracowanie metody budowy modeli złożonych systemów technicznych przydatnych do oceny ich niezawodności i efektywności, budowanych z wybranych a priori elementów tzw. istotnych na każdym poziomie dekompozycji, których wpływ uszkodzeń na tym poziomie posiada decydujące znaczenie w ograniczeniu możliwości realizacji zadania przez systemy rzeczywiste.

Jako punkt wyjścia do budowy modelu przyjęto opracowanie metody wyznaczania istotności elementów systemu, na każdym poziomie dekompozycji, zaczynając od górnego poziomu granicznego, a kończąc na dolnym poziomie granicznym.

Istotność podsystemu wyznaczona jest w oparciu o spełniane kryteria, ze zbioru kryteriów oceny istotności, zawierającego kryteria dotyczące :

- wpływu oddziaływania uszkodzeń tych podsystemów na możliwość realizacji zadania, przez podsystemy rozmieszczone na kolejnych po-

- ziomach nadrzędnych do systemu jako całości włącznie,
- możliwości działania czynników odnawiających,
- poziomów oddziaływania na podsystemy czynników wymuszających.

Zastosowanie kryteriów do elementów systemu umożliwi wyznaczenie ich istotności tzw. wagi pod względem niezawodnościowym oraz utworzenie z tych elementów podzbiorów o jednakowych wagach z punktu widzenia zastosowanych ocen, na każdym poziomie dekompozycji, jak również uszeregowanie tych podzbiorów według malejącej wartości wagi w tzw. warstwy.

Opracowanie metody budowy sieci sprzężeń niezawodnościowych między elementami istotnymi, wyznaczonych warstw na kolejnych poziomach, umożliwia budowę modelu, o którym jest mowa w momencie określenia celu pracy.

Regulację dokładności ocen, dotyczących niezawodności systemu rzeczywistego, zapewni możliwość wyboru do badań różnych wariantów modelu.

Różnią się one między sobą poziomem dekompozycji, na którym występujące tam podsystemy potraktowano jako niepodzielne elementy, co decyduje o poziomie szczegółowości rozpatrywania systemu rzeczywistego, jak również ilością podzbiorów elementów uznanych za istotne i sprzężonych strukturą niezawodnościową, na każdym poziomie przyjętego wariantu modelu, co decyduje o dokładności rozwiązania problemu pracochłonności i kosztach badań.

Dzięki zastosowaniu ujęcia systemowego, opracowany sposób postępowania przy budowie wielopoziomowego modelu zawierającego elementy o wyznaczonej a priori istotności, ma bardzo ogólny charakter i może być stosowany do budowy modeli przeznaczonych do badania efektywności, gotowości technicznej, funkcjonalności, możliwości odnowy itd., jak również do diagnozowania stanu tego systemu. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że proponowany model można stosować w badaniach mających na celu :

- poprawę niezawodności systemów rzeczywistych,
- ocenę bieżącą niezawodności,
- budowę systemów diagnostycznych,
- opracowanie metod diagnostycznych itd.,

ponieważ model ten umożliwi ograniczenie badań do elementów i relacji istotnych, a tym samym zwiększa efektywność tych badań w odniesieniu do kosztów, czasu badań, czasu oczekiwania na wyniki badań itd.

Opracowanie składa się z trzech części. Pierwsza część poświęcona jest przedstawieniu problemów dotyczących badań niezawodnościowych złożonych systemów technicznych, wynikających z ich specyfiki, jak również opisowi obiektu badań.

W drugiej części pracy przyjęto definicje podstawowych pojęć występujących w teorii niezawodności i teorii systemów, jak również podjęto, w oparciu o przyjęte definicje, próbę zdefiniowania i sformalizowania nowych pojęć niezbędnych do przedstawiania metody budowy proponowanego modelu.

Celem rozważań części trzeciej pracy jest ilustracja sposobu stosowania proponowanej metody, opis modelu oraz wykazanie przydatności tego modelu w zastosowaniu do badania złożonych systemów technicznych, poprzez ocenę jego efektywności, dokonaną na podstawie wyników badań eksploatacyjnych dwóch różnych obiektów badań, tj. silnika napędu głównego statku

Sulzer typu RD i kombajnu zbożowego „Bizon-Super”.

Adekwatność modeli sprawdzono w oparciu o dane statystyczne: zebrane w banku informacji o niezawodności morskich statków transportowych, istniejącym w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni oraz w oparciu o dane zawarte w banku informacji Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie. Dane dotyczą badań eksploatacyjnych 67 statków Polskiej Żeglugi Morskiej, Polskich Linii Oceanicznych oraz 30 kombajnów Państwowych Gospodarstw Rolnych.

W zakończeniu opracowania przedstawiono wnioski, wynikające z przeprowadzonych rozważań i spis cytowanej literatury.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań jest ogólnie traktowany, złożony rzeczywisty system techniczny, tzn. już istniejący. W cytowanej literaturze przedmiotu nie znaleziono zadowalającej definicji systemu technicznego. W oparciu o prace [49] i [105] przez system techniczny przyjęto rozumieć celowy wytwór człowieka z materii nieożywionej o określonym przeznaczeniu /zbiornie zastosowań/.

Spośród klasy systemów technicznych, w niniejszej pracy rozpatrywane będą głównie takie systemy, w których występują procesy dynamiczne. Sterowanie tymi procesami umożliwia wykonanie z góry postawionego zadania lub uzyskanie określonego celu. Są to systemy dynamiczne, działaniowe, z zachowaniem celowym.

Natomiast wyjaśnienia wymaga pojęcie złożoności systemu. Pojęcie to nie zostało jeszcze do tej pory jednoznacznie zdefiniowane, mimo istnienia licznych prac, dotyczących teorii omawianych systemów.

Intuicyjnie złożoność systemu kojarzy się z liczbą elementów, liczbą rozgałęzień, powiązań między elementami i stopniem ich współdziałania, kwalifikacjami personelu biorącego udział w wytworzeniu jego elementów, montażu, uruchamianiu i eksploatacji systemu, kosztami budowy systemu itd. [17].

Łatwo można zauważyć, że istniejące zrozumienie złożoności systemu uwzględnia zarówno złożoność jego struktury, złożoność warunków, jak i złożoność funkcji realizowanej przez system. Sformułowanie formalne pojęcie złożoności systemu, obejmującego ogół tych aspektów, okazuje się bardzo trudnym problemem naukowym.

Na uwagę zasługuje próba formalnego ujęcia złożoności systemu przedstawiona w pracy [17]. Autorzy złożoność systemu oceniają na podstawie przyjętego wskaźnika, którego wartość zależy od liczby elementów, liczby ich typów oraz złożoności tych elementów.

Wartość omawianego wskaźnika nie uwzględnia złożoności funkcji systemu, niemniej charakteryzuje w pewnym sensie jego strukturę.

Pod pojęciem systemów złożonych należy zatem rozumieć takie, w których wyodrębnia się oddzielne podsystemy, a każdy z tych podsystemów może być rozpatrywany jako złożony system. Wówczas możemy mówić o i -tym stopniu złożoności systemu, gdzie $i = 1, 2, \dots, n$ jest liczbą jego wyróżnionych poziomów, jak również o r -tym stopniu złożoności jego podsystemów, $r = 1, 2, \dots, n-1$.

Współczesne systemy techniczne charakteryzują się złożonością za-

chowania, istnieniem celu ogólnego, stochastycznym charakterem oddziaływania na jego wejście, automatyzację, wzajemnym oddziaływaniem jego poszczególnych podsystemów itd.

W trakcie badania systemu zostaje uwzględnione miejsce i znaczenie jego podsystemów. Podsystemy rozważa się jako względnie niepodzielne w ramach danego zadania. Przy tym własności systemu jako całości określa się nie tylko i nie tyle na podstawie własności jego poszczególnych podsystemów, ile na podstawie własności jego struktury.

Z uwagi na powyższe, obiektami badania w niniejszej pracy są wielopoziomowe, mające wiele celów, systemy techniczne. Natomiast przedmiotem badań są cechy podsystemów oraz relacje, zachodzące między podsystemami rozmieszczonymi na różnych poziomach, jak również relacje zachodzące między tymi podsystemami usytuowanymi na tym samym poziomie.



3. POJĘCIA PODSTAWOWE - PRZESŁANKI TEORETYCZNE

W niniejszym rozdziale przedstawiono, w oparciu o istniejącą literaturę, definicje wybranych pojęć, a także zdefiniowano na ich podstawie zasadnicze pojęcie konieczne do przedstawienia ciągu logicznego postępowania przy budowie modelu, o którym mówi się przy omawianiu celu pracy.

3.1. System, struktura ogólna systemu

Spośród wielu definicji systemów wybrano definicję według [107] jako najbardziej odpowiadającą tematowi niniejszej pracy :

„System jest parą uporządkowaną $\langle E, R \rangle$, składającą się ze zbioru E i ciągu R , określonego jako relacja w zbiorze E . E nazywa się zbiorem elementów a R strukturą systemu”.

Ponieważ w definicji tej nie mówi się nic ani o naturze elementów, ani o naturze relacji, to dany system abstrakcyjny $\langle E, R \rangle$ można więc interpretować w różny sposób, zależnie od znaczenia i treści, jakie nadamy zbiorowi elementów E i relacji R .

Strukturę systemu można zatem zdefiniować następująco :

„Struktura systemu jest to ciąg relacji $\langle R_1, R_2, \dots, R_u \rangle$ określonych na zbiorze elementów systemu $E = \{e_j\}$, $j = 1, 2, \dots, u$, którego składnikami są relacje od jedno do wielocłonowych”.

Relacje te zapisujemy jako podzbiory iloczynu kartezjańskiego :

$$E \times E \times \dots \times E = E^j, \quad j = 1, 2, \dots$$

Przy tym dla $j = 1$ mówimy o relacjach jednocłonowych /systemy z tzw. prostą strukturą/, dla $j = 2$ rozpatrujemy relacje dwucłonowe, $R_2 = E \times E = E^2$, dochodząc do relacji wielocłonowych $R_u = E \times E \times \dots \times E = E^j$, $j = 1, 2, \dots$.

Przedstawiona struktura systemu obejmuje wszystkie relacje, określone w zbiorze E , od jedno do j -cłonowych. Oznacza to, że struktura ta obejmuje każdą z możliwych relacji jaka w trakcie badań, z dowolnego punktu widzenia, może okazać się przedmiotem naszego zainteresowania. Z uwagi na powyższe przedstawioną strukturę nazwano strukturą ogólną systemu.

Jak widać, struktura ogólna systemu jest określona na zbiorze elementów /podsystemów/ systemu E , między którymi zachodzą określonego ro-

działu, relacje, nadające systemowi charakter całości.

Mówiąc najogólniej struktura wiąże w całość podsystemy, realizujące różne cele cząstkowe, w taki sposób, aby mógł być zrealizowany cel globalny systemu. Sposób działania jest właściwością systemu jako całości, zależy bowiem nie tylko od sposobu działania poszczególnych podsystemów, ale także od struktury systemu. System posiada własności różniące się od własności jego podsystemów i nie dające się sprowadzić do sumy tych własności tych podsystemów. Jednocześnie system podlega właściwym sobie prawom funkcjonowania, których nie można wyprowadzić tylko z praw funkcjonowania jego podsystemów /elementów/.

3.2. Budowa systemu

Celem budowy systemu jest uchwycenie tych czynników z rzeczywistego świata, do których przywiązujemy wagę z punktu widzenia rozwiązania postawionego problemu. Z charakteru problemu wynika aspekt umożliwiający nam zredukowanie różnorodnych czynników rzeczywistości tylko do określonych cech [16][75][102].

Zredukowanie dużej ilości różnorodnych czynników do najistotniejszych, z przyjętego punktu widzenia, jest najważniejszą efektem metodycznego podejścia systemowego [102].

Budowa systemu w ramach obiektywnej rzeczywistości oznacza, że rozpoczynamy systematyczne poszukiwanie i ustalanie ilościowego charakteru zjawisk i prawidłowości. Takie ustalenie oznacza, że wyróżnia się pewne wielkości, charakteryzujące rzeczywistość i w wyniku eksperymentów ustala się związki pomiędzy tymi wielkościami, wyrażone w postaci odpowiednich wzorów, tabel, wykresów itd. W badanym problemie określamy elementy, sprzężenia, decydujemy co należy uznać w otoczeniu za istotne lub nieistotne, rozważamy relacje itd.

Właściwe ustalenie celu /celów/ systemu jest równoznaczne z właściwym postawieniem problemu. Aby tego dokonać poprawnie, należy rozpatrywać cele systemu na tle systemu nadrzędnego, względem którego rozpatrywany system spełnia wyznaczoną funkcję. Należy przy tym pamiętać, że system nadrzędny również posiada swój cel, strukturę oraz podsystemy. Przy tym jednym z nich jest właśnie system rozpatrywany [61][118].

To, jak system zostaje wyodrębniony, co jest w nim zauważone i uwzględnione, a co pominięte, zależy od celu podjętych badań, od sensu istnienia tej całości, widzianej jako system i od postawionych przed nią zadań [118].

Obowiązują tu rygory uwzględnienie nie tylko podsystemów, składających się na dany system, lecz i nadsystemów stanowiących jego otoczenie oraz powiązania z innymi systemami tych nadsystemów [61]. Na to bowiem, jaki jest i jaki ma być dany system, wpływają nie tylko cechy tworzących go składników /podsystemów, elementów/, ale również cechy nadsystemów, do których on należy, gdyż z nadsystemów pochodzą zadania stawiane systemowi,

z zatem ogólny charakter, jego struktura i funkcje wszystkich jego skłódników [102].

Zbudowanie systemu oraz jego przedstawienie wymaga realizacji następujących zadań :

- zdefiniowania obiektu badań /fragmentu rzeczywistości/, zbadanie zachowanie się obiektu, względnie jego działania /funkcjonowania/,
- wyznaczenie zioru celów, które rozważany obiekt ma realizować,
- sformułowania celu systemu w oparciu o cel badań obiektu oraz sprawdzenie prawidłowości jego sformułowania,
- wyboru elementów systemu,
- wyboru elementów otoczenia systemu,
- wyboru istotnych sprzężeń między elementami systemu,
- wyboru istotnych sprzężeń systemu z jego otoczeniem,
- wyboru sposobu przedstawienia systemu /forma graficzna, macierzowa, model matematyczny itd./.

Należy przy tym przestrzegać rygorów metody systemowej, przedstawionych przez M.Mazura w pracy [62]. Jako najważniejsze z nich można wymienić :

- ścisłość ; system powinien być ściśle określony, aby było wiadomo, co do niego należy, a co nie należy ; określenie systemu może być bardzo ogólne, ale nie ogólnikowe,
- niezmiennóć jego określenia, co nie oznacza niezmiennóci samego systemu,
- zupełność podziału systemu na podsystemy powinien być zupełny, co oznacza, że system nie może zawierać elementów nie należących do żadnego z jego podsystemów,
- rozłączność ; podział systemu na podsystemy powinien być rozłączny,
- funkcjonalność ; systemy powinny być wyodrębnione ze względu na spełniane funkcje.

Gdy system został określony, staje się on przedmiotem badań. Określa się go przez wyszczególnienie zmiennych, podanie zbiorów ich dopuszczalnych wartości i pewnych własności abstrakcyjnych, które określają relacje między danymi zmiennymi, specyficznie dla danej dyscypliny.

W stosunku do szerokiej klasy systemów adekwatne rozumienie ich zachowania można osiągnąć tylko pod warunkiem ujawnienia ich charakterystyk celowościowych, tzn. opisu ich zachowania jako ukierunkowanego na pewien cel ; zakłada to klasyfikację różnych celów systemu, ustalenie zależności hierarchicznych między celami różnych poziomów dekompozycji systemu, analizę systemu, analizę charakteru wzajemnych powiązań między celami i podcelami systemu /ich kooperacje, konflikt itd./.

Ujęcie systemowe pozwala rozpatrzyć w systemie jako całości : wieloródzajowość /elementów i relacji/, wielokierunkowość /funkcjonalność, efektywność, niezawodność, naprawialność, diagnozowalność, ergonomiczność itd./, wielopłaszczyznowość /rozpatrywanie specyficznych relacji i sprzężonych nimi elementów leżących w pewnej płaszczyźnie przestrzeni wielowymiarowej parametrów cech elementów/, wielopoziomowość /wynikającą ze stopnia szczegółowości rozpatrywania systemu/, wielocelowość itd.

3.3. Model systemu

Formalne ujęcie zagażeń, związanych z analizą oraz syntezą systemów technicznych, rozpoczyna się etapem modelowania. Ze względu na złożoność i różnorodność zjawisk i procesów, występujących w systemach rzeczywistych, trzeba zaniedbać pewne własności tych systemów i rozpatrywać systemy uproszczone, wyidealizowane.

Proces, którego celem jest zbudowanie najlepszego w określonym sensie modelu systemu, a w szczególności modelu matematycznego, nazywamy procesem identyfikacji.

Przez model, według W.Sztoffa [92] rozumie się taki dający się pomyśleć lub materialnie zrealizować układ, który odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania, zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nam nowej informacji o tym przedmiocie.

Przedmiot badania oznacza tu system, którego cechy chcemy przy pomocy modelu opisać.

Definicja W.Sztoffa nie uwypukla jednej z podstawowych cech modelu, a mianowicie faktu, że model jest zawsze uproszczeniem, idealizacją badanego procesu lub systemu, co dyktuje cel badań, któremu model ma służyć. Model powinien uchwycić istotne związki badanych zjawisk pomijając inne. Podział na zjawiska istotne i nieistotne zależy od specyfiki systemu lub procesu, od pytań na które chcemy uzyskać odpowiedź i od aktualnych możliwości pomiarowych i obliczeniowych.

W przypadku modelowania złożonych systemów technicznych wyróżnić można dwa etapy: budowanie modelu wstępnego tzw. nominalnego i budowanie modelu wynikowego, będącego z reguły modelem matematycznym, stanowiącym analityczny opis modelu nominalnego.

Przyjęty w pracy sposób realizacji procesu modelowania pozwala na sformułowanie zasad budowy modelu nominalnego, którego opis zawiera zdefiniowaną strukturę i charakterystyki elementów składowych z przyjętego punktu widzenia oraz modelu wynikowego, tzw. strukturalnego, którego organizacja jest podobna do organizacji systemu technicznego i zachodzi odpowiedniość elementów modelu i elementów systemu /homomorfizm/.

Organizacja systemu według [69] jest to sposób rozmieszczenia struktury systemu w zależności od miejsca, czasu oraz funkcji. Organizacja systemu ustala nie tylko własność uporządkowania jego elementów, sprzężeń i relacji, ale także specyficzne dla każdego systemu wzajemne stosunki między jego elementami, podsystemami, poziomami itd. oraz znaczenie ich, wkładu do ogólnego funkcjonowania systemu [82].

Celem organizacji systemu jest stworzenie mu możliwości wykazania pożądanego zachowania, z reguły z góry określonego.

Zbudowanie adekwatnego modelu nominalnego i strukturalnego wymaga zgromadzenia zbioru informacji o modelowanym systemie rzeczywistym. Informacje te powinny dotyczyć zarówno jego cech wewnętrznych i sposobu oddziaływania czynników zewnętrznych, jak i celu samych badań [69]. Informacje takie uzyskuje się z eksperymentów, z wyników badania modeli pośrednich, wreszcie na podstawie doświadczenia, zgromadzonego przy badaniu sy-

stemów podobnych. Im więcej wiemy o systemie rzeczywistym, tym dokładniej, trafniej i logiczniej możemy wyznaczyć bezpośredni cel badań, tym lepiej i stosowniej możemy dobrać model, za pomocą którego chcemy osiągnąć cel badań, tym dokładniej potrafimy wyznaczyć obszar niewiedzy o systemie rzeczywistym [105].

Następnym krokiem procedury modelowania jest podjęcie decyzji, dotyczących rozgraniczenia zgromadzonych informacji na istotne i nieistotne dla danego celu lub w danym etapie badań. Jedną z najistotniejszych jest tu decyzja o wyodrębnieniu fragmentu rzeczywistości z uniwersum i zbudowaniu na tym fragmencie systemu. Wyodrębnienie systemu jest równoznaczne z podziałem rzeczywistości na dwa układy, z którym jednym jest system rozpatrywany, drugim zaś reszta rzeczywistości, określana jako otoczenie systemu.

Model systemu rzeczywistego powinien z żądaną dokładnością opisywać zachowanie się tego systemu pod wpływem oddziaływania czynników wymuszających. Proces poszukiwania adekwatnego modelu prowadzi się często metodą iteracyjną, modyfikując model drogą pominięcia elementów i sprzężeń mniej ważnych, ze względu na oczekiwane działanie systemu. Przy żądanej dokładności /kryterium jakości/, zgodność modeli i systemu rzeczywistego osiąga się drogą kolejnych udoskonaleń, które zostają zakończone w momencie, gdy błąd nie przekracza założonej wartości. Taka procedura prowadzi do uzyskania modelu, uwzględniającego minimalną liczbę własności niezbędnych, aby reprezentować zachowanie się systemu rzeczywistego z punktu widzenia celu, któremu model ma służyć.

3.4. Dekompozycja systemu

Dla uściślenia rozważań, dotyczących dekompozycji i systemu, zdefiniowano podstawowe pojęcia, niezbędne do przedstawienia zasad jej realizacji.

Podsystem danego systemu $\langle E, R \rangle = \langle E, R_1, R_2, \dots \rangle$, nazywać będziemy systemem $\langle E_1, R^{(1)} \rangle = \langle E_1, R_1^{(1)}, R_2^{(1)}, \dots \rangle$, gdzie: $E_1 \subset E$ jest podzbiorem zbioru E , natomiast $R^{(1)}$ jest tak zwaną podstrukturą struktury R , spełniającą następujący warunek:

$$R^{(1)} \subset R \quad | \quad E_1$$

co oznacza, że $R^{(1)}$ jest ciągiem relacji ograniczonych do zbioru E_1 .

Pojęcie podstruktury można uogólnić do zbioru E . Wówczas podstrukturę systemu $\langle E, R \rangle$ można przedstawić jako strukturę systemu $\langle E, R^{(i)} \rangle$, gdzie $R^{(i)} \subset R$. Oznacza to, że podstrukturę $R^{(i)}$ systemu $\langle E, R \rangle$, zbudowaną z pewnego wyróżnionego punktu widzenia, stanowią niektóre, wyróżnione wyrazy ciągu relacji R_1, R_2, \dots , odnoszące się do zbioru E . Pozostałe wyrazy ciągu zostają odrzucone.

Dekompozycja systemu związana jest z pojęciem podziału systemu na

podsystemy.

Przez podział systemu na podsystemy rozumie się przedstawiienie systemu jako złożenia rozłącznych podsystemów, co można przedstawić następująco :

$$\langle E, R \rangle = \langle E_1, R^{(1)} \rangle \cup \langle E_2, R^{(2)} \rangle \cup \dots \cup \langle E_m, R^{(m)} \rangle$$

Przy tym dwa podsystemy $\langle E_1, R^{(1)} \rangle$, $\langle E_2, R^{(2)} \rangle$ nazywamy rozłącznymi wtedy, gdy $E_1 \cap E_2 = \emptyset$, natomiast ich łączna struktura :

$$R_{12} = R \setminus [(E_1 \cup E_2) \setminus R | E_1 \setminus R | E_2] \neq \emptyset$$

Uogólniając powyższe na m-podsystemów otrzymamy :

$$E_i \cap E_j = \emptyset \quad \text{dla } i \neq j \in \overline{1, m} \quad \text{oraz } R_{ij} \neq \emptyset$$

Należy przy tym mieć na uwadze, że przy podziale systemu na m-podsystemów występuję nie tylko relacje dwuargumentowe R_{ij} ale również trójargumentowe R_{ijk} , $i \neq j \neq k \in \overline{1, m}$, itd. aż do m-argumentowych włącznie.

Przyjmując powyższe, należy stwierdzić, że dokonując podziału systemu, celem jego analizy z pewnego wyróżnionego punktu widzenia, powinno się stosować zasadę wydzielenia podsystemów tak, aby ich łączne struktury

$$R_{ij} = R \setminus R | E_i \setminus R | E_j, \quad i \neq j \in \overline{1, m}$$

$$R_{ijk} = R \setminus R | E_i \setminus R | E_j \setminus R | E_k, \quad i \neq j \neq k \in \overline{1, m}$$

$$R_{ij\dots m} = R \setminus R | E_i \setminus R | E_j \dots \setminus R | E_m, \quad i \neq j \neq \dots \neq m \in \overline{1, m}$$

były jak najprostsze.

Wyodrębnianie podsystemów w systemie, jest podstawowym zadaniem, realizowanym w trakcie dekompozycji. Jest to zadanie polegające na podziale całości na części w taki sposób, aby suma tych części stanowiła całość. Nakładamy przy tym warunek, aby części - podsystemy wyodrębnione były w sposób zapewniający im możliwość realizacji podcelów /celów lokalnych/, składających się na cel ogólny /globalny/ systemu [62][107].

Przyjęcie przedstawionych zasad, dotyczących podziału systemu na podsystemy, umożliwia zdekomponowanie systemu na m-podsystemów w oparciu o kryterium celów /tzw. kryterium funkcjonalne/. Znaczy to, że znamy lub zakładamy cel ogólny $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ działania systemu S , tzn. $S \Rightarrow P$, a poszukujemy podsystemów realizujących zadania P_1, P_2, \dots, P_m , wynikające z zadania ogólnego P , tzn. $P_j \Rightarrow s_j$ przy tym $R^{(j)} = R | E_j$.

Zatem, aby zdekomponować system, zadanie ogólne P należy rozpatrywać jako zbiór podzadań $P = \{P_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, które są spełniane przez wyodrębnione podsystemy.

Przyjmując, że każde z zadań P_j można opisać poprzez predykat je-

dnioargumentowy $f_j(s)$, gdzie s_j stonowią podsystemy, do których odno-
szę się zmienne indywidualne, $S = \{s_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, to :

$$\exists_{s_j} [f_1(s) \wedge f_2(s) \wedge \dots \wedge f_m(s)] \rightarrow \exists_{s_j} f_1(s) \wedge \exists_{s_j} f_2(s) \wedge \dots \wedge \exists_{s_j} f_m(s)$$

zatem :

$$\langle E, R \rangle = \langle E_{1,R}^{(1)} \rangle \cup \langle E_{2,R}^{(2)} \rangle \cup \dots \cup \langle E_{m,R}^{(m)} \rangle$$

przy tym : $E_i, E_j = \emptyset$, dla każdego $i \neq j$, $i, j \in \{1, \dots, m\}$.

Z powyższego wyniku, że dekompozycja zbioru elementów systemu na pod-
zbiory E_j implikuje dekompozycję ciągu relacji R na podciągi typu R_1 ,
 R_{1j} , R_{1jk} , itd. typu :

$$R_1 = R \setminus R|E_1$$

$$R_{1j} = R \setminus R|E_1 \setminus R|E_j$$

$$R_{1jk} = R \setminus R|E_1 \setminus R|E_j \setminus R|E_k$$

$$R_{1j\dots m} = R \setminus R|E_1 \setminus R|E_j \setminus \dots \setminus R|E_m$$

Przedstawiony podział wyznacza pierwszy poziom dekompozycji systemu.
Ogranicza on szczegółowość rozpatrywania systemu do wyznaczonych pod-
systemów s_j oraz relacji zachodzących między nimi. Zatem aby dokonać ana-
lizy relacji zachodzących między elementami systemów s_j , podsystemy te
należy również zdekomponować, zgodnie z przedstawionymi powyżej zasadami.

Proces dekompozycji realizujemy, w stosunku do wyodrębnionych pod-
systemów tylokrotnie, aż otrzymane podsystemy, na i -tym poziomie dekom-
pozycji uznamy jako niepodzielne elementy, dla których z punktu widzenia
celu badania nie przewiduje się dalszego ich podziału.

Można zatem przyjąć, że dla złożonego systemu technicznego S , jest
zawsze możliwy podział tego systemu na podsystemy s_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$,
 $j = 1, 2, \dots, m_1$, spełniające wyznaczone podzadania P_{ij} i rozmieszczone
na różnych poziomach dekompozycji [20][21], przy czym :

i - oznacza wskaźnik poziomu dekompozycji /krotność dekompozycji/ ;

j - oznacza wskaźnik podsystemu na i -tym poziomie dekompozycji.

3.4.1. Postać graficzna zdekomponowanego systemu

Zdekomponowany system S można przedstawić za pomocą grafu skiero-
wanego G .

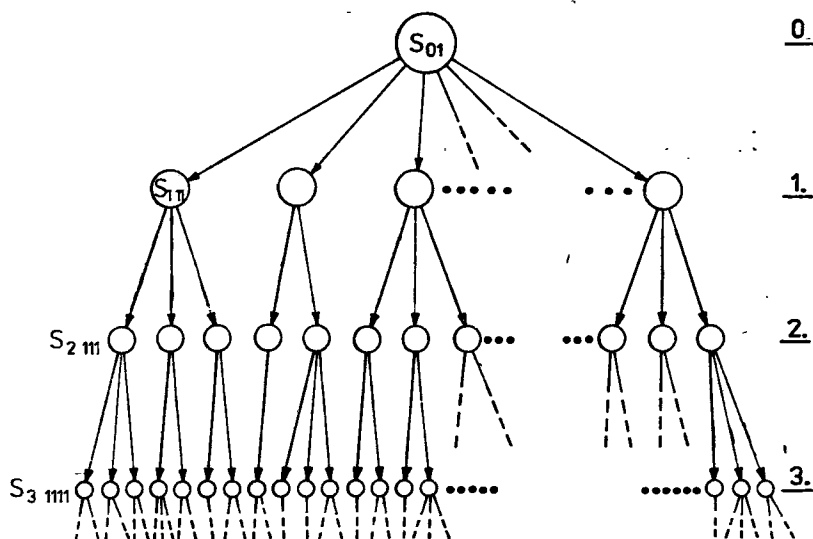
Graf skierowany G składa się ze zbioru wierzchołków $V = \{v_1, v_2, \dots\}$
zbioru krawędzi $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots\}$ i odwzorowania Π , które prze-

każdą krawędź w pewną uporządkowaną parę wierzchołków.

Do graficznego przedstawienia zdekomponowanego systemu najdogodniej wykorzystać graf-drzewo H , będące grafem spójnym bez obwodów, tj. nie mającym ani pętli własnych, ani krawędzi równoległych. Oznacza to, że w grafie H istnieje tylko jedna droga między każdą parą wierzchołków /rys.3.1/.

Przy tym o grafie H mówimy, że jest rozgałęzieniem jeśli :

- graf H nie zawiera obwodów skierowanych, ani cykli, ani pól-cykli ;
- w grafie H istnieje dokładnie jeden wierzchołek V o zerowym stopniu wejściowym, tzw. korzeń.



Rys.3.1 Graficzne przedstawienie wielopoziomowego systemu

Rozgałęzienie jest zatem drzewem, w którym każdy wierzchołek różny od korzenia ma stopień wejściowy dokładnie równy jedności. Przez stopień wejściowy wierzchołka rozumie się liczbę krawędzi incydentnych w wierzchołku v_i ($d^+(v_i)$), natomiast liczbę krawędzi incydentnych z wierzchołkiem v_i ($d^-(v_i)$) nazywamy stopniem wyjściowym.

W rozpatrywanym grafie skierowanym H suma wszystkich stopni wejściowych jest równa sumie wszystkich stopni wyjściowych, to znaczy :

$$\sum_{i=1}^k d^+(v_i) = \sum_{i=1}^k d^-(v_i)$$

Na rys.3.1 wierzchołek rozgałęzienia przedstawia system $s_{0,1}$ na zerowym poziomie dekompozycji. Wierzchołki na pierwszym poziomie rozpa-trywanego grafu, przedstawiają podsystemy $s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1, n_1}$ wyodrębnione w systemie $s_{0,1}$.

Dekomponenty podsystemów $s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1, n_1}$, odwzorowano na drugim poziomie grafu.

Wierzchołki na poziomie ostatnim, będące wierzchołkami stopnia pierwszego tzw. wiszącymi, dla których

$$d^+(v) + d^-(v) = 1$$

odwzorowują elementy niepodzielne systemu, z punktu widzenia celu podjętych badań.

Rozgałęzienie przedstawiona na rys.3.1 jest drzewem wychodzącym, tzn. drzewem skierowanym od korzenia. Odwracając skierowanie każdej krawędzi w rozgałęzieniu tworzymy graf, który można nazwać wchodzącym drzewem.

W przedstawionym rozgałęzieniu istnieje otwarta droga skierowana tzw. ścieżka skierowana, od korzenia do dowolnego wierzchołka, będąca ciągiem występujących na przemian wierzchołków i krawędzi, zaczynającym się od korzenia $s_{0,1}$ i kończącym się na wierzchołku wiszącym, w której każdy wierzchołek nie pojawia się więcej niż jeden raz. Jednocześnie każda krawędź, zorientowana od wierzchołka ją poprzedzającego do wierzchołka występującego po niej, przedstawia relację przynależności podsystemu do systemu z wyższego poziomu.

Przypisanie każdemu z wierzchołków grafu jednej i tylko jednej nazwy lub etykiety /graf zaetykietowany/, ułatwia identyfikację systemu. Natomiast analiza ścieżek skierowanych w grafie umożliwia weryfikację przyjętych zasad podziału systemu na podsystemy, prawidłową identyfikację elementów w systemie, jak również wykorzystanie funkcji zdaniowych do opisu zależności między elementami oraz opisu typowych struktur.

Rozpatrzmy funkcję zdaniową opisującą powiązania między wierzchołkami grafu zorientowanego H . Niech graf H ma N wierzchołków ponumerowanych w pewnej kolejności oraz niech $B(ij, kl)$ będzie funkcję przyjmującą wartość 1, gdy od wierzchołka ze wskaźnikiem ij do wierzchołka ze wskaźnikiem kl przechodzi krawędź ij, kl oraz wartość 0 - w przeciwnym razie. Funkcję $B(ij, kl)$ będziemy rozpatrywali jako dwuczłonową funkcję zdaniową, której zmienne nazwowe przyjmują wartość $i, k = 1, 2, \dots, n, j, l = 1, 2, \dots, m_1$.

Jeżeli jedna ze zmiennych nazwowych dwuczłonowej funkcji zdaniowej zostanie ustalona, np. $ij = 1$, to funkcję zdaniową $B(11, kl)$ będzie jednoczłonową funkcję opisującą istnienie krawędzi wychodzących z wierzchołku nr 11 i biegnących do innych wierzchołków grafu $k = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, \dots, m_k$.

Tak na przykład, zmienna logiczna

$$z = (\forall kl) B(11, kl)$$

przyjmując wartość 1 wtedy i tylko wtedy, gdy od wierzchołka nr 11 poprowadzone są do pozostałych wszystkich wierzchołków krawędzie 11, k1, k = 1, 1, ..., n, l = 1, 2, ..., m_k. Powyższą zależność można zastąpić zależnością równoważną :

$$z = B(11,01) \wedge B(11,12) \wedge B(11,13) \wedge \dots \wedge B(11,1m_1) \\ \wedge B(11,21) \wedge B(11,22) \wedge \dots \wedge B(11,2m_2) \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \wedge B(11,n1) \wedge B(11;n2) \wedge \dots \wedge B(11,nm_n)$$

Natomiast zmienna logiczna

$$z' = (\exists k1) B(11,k1)$$

przyjmuje wartość 1, jeżeli istnieje chociażby jedna krawędź, wychodząca z wierzchołka nr 11 danego grafu. Wówczas :

$$z' = B(11,01) \vee B(11,12) \vee \dots \vee B(11,1m_1) \vee \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \vee B(11,n1) \vee B(11,n2) \vee \dots \vee B(11,nm_n) \vee$$

Przedstawione ujęcie opisu zdekomponowanego systemu ukazuje wybrane związki, zachodzące między systemem a jego podsystemami, między podsystemami a ich dekomponentami itd., rozmieszczonymi na różnych poziomach grafu, reprezentowanych przez krawędzie skierowane grafu.

Natomiast przedstawienie systemu w postaci grafu wchodzącego ułatwia analizę zależności zachodzących między elementami systemu rozmieszczonymi na niższych poziomach grafu a podsystemami na kolejnych wyższych poziomach.

Zatem system techniczny, przedstawiony na rys.3.1 można opisać w następujący sposób :

System S_i stanowi rodzinę podsystemów [5][10][22] :

$$S = \bigcup_{i=0}^n S_i$$

przy tym :

$$S_i = \{s_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m_i, i = \text{const.}\}$$

gdzie : s_{ij} - j-ty podsystem i-tego poziomu dekompozycji

i = 0, 1, 2, ..., n

n - ilość poziomów dekompozycji

m_i - ilość podsystemów na poziomie dekompozycji "i"

W systemie istnieją podsystemy bezpośrednio ze sobą powiązane i rozmieszczone na różnych poziomach, których sprzężenia można opisać relacją Θ , przedstawiającą zależności funkcjonalne zachodzące między podsystemami

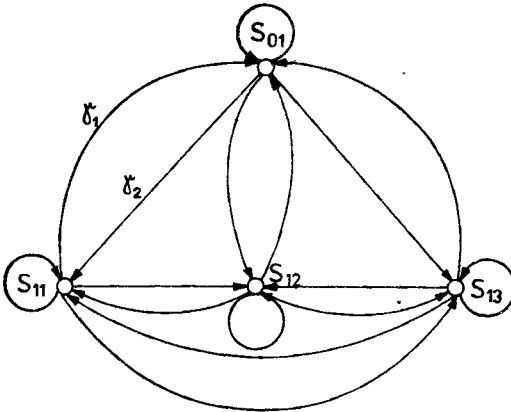
$$(s_{ij}, s_{lk}) \in \Theta \subset S \times S$$

przy tym każdy podsystem na poziomie $p < s$, $s_{pj} \in S_p$ jest bezpośrednio połączony z co najmniej jednym podsystemem poziomu wyższego $l < p$. Wówczas na poziomie na wyższym /zerowym/ istnieje jeden system, dla którego zachodzi :

$$(s_{01} = 1) \wedge (\exists s_{pj} \in S_p \cdot \forall s_{lk} \in S (s_{pj}, s_{lk}) \in \Theta \wedge (p = l + 1))$$

3.5. Struktura ogólna systemu jako graf pełny skierowany

Do opisu i badania zależności, zachodzących między dowolnymi elementami systemu, wykorzystano pełny asymetryczny graf skierowany, zbudowany na wierzchołkach grafu-drzewa, w którym każdy wierzchołek jest połączony z każdym innym wierzchołkiem przez dokładnie jedną krawędź skierowaną /rys.3.2/.



Rys.3.2 Pełny, asymetryczny graf skierowany o czterech wierzchołkach

W grafie tym relacje jednoczłonowe R_1 , jako relacje przynależności elementów do zbioru, przedstawione są poprzez odwzorowanie podsystemów w postaci jego wierzchołków, relacje dwuczłonowe R_2 jako krawędzie skierowane między dwoma, dowolnymi wierzchołkami /np. γ_1, γ_2 /, relacje trójczłonowe R_3 jako ścieżki skierowane, zawierające uporządkowane w ciągu trzy dowolne wierzchołki, itd.

Powyższe ujęcie ułatwia rozpatrzenie zależności, zachodzących między

podsystemami usytuowanymi na różnych poziomach dekompozycji poprzez analizę ścieżek skierowanych, obwodów skierowanych itp.

Dla tak przedstawionego grafu o m -wierzchołkach, nie zawierającego krawędzi równoległych, macierz relacji M , będąca macierzą zero-jedynkową o wymiarach $m \times m$ o elementach

$$x_{ij,kl} \begin{cases} = 1, \text{ gdy istnieje krawędź skierowana od } ij\text{-tego-wierzchołka do } kl\text{-tego wierzchołka} \\ = 0, \text{ w przeciwnym wypadku} \end{cases}$$

gdzie : $i, k = 1, 2, \dots, n$. $j, l = 1, 2, \dots, m_n$, zawiera tylko elementy niezerowe

$$\begin{array}{c} s_{01} \\ s_{1.11} \\ \vdots \\ s_{2.111} \\ \vdots \\ s_{ijm} \\ \vdots \\ s_{n,m_n} \end{array} \begin{bmatrix} s_{01} & s_{1.11} & s_{2.111} & s_{ijm} & s_{n,m_n} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 \dots 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Z macierzy M wynika celowość stosowania zasad nauki upraszczenia ułatwiających eliminowanie z pola widzenia elementów i relacji nieistotnych dla realizowanych badań, w wyniku czego z macierzy M uzyskujemy elementy zerowe. Należy zatem pamiętać, aby przy budowie macierzy relacji systemu uwzględnić wzajemne oddziaływania między wybranymi elementami systemu w sposób dostatecznie szeroki, ale nie zupełny.

Oznacza to, że wzajemne powiązania wybranych elementów należy uwzględnić tak, by reprezentowały one tylko istotne związki zachodzące w systemach rzeczywistych z przyjętego punktu widzenia.

3.6. Znaczenie i zakres pojęcia sprzężenia elementów systemu technicznego

W pracy [56] O.Lange zdefiniował sprzężenie między dwoma elementami systemu jako połączenie wektora wyjściowego pierwszego elementu z wektorem wejściowym drugiego elementu. Oznacza to, że sprzężenie elementu e_1 z elementem e_2 ma miejsce w tym przypadku, gdy wartości wszystkich

lub niektórych wejść elementu e_1 "przenoszą się" na wartości wszystkich lub niektórych wejść elementu e_2 .

Jednak z analizy systemu technicznego wynika, że o sprzężeniach jego elementów można mówić nie tylko we wskazanym sensie.

W oparciu o prace W.Sadowskiego [82], S.Mynarskiego [70] oraz prace N.P.Buslenki, N.P.Kołasznikowe, I.N.Kowalenki [17] i inne, można wyróżnić następujące formy sprzężeń między podsystemami w systemie :

- sprzężenie proste bezpośrednie lub pośrednie,
- sprzężenie nie wprost.

Do opisu sprzężeń w systemie można wykorzystać rachunek predykatów. W systemie zawierającym podsystemy s_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 0, 1, 2, \dots, m_1$, $j = 0$, odpowiada otoczeniu systemu/ przyjmowanie przez podsystem s_{ij} sygnałów wyjściowych od podsystemu s_{kl} , $k = 1, 2, \dots, n$, $l = 0, 1, \dots, m_1$, można opisać poprzez predykat dwuargumentowy $\omega_{ij,kl}^0$, który przyjmuje wartość 1, gdy sygnał wyjściowy podsystemu s_{kl} pojawia się w postaci sygnału wejściowego w podsystemie s_{ij} i 0 w przypadku przeciwnym.

Podobnie można przyjąć predykat $\xi_{ij,kl}$, który przyjmuje wartość 1 gdy podsystem s_{ij} przyjmuje sygnały sterujące od podsystemu s_{kl} i przyjmuje wartość 0 w przypadku przeciwnym.

Natomiast predykat $\eta_{ij,kl}$ opisuje wysyłanie sygnałów przez podsystem s_{ij} do podsystemu s_{kl} . Powyższe można opisać następującą zależnością :

$$\xi_{ij,kl} \vee \eta_{ij,kl} = \omega_{kl,ij}$$

Zatem zależność między dwoma podsystemami s_{ij} , s_{kl} można opisać poprzez predykat dwuargumentowy :

$$\omega_{ij,kl} = \xi_{ij,kl} \vee \eta_{ij,kl}$$

oznacza to, że podsystem s_{ij} przyjmuje sygnały wejściowe lub sterujące od podsystemu s_{kl} lub wysyła sygnały wyjściowe do podsystemu s_{kl} , które dla tego podsystemu mogą być sygnałami wejściowymi lub sterującymi.

Sygnał wejściowy $x \in X$ może być opisany w postaci

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_u)$$

gdzie : $x_i \in X_i$

$i = 1, 2, \dots, u$

X_i są danymi zbiorami.

Iloczyn kartezjański :

$$\hat{X} = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_u$$

jest przestrzenią sygnałów wejściowych podsystemu. Sygnał wejściowy x jest zatem punktem w przestrzeni \hat{X} , opisanym współrzędnymi x_1, x_2, \dots, x_u .

Podobnie dla sygnału sterującego $\gamma \in T$, $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r)$, $\gamma_j \in T_j$, $j = 1, 2, \dots, r$:

$$\hat{T} = T_1 \times T_2 \times \dots \times T_r$$

jest przestrzenią sygnałów sterujących. Sygnał wyjściowy $y \in Y$, $y = \langle y_1, y_2, \dots, y_s \rangle$, $y_l \in Y_l$, $l = 1, 2, \dots, s$:

$$\hat{Y} = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_s$$

jest przestrzenią sygnałów wyjściowych.

Jeżeli wyznaczmy sygnały wyjściowe podsystemu s_{ij} , które pojawiają się w systemie s_{kl} w postaci sygnałów wejściowych, przez $y_x^{(ij,kl)}$ to $y_x^{(ij,kl)} \subset Y^{ij}$ jest zbiorem sygnałów wyjściowych podsystemu s_{ij} . Podzbiór $y_x^{(ij,kl)}$ może być zarówno pusty, gdy sygnały wyjściowe podsystemu s_{ij} nie przejawiają się w podsystemie s_{kl} w postaci sygnałów wejściowych lub pokrywać się ze zbiorem Y^{ij} , gdy dowolny sygnał $y^{ij} \in Y^{ij}$ jest sygnałem wejściowym dla podsystemu s_{kl} .

Analogicznie możemy wyznaczyć podzbiory $x_y^{(ij,kl)}$ sygnałów wejściowych podsystemu s_{ij} oraz podzbiór $T_y^{(ij,kl)}$ sygnałów sterujących przyjmowanych przez podsystem s_{ij} od podsystemu s_{kl} .

Wówczas :

$$\begin{aligned} \xi_{ij,kl} &= 1 \quad \text{gdy } x_y^{(ij,kl)} \neq \emptyset \quad \text{oraz} \quad \xi_{ij,kl} = 0 \quad \text{gdy } x_y^{(ij,kl)} = \emptyset \\ \zeta_{ij,kl} &= 1 \quad \text{gdy } T_y^{(ij,kl)} \neq \emptyset \quad \text{oraz} \quad \zeta_{ij,kl} = 0 \quad \text{gdy } T_y^{(ij,kl)} = \emptyset \\ \eta_{ij,kl} &= 1 \quad \text{gdy } y_x^{(ij,kl)} \neq \emptyset \quad \text{oraz} \quad \eta_{ij,kl} = 0 \quad \text{gdy } y_x^{(ij,kl)} = \emptyset \end{aligned}$$

Podsystemy s_{ij} i s_{kl} są zatem bezpośrednio powiązane w danym systemie jeżeli :

$$[\eta_{ij,kl} \vee \eta_{kl,ij}] = 1$$

co oznacza, że :

$$[\xi_{ij,kl} \vee \zeta_{ij,kl} \vee \xi_{kl,ij} \vee \zeta_{kl,ij}] = 1$$

Natomiast podsystemy s_{ij} i s_{kl} są powiązane pośrednio jeżeli nie zachodzi między nimi powiązanie bezpośrednie i istnieją podsystemy sąsiednie s_{pq} , $p = 1, 2, \dots, n$, $q = 1, 2, \dots, m_n$, z którymi te podsystemy są bezpośrednio powiązane.

Pierwszy z wymienionych warunków opisuje predykaty :

$$\eta_{kl,ij} = 0, \quad \xi_{kl,ij} = 0, \quad \zeta_{kl,ij} = 0$$

natomiast warunek drugi, następujący predykat :

$$\mathcal{P}(i_j, k_l) = \mathcal{E}(p_q, i_j) \vee \mathcal{E}(p_q, i_j) \wedge \eta(p_q, k_l) = 1$$

W powiązaniach pośrednich między podsystemami systemu należy wyróżnić silne i słabe powiązania.

Dwa podsystemy s_{i_j} i s_{k_l} są silnie powiązane ze sobą jeżeli między nimi istnieje ścieżka skierowana, tzn. jeżeli istnieje ciąg występujących na przemian wierzchołków i krawędzi, zaczynający się od s_{i_j} kończący się na s_{k_l} takim, że każda krawędź jest zorientowana od wierzchołka występującego po nim.

Natomiast podsystemy s_{i_j} i s_{k_l} są słabo powiązane ze sobą jeżeli między nimi istnieje ścieżka z niejednolicie skierowanych krawędzi którą nazywamy półścieżką skierowaną lub łańcuchem.

Zależności silnego powiązania można przedstawić w postaci :

$$\begin{aligned} X(i_j, k_l) &= \exists (p_q) [\delta(i_j, k_l) \wedge (\forall (p_q) \mathcal{Z}(p_q)) \longrightarrow \\ &\longrightarrow \eta(i_j, p_q) \wedge \eta(p_q, k_l)] \vee \{ \eta(k_l, p_q) \wedge \eta(p_q, i_j) \} \end{aligned}$$

gdzie : $\delta(i_j, k_l)$ - oznacza, że podsystem s_{i_j} jest pierwszym elementem ścieżki skierowanej a s_{k_l} ostatnim

natomiast :

$$\mathcal{Z}(p, q) = [1 < p < n, 1 < q < m_p]$$

Wówczas słabe powiązanie można opisać następującym predykatem :

$$\begin{aligned} \bar{\beta}(i_j, k_l) &= \exists (p_q) [\delta(i_j, k_l) \wedge (\forall (p_q) \mathcal{Z}(p, q)) \longrightarrow \\ &\longrightarrow \{ [\mathcal{E}(k_l, p_q) \vee \mathcal{E}(k_l, p_q)] \wedge [\mathcal{E}(p_q, i_j) \vee \mathcal{E}(p_q, i_j)] \} \end{aligned}$$

Tak więc, w odniesieniu do systemów wielopoziomowych, których elementy należą do różnych poziomów, określenie sprzężenia zostało uogólnione.

Przy uogólnianiu pojęcia sprzężenia konieczne jest uwzględnienie tego, że po pierwsze, powiązane mogą okazać się elementy znajdujące się na różnych poziomach systemu i po drugie, że wewnątrz jednego poziomu elementy mogą być powiązane ze sobą poprzez elementy z innych poziomów.

Jak widać pojęcie sprzężenia, opisanego powyżej, ma bardziej ogólne znaczenie niż powszechnie stosowane i zdefiniowane przez O.Lange'go w pracy [56] jako : "przekształcenie składowych wektora wyjściowego elementu e_1 w składowe wektora wejściowego elementu e_2 ". Jednocześnie jest pojęciem bardziej szczegółowym od pojęcia relacji, rozumianej jako : wszelki związek czy zależność, zachodząca między przedmiotami danego rodzaju [68].

Z uwagi na cel niniejszej pracy, przyjęto następującą definicję sprzężenia :

sprzężenie jest to takie oddziaływanie jednego podsystemu na inny podsystem, którego zmiana powoduje powstanie zmian w sposobie działania tego elementu w stopniu wytarcającym by wpłynąć na istotę rozważań z przyjętego punktu widzenia.

3.7. Metoda budowy przekrojów systemu technicznego o wyróżnionych monostrukturach

Możliwość realizacji, a w szczególności zakres, czas trwania, jakość, efekt itd. badań złożonych systemów technicznych ograniczone są względami technicznymi i ekonomicznymi. Powstaje zatem potrzeba realizacji badań z pewnych wyróżnionych punktów widzenia, adekwatnych do potrzeb, dla których buduje się odpowiednie systemy, będące "przekrojami" systemu o strukturze ogólnej.

Przekrój systemu to również system, zawierający tylko wybrane elementy i odpowiednio wyodrębnione relacje w logiczny sposób odpowiadające celowi lub celom badawczym.

Zatem przekrojem systemu $\langle E, R \rangle$, z pewnego punktu widzenia, nazywamy parę uporządkowaną $\langle E_i, R^{(i)} \rangle$, gdzie $E_i \subset E$ jest podzbiorem właściwym zbioru elementów systemu $\langle E, R \rangle$ i wyznaczony jest poprzez odpowiednio sformułowaną funkcję zdaniową $\Phi_{(E)}^{(i)}$, tzn. $E_i = e \{ (e \in E) \wedge \Phi_{(E)}^{(i)} \}$, natomiast $R^{(i)} \subset R$ jest ciągiem relacji, ograniczonych do zbioru $E_i, R^{(i)} = [R]_{E_i \times E_i}^{[\Phi_{(E)}^{(i)}]}$, wyznaczonych w oparciu o warunki, wynikające z funkcji zdaniowej $\Phi_{(E)}^{(i)}$.

Sformułowanie odpowiedniej funkcji zdaniowej umożliwia wyodrębnienie takiego podzbioru $E_i \subset E$ złożonego z tych i tylko tych elementów zbioru E , które spełniają odpowiednie warunki, wynikające z funkcji zdaniowej oraz umożliwia wyznaczenie takich charakterystyk treściowych relacji R , które pozwolą na wyodrębnienie sieci sprzężeń $R^{(i)}$, wynikających z tej funkcji.

Jak łatwo zauważyć, w zależności od liczności zbioru E , liczba przekrojów systemu może być skończona lub nieskończona. Jednocześnie każdemu przekrojowi odpowiada tylko jeden system o odpowiedniej, konkretnej strukturze /sieci sprzężeń/, którą nazwano "monostrukturą".

3.7.1. Graficzne przedstawienie przekroju systemu

Przekrój systemu wygodnie jest przedstawić w formie grafu, wykorzystując w tym celu graf-drzewo nieskierowane H . W grafie takim wierzchołek nie mający żadnej krawędzi incydentnej, tzn. wierzchołek izolowany odwzorowuje podsystem będący elementem różnicy zbiorów $E \setminus E_i$. Jak widać, podsystemy będące dekomponentami podsystemu z wyższego poziomu, odwzorowanego w grafie jako wierzchołek izolowany, stanowią również wierzchołki izolowane na niższym poziomie /podrzednym/.

Natomiast aby odwzorować ciąg relacji $R^{(1)} \subset R$ zachodzących między podsystemami zbioru E_1 , należy poprowadzić między nimi odpowiednio skierowane krawędzie.

Przy tak sformułowanych zasadach odwzorowania przekroju systemu można wyróżnić dwa warianty grafu.

W pierwszym wariancie podsystemy odwzorowane jako węzły grafu H , o stopniu nie mniejszym od jedności $d(v_i) > 1$, na każdym poziomie grafu H , traktować należy każdorazowo jako zbiór elementów przekroju systemu E_1 . Wówczas krawędzie skierowane, poprowadzone między podsystemami "wewnątrz" każdego poziomu interpretuję, z danego punktu widzenia, zależności zachodzące między nimi. Jak widać na rys.3.3 na każdym poziomie grafu H odwzorowany jest przekrój tego samego systemu S , wykonany według tych samych zasad, ale o zróżnicowanym stopniu szczegółowości rozpatrywania.

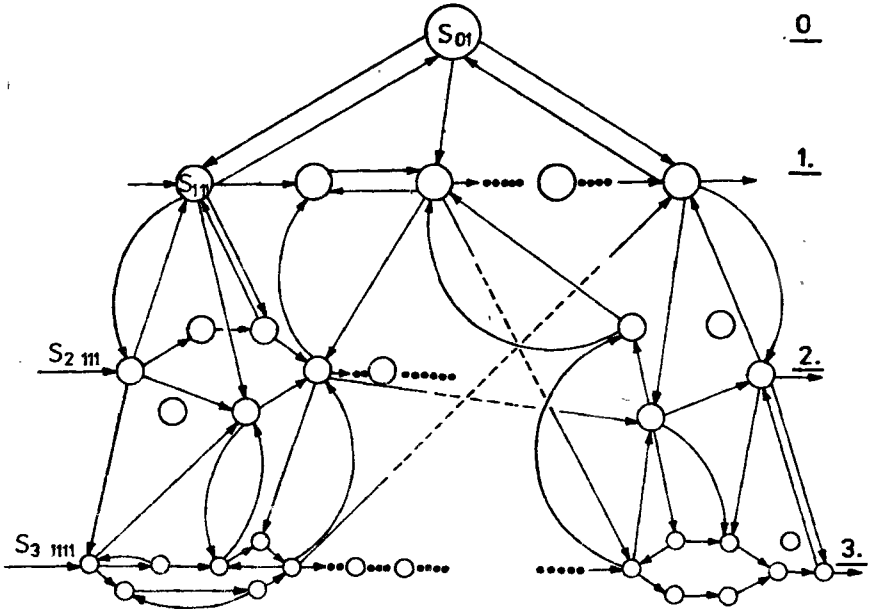
Wariant drugi różni się tym od pierwszego, że każdy podsystem odwzorowany w grafie jako wierzchołek nieizolowany, tzn. spełniający warunek $d(v_i) > 0$, na każdym jego poziomie, jest traktowany jako element jednego zbioru przekroju systemu E_1 . Oznacza to, że zbiór E_1 wyznaczają te podsystemy, które są odwzorowane w grafie H , na dowolnym jego poziomie, w postaci wierzchołków nieizolowanych.

Przy tak zdefiniowanym zbiorze elementów przekroju systemu E_1 otrzymujemy, oprócz krawędzi skierowanych między wierzchołkami "wewnątrz" poziomów grafu, również krawędzie skierowane między wierzchołkami różnych poziomów, które należy interpretować jako relacje między podsystemami usytuowanymi na różnych poziomach dekompozycji.

Przyjmując powyższe można przedstawić następujące własności złożonego systemu technicznego [17][20][24][33][34][62][66][68][102][115] :

- złożony system techniczny posiada globalny cel działania oraz cele lokalne, odpowiadające jego podsystemom ;
- realizacja celów lokalnych prowadzi do osiągnięcia celu globalnego, co nie oznacza, że cel globalny jest sumą celów lokalnych ;
- ilość relacji i podsystemów jest uzależniona od ilości dekompozycji ;
- stopień poznania systemu wzrasta przy sukcesywnym przechodzeniu z jednego poziomu na drugi, tzn. im niższy poziom rozpatrujemy, tym bardziej szczegółowo poznajemy system, natomiast im wyższe rozpatrujemy poziomy, tym bardziej zrozumieliśmy się staję sens istnienia systemu oraz jego znaczenie w systemie, którego jest dekomponentem ;
- z zasad dekompozycji systemu wynika, że z ruchem ku górze maleje liczba relacji oraz maleje liczba podsystemów, natomiast zwiększa się ich znaczenie ;
- relacje między podsystemami, na tym samym poziomie dekompozycji, tzw. wewnętrzne wynikają z zależności funkcjonalnych między podsystemami, natomiast relacje między podsystemami usytuowanymi na różnych poziomach, tzw. zewnętrzne wynikają z roli tych podsystemów w systemie ;

- ograniczając rozważania do zbioru podsystemów jednego poziomu dekompozycji, które traktujemy wówczas jako zbiór elementów systemu E, pomijamy relacje zewnętrzne i zawiązamy nasze rozpatrywania do układu relacji wewnętrznych, tracąc możliwość oceny znaczenia tych podsystemów w systemie.



Rys.3.3 Przekrój systemu jako podgraf pełnego, symetrycznego grafu skierowanego

W oparciu o przedstawione własności złożonego systemu technicznego przyjęto następującą definicję struktury ogólnej systemu :

struktura ogólna systemu jest to ciąg relacji $\langle R_1, R_2, \dots \rangle$ określonych na zbiorze podsystemów systemu $E_N = \{s_{ij}\}$, $i = 0, 1, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m_i$, którego składnikami są relacje od jedno do wielo- członowych, przy czym

$$E_N = \bigcup_{i=0}^n \left(\bigcup_{j=1}^{m_i} s_{ij} \right) . \text{ a } N = \bigcup_{i=1}^n m_i$$

Powyższa definicja przedstawia punkt widzenia, z którego rozpatruje się system rzeczywisty, stanowiący podstawę do opracowania zasad budowy modelu, przedstawionych w dalszej części opracowania.

3.8. Struktura funkcjonalna systemu

Przyjmując, że funkcjonowanie oznacza działanie celowościowe, to strukturę funkcjonalną jest strukturą przekroju systemu $\langle E_N, R \rangle$, zbudowanego z punktu widzenia prawidłowości realizacji jego celu. Zbiór podsystemów systemu E_1 jest zatem podzbiorem właściwym zbioru E_N , $E_1 \subset E_N$, zawierającym tylko te podsystemy systemu $\langle E_N, R \rangle$ które spełniają następujący warunek:

"być podsystemem systemu zapewniającym prawidłowe funkcjonowanie systemu", tzn.

$$E_1 = s_{1j} \left\{ \left\{ s_{ij} \in E_N \right\} \wedge \bigoplus_I^{(1)} s_{ij} \right\}$$

Natomiast relację $R^{(1)} \subset R$, nazwaną strukturą funkcjonalną systemu zdefiniowano jako:

"układ sprzężeń między elementami systemu, zapewniający jednoznaczne transformację stanów wejść i stanów wyjść elementów na sposób działania systemu jako całości tak, aby działanie systemu zapewniało wykonanie jego funkcji lub zapewniało uzyskanie wyznaczonego celu".

Struktura funkcjonalna systemu determinuje sposób jego działania, zaś na zewnątrz zapewnia skoordynowane oddziaływanie systemu na jego otoczenie. Działanie jest realizowane w systemie przez pewien zainicjowany i odbywający się w nim proces, a wyznacza je cel danego działania.

Celem każdego działania jest w ogólnym przypadku wywołanie pewnej zmiany we fragmencie rzeczywistości. Rozpatrywane systemy są zatem systemami działaniami, których istotą są ich cele, postawione przed nimi zadania. Systemy rzeczywiste działają zwykle w sposób, który jest wynikiem odpowiedniego sterowania, będącego celowym oddziaływaniem na systemy. Może ono pochodzić z zewnątrz lub może być właściwością samego systemu.

Systemy działaniowe można zatem podzielić na sterowalne i niesterowalne. Systemy sterowalne to systemy z zachowaniem celowym.

Nie trudno zauważyć, że każda maszyna, czy urządzenie mechaniczne może być traktowane jako zbiór sprzężonych ze sobą elementów oddziałujących na siebie zgodnie z zasadami mechaniki lub elektromechaniki.

Można zatem przyjąć, że cybernetyka, będąca w pewnym zakresie teorią maszyn, ale nie dotyczącą ich konstruowania czy technologii, lecz funkcjonowania, czyli zachodzących w nich procesów, z uwzględnieniem obsługi urządzenia przez człowieka, stwarza naukowe podstawy, z których należy korzystać przy rozwiązaniu problemów związanych z budową ich modeli [53].

3.9. Niezawodność i trwałość systemu

W niniejszej pracy niezawodność systemu jest rozumiana następująco [9],[115],[116]:

"niezawodność oznacza prawdopodobieństwo zrealizowania zadania przez

system, wyznaczonego zgodnie z przeznaczeniem tego systemu, w ustalonym przedziale czasu $[t_0, t_k]$ przy określonym oddziaływaniu wymuszeń zewnętrznych i pobudzeń sterujących.

Powyższe zapisuje się jako prawdopodobieństwo zdarzenia :

$$N/t/ = P\{\gamma > t\}$$

gdzie : $N/t/$ - niezawodność systemu

γ - czas pracy systemu,

t - wymagany czas pracy systemu.

Natomiast trwałość można zdefiniować w następujący sposób :

"trwałość jest to czas istnienia systemu w ustalonym zbiorze stanów jego zdadności z pominięciem czasu ewentualnych napraw. Przy tym dla systemu nienaprawialnego jest to czas jego pracy do uszkodzenia, a dla naprawialnego jest to łączny czas jego pracy aż do rezygnacji z napraw".

Jak widać, pojęcie niezawodności i trwałości są od siebie zależne. Istnieją bowiem określone trudności zabezpieczenia wysokiego poziomu niezawodności systemu o dużej trwałości. Natomiast systemy o niakiej trwałości wymagają zdecydowanie mniejszych nakładów na zabezpieczenie takiego poziomu.

Powyższe uzasadnia postulat maksymalnej niezawodności, którego sens polega na tym, że należy budować systemy o maksymalnej niezawodności, możliwej do uzyskania w danych warunkach ogólnych, rozumianych jako warunki ekonomiczne, możliwości techniczne, warunki eksploatacyjne, ekonomicznie uzasadnione oraz użytkownika itd. przy optymalnej trwałości.

Jak wynika z przedstawionych definicji, ocena niezawodności lub trwałości dowolnego systemu technicznego jest możliwa jedynie wówczas, gdy jesteśmy w stanie jednoznacznie zdefiniować pojęcie uszkodzenia, w odniesieniu do konkretnego zastosowania systemu oraz podać dla jakiego zespołu czynników wymuszających poszczególne uszkodzenia zostały zdefiniowane.

3.9.1. Definicja uszkodzenia systemu

Oddziaływanie czynników wymuszających powoduje zmiany własności systemu. Zmiany te sprawiają, że po określonym czasie co najmniej jedna z własności może nie odpowiadać wymaganiom, których spełnienie jest konieczne do prawidłowego działania systemu w konkretnym jego zastosowaniu. Osiągnięcie takiego stanu w teorii niezawodności nazywa się uszkodzeniem i definiuje się jako zdarzenie, polegające na utracie zdadności.

Zdadnością natomiast określa się zdolność systemu do wykonywania funkcji wyznaczonych mu przez wymagania zawarte w dokumentacji technicznej.

W celu ściślejszego sprecyzowania tych pojęć, scharakteryzujemy system za pomocą dwóch zbiorów cech :

zbioru cech mierzalnych $C_{M,i}$ $i = 1, 2, \dots, n$

zbioru cech niemierzalnych $C_{N,j}$, $j = 1, 2, \dots, m$

Do konkretnych wymagań stawianych przed systemem możemy dla każdej z cech podać dopuszczalne granice $C_{M,i}^{\min}$ oraz $C_{M,i}^{\max}$ takie, że każda wartość cechy zawarta w przedziale $C_{M,i}^{\min} < C_{M,i} < C_{M,i}^{\max}$ odpowiada poprawnemu działaniu systemu. Podobnie dla zbioru cech niemierzalnych możemy pośrednio ustalić kryteria pozwalające na jednoznaczne stwierdzenie czy dana cecha odpowiada poprawnemu działaniu systemu. Dla celów analitycznych dogodnie jest wprowadzić następujące oznaczenie: gdy j -ta cecha niemierzalna spełnia w przedziale czasowym $/0, t/$ wymagania poprawnego działania systemu, stan taki zapisujemy symbolicznie w postaci:

$$C_{N,j,t} = 1$$

natomiast przypadek przeciwny zapisujemy jako:

$$C_{N,j,t} = 0$$

Podczas eksploatacji systemu dla dowolnego przedziału czasu $/t_0, t_k/$ można wyznaczyć prawdopodobieństwo tego, że co najmniej jedna z cech mierzalnych przyjmie wartość leżącą poza przedziałem $[C_{M,i}^{\min}, C_{M,i}^{\max}]$, podobnie istnieje prawdopodobieństwo tego, że co najmniej jedna z cech niemierzalnych przejdzie ze stanu

$$C_{N,j,t} = 1$$

do stanu:

$$C_{N,j,t} = 0$$

Przedstawia to następująca zależność:

$$N(t) = P \left\{ C_{M,1}^{\min} < C_{M,1}(t) < C_{M,1}^{\max} \dots C_{M,n}^{\min} < C_{M,n}(t) < C_{M,n}^{\max} \cdot C_{N,1,t} = 1 \dots C_{N,n,t} = 1 \right\}$$

Wyrażenie to stanowi matematyczne sformułowanie podanej uprzednio definicji niezawodności. Rozkład w czasie t , prawdopodobieństwo zdarzenia opisywanego przez podaną zależność jest zawsze zależny od tego, w jakim zespole czynników wymuszający dany system jest magazynowany, transportowany i eksploatowany /użytkowany i obsługiwany/.

Zależność ta jest przy tym tego rodzaju, że na zmiany w czasie poszczególnych, mierzalnych i niemierzalnych cech systemu, wpływa cały przebieg każdego z czynników wymuszających od chwili rozpoczęcia oddziaływania do czasu t , dla którego chcemy wyznaczyć niezawodność obiektu. Memy więc tu do czynienie z zależnością funkcyjną.

Oznaczając zbiór funkcji opisujących rozkłady wartości poszczególnych czynników wymuszających w czasie przez:

$$\Psi(t) = [\Psi_1(t), \Psi_2(t), \dots, \Psi_j(t)]$$

możemy związek między rozkładem w czasie niezawodności systemu, a oddziaływaniem zespołu czynników wymuszających $\Psi(t)$ zapisać w postaci :

$$N(t) = Y_1[\Psi(t) \quad 0 \leq t < t, \Delta t].$$

Zależność ta wskazuje, że miara niezawodności, nie może być miarą bezwzględną. Odnosi się ona do danego zespołu czynników wymuszających, działających na system i do danego rozkładu w czasie każdego z tych czynników.

Na uwagę zasługuje również fakt, że w zależności, przedstawiającej matematyczne sformułowanie niezawodności, każda z cech mierzalnych jak i niemierzalnych traktowana jest jako cecha "jednakowoważna".

Stanowi to duże uproszczenie rzeczywistości, ponieważ różne postacie uszkodzeń, rozmaitych elementów, wywołują różne skutki, objawiające się zmianami stanu fizycznego systemu, wyznaczonych wartościami zbioru cech opisujących system z wyróżnionego punktu widzenia, w danej chwili t.

Wydaje się, że wygodne jest posługiwanie się pojęciem przestrzeni stanów fizycznych systemu. Każdemu punktowi tej przestrzeni odpowiada wektor, którego współrzędnymi wartości wielkości fizycznych, opisujących system z wyróżnionego punktu widzenia. Jest to więc przestrzeń wielowymiarowa, której liczba wymiarów zależy od liczności zbioru cech opisujących system. System można więc opisać w różnych przestrzeniach stanów fizycznych w zależności od funkcji, jaką ten opis ma spełniać. W przestrzeni wydzielamy podzbiór stanów fizycznych, które rzeczywisty system może przyjmować.

W różnych chwilach stan ten jest na ogół różny. W związku z tym, w pewnych chwilach system wykonuje nałożone zadanie lepiej, w innych gorzej, a mogą wystąpić takie stany fizyczne, w których nie może on wykonywać nałożonego zadania.

Im bardziej złożone są systemy, tym bardziej staje się skomplikowana ocena ich stanu fizycznego oraz niezawodności.

Jednym z przykładów dostrzeżenia opisanej problematyki jest praca J. Jaźwińskiego [41], w której autor wyróżnia następujące stany niezawodnościowe systemu : stan zdatności, stan pośredniej zdatności oraz stan niezdatności. Przy tym przez stan niezawodnościowy systemu rozumie się wartość funkcji określonej na zbiorze stanów fizycznych systemu, opisującej jakość działania systemu w poszczególnych stanach fizycznych w danej chwili czasu t. Jest to więc funkcja, której argumentem jest stan fizyczny obiektu.

Zatem stan systemu kwalifikujemy do stanu zdatności, gdy system realizuje przeznaczone dla niego zadania zgodnie z wymaganiami.

Stan systemu zaliczamy do stanu pośredniej zdatności, gdy system może realizować wyznaczone zadania, lecz utrudnione jest jego użytkowanie.

Natomiast stan systemu kwalifikujemy do stanu niezdatności wówczas, gdy system nie może wykonywać przeznaczonego dla niego zadania w sposób

zgodny z wymaganiami.

Oznacza to, że zbiór stanów fizycznych systemu został podzielony na trzy rozłączne podzbiory, którym przypisano odpowiednie stany niezawodnościowe. Wprowadzenie klasyfikacji wielostanowej oraz kwalifikowanie stanu pośredniej zdadności do stanu, w którym system spełnia wyznaczone zadania, świadczy o tym, że przez uszkodzenie systemu rozumie się niemożliwość realizacji nałożonych na system zadań zgodnie z wymaganiami, mówiąc inaczej nie zaważe uszkodzenie elementu systemu oznacza przejście stanu systemu na stan niezdatności.

Jedną z propozycji opisu wielostanowości złożonych systemów technicznych przedstawiono w pracy [111], wykorzystując w tym celu koncepcję zbiorów rozmytych [119], podano sposób opisu różnych stanów systemu za pomocą wyznaczonej funkcji przynależności.

Należy przy tym zauważyć, że do analizy oraz oceny niezawodności systemu technicznego niezbędna staje się znajomość jego struktury niezawodnościowej. Struktura ta, między innymi, umożliwia dokonanie analizy wpływu uszkodzenia elementu na możliwość realizacji zadania przez system, jak również ocenę niezawodności systemu, w przypadku, gdy znane są niezawodności jego elementów.

3.9.2. Struktura niezawodnościowa systemu

Celem zdefiniowania monostruktury systemu technicznego z punktu widzenia niezawodności jego działania, należy dokonać przekroju systemu o strukturze ogólnej $\langle E_N, R \rangle$ w taki sposób, aby elementy powstałego systemu $\langle E_2, R^{(2)} \rangle$ t.j. E_2 i $R^{(2)}$ posiadały następujące własności:

- podzbiór $E_2 \subseteq E_N$ jest podzbiorem właściwym zbioru E_N , którego podsystemy spełniają następujący warunek $\Phi^{(2)}$:
"być podsystemem aktywnym systemu, to znaczy podsystemem, którego istnienie i prawidłowe działanie jest niezbędne do realizacji przez system wyznaczonych zadań lub podejmowania funkcji innego działającego podsystemu w przypadku, gdy podsystem ten uległ uszkodzeniu".

$$E_2 = s_{1j} \left\{ (a_{1j}) \in E_N \mid \Phi^{(2)}_{s_{1j}} \right\}$$

Wówczas relacje $R^{(2)} \subseteq R$, wyodrębniona w R w oparciu o charakterystyki treściowe wynikające z funkcji zdaniowej $\Phi^{(2)}$ jest strukturą niezawodnościową systemu, którą można zdefiniować s_{1j} jako:

"układ sprzężeń między podsystemami systemu, który w sposób jednoznaczny wyznacza niezawodność systemu, w zależności od niezawodności jego podsystemów".

3.9.3. Przekrój systemu z punktu widzenia jego niezawodności

Wykorzystując powyższe definicje, można zbudować przekrój systemu $\langle E_N, R \rangle$ z punktu widzenia jego niezawodności. W tym celu na każdym poziomie dekompozycji należy wyznaczyć podsystemy aktywne i połączyć je siecią sprzężeń wewnętrznych i zewnętrznych. Sieć sprzężeń wewnętrznych, zbudowana na każdym poziomie dekompozycji w oparciu o funkcję $\Phi^{(2)}$, wyznacza strukturę niezawodnościową, natomiast sprzężenia zewnętrzne przedstawiają wpływ oddziaływania uszkodzeń podsystemów na możliwość realizacji zadania przez system nadrzędny.

Dla tak przyjętych założeń przekrój systemu $\langle E_N, R \rangle$ można przedstawić jako graf skierowany, zbudowany na grafie-drzewie wchodzącym.

Wówczas każda z krawędzi skierowanych od wierzchołka wiszącego /elementu systemu/ do korzenia grafu /systemu/ przedstawia wpływ uszkodzenia każdego z elementów na niezdatność podsystemu z bezpośredniego, nadrzędnego poziomu jak również wpływ niezdatności tego podsystemu, na ograniczenie możliwości realizacji zadania przez podsystem z kolejnego wyższego poziomu itd., do systemu jako całości łącznie.

Natomiast krawędzie skierowane między wierzchołkami grafu-drzewa, na każdym jego poziomie, przedstawiają strukturę niezawodnościową. Należy przy tym podkreślić, że krawędzie w przedstawionym grafie są incydentne tylko z wierzchołkami nierowymi, przedstawiającymi elementy aktywne systemu.

Jak widać, przekrój systemu z punktu widzenia niezawodności jego działania jest podgrafem grafu pełnego skierowanego, którego wierzchołkami są podsystemy aktywne systemu incydentne z krawędziami skierowanymi, przedstawiającymi zależności niezawodnościowe między nimi.

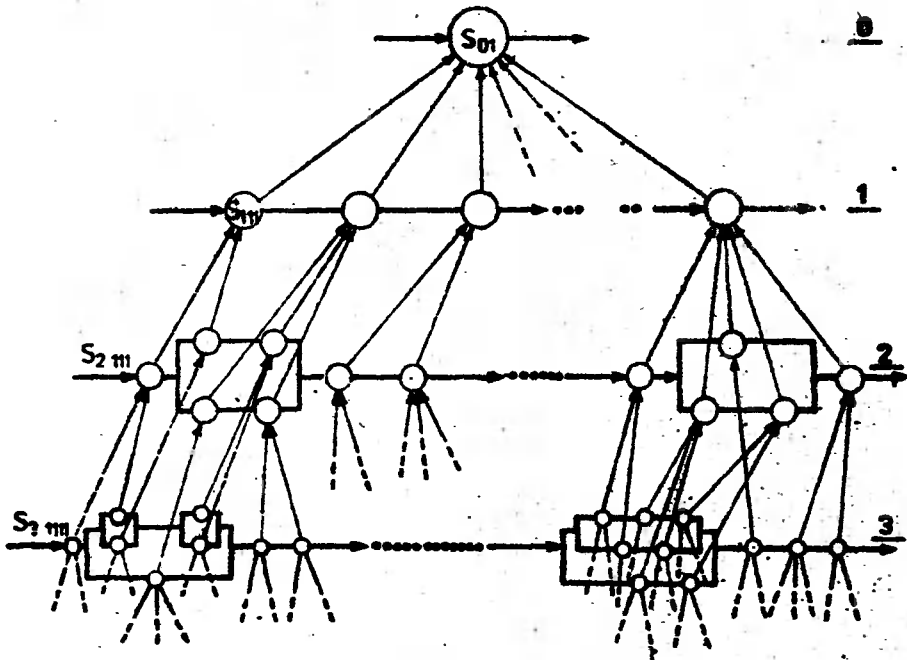
Należy jednak zwrócić uwagę, że w grafie przedstawionym na rys.3.4 każdy z podsystemów odwzorowany jest w identyczny sposób, tzn. w postaci węzła grafu na odpowiednim jego poziomie. Również każda z relacji, zachodzących między podsystemami systemu, przedstawiona jest w grafie w postaci identycznej krawędzi skierowanej.

Osmianny graf spełnia zasady odwzorowania systemów, wynikających z teorii niezawodności, a jednocześnie w sposób widoczny przedstawia jej niedoskonałość w zastosowaniach do złożonych systemów technicznych. Wynika to stąd, że w teorii niezawodności elementy systemu traktuje się jako elementy jednakowo ważne, w danym typie sprzężeń, jak również nie wyróżnia się stopnia ważności sprzężeń między tak odwzorowanymi elementami. Budowa osmianego grafu, przedstawiającego przekrój systemu, na początkowych poziomach dekompozycji jest prosta, ale komplikuje się w miarę rozpatrywania coraz to niższych poziomów. Na poziomach tych mamy bowiem do czynienia z gwałtownie zwiększającą się liczbą podsystemów, osiągającą wartość od kilku do kilkudziesięciu tysięcy na najniższym poziomie, charakteryzujących się dużym stopniem zróżnicowania własności i realizowanych funkcji.

Badania niezawodnościowe przekrojów złożonego systemu technicznego, wyróżniających się dużą liczbą poziomów dekompozycji, jest zatem z tech-

nicznego i organizacyjnego punktu widzenia, precyzyjnym i wielostopniowym procesem, na którego czas trwania w zasadniczy sposób wpływa jego złożoność. Jednocześnie badania te są mało efektywne, ponieważ uszkodzenia wielu podsystemów praktycznie nie zmieniają skuteczności działania systemu.

Z uwagi na powyższe w dalszej części pracy przedstawiono metodę budowy modelu złożonego systemu technicznego, przeznaczonego do badania niezawodności, w której uwzględniono zróżnicowaną istotność jego elementów i relacji.



Rys.3.4 Graficzne przedstawienie przekroju systemu z punktu widzenia jego niezawodności

3.10. Struktura diagnostyczna systemu

W wielu pracach teoretycznych, dotyczących niezawodności systemów technicznych, autorzy przyjmują założenie, że uszkodzenie elementu jest to zdarzenie, którego zajście jest natychmiast identyfikowane. Natomiast z badań niezawodności złożonych systemów technicznych wynika, że identyfikacja uszkodzenia systemu oraz jego przyczyny bez jego demontażu jest zadaniem bardzo trudnym, a często wręcz niemożliwym. Niemniej, występuje pewna prawidłowość, polegająca na tym, że stan niewielkich elementów systemu można w łatwy sposób zidentyfikować. Trudności natomiast poja-

wiąże się wówczas, gdy wymaganiami dotyczącymi identyfikacji stanu, obejmujemy kolejne elementy systemu o malejącym wpływie ich uszkodzeń na możliwość realizacji zadań przez system. Przy tym istnieją takie elementy systemu, o małej istotności, których ocena stanu jest niemożliwa bez demontażu systemu [8], [9], [10], [25], [75], [77], [78], [80], [114].

Można zatem mówić o podatności diagnostycznej elementów w zależności od ich istotności.

Jak wynika z powyższego, z zagadnieniami diagnostyki technicznej ściśle wiąże się identyfikacja systemu. Drogą jej jest poszukiwanie właściwego, najbardziej adekwatnego modelu systemu technicznego, zbudowanego w oparciu o wyniki eksperymentów, dokonanych na systemie rzeczywistym. Wyniki badań eksperymentalnych są porównywalne z wynikami analizy teoretycznej modelu, z uwzględnieniem określonego kryterium porównawczego. Model powinien z żądaną dokładnością opisywać zachowanie się systemu rzeczywistego pod działaniem określonych wymuszeń zewnętrznych z określonego punktu widzenia [105].

Proces diagnostyczny może składać się z oddzielnych części, z których każda charakteryzuje się podawanym na system rzeczywisty bądź eksperymentalny, czy też rebozym oddziaływaniami i właściwą odpowiedzią /sygnałem/ systemu. Wtedy algorytm diagnozy stanowi ciąg elementarnych badań i reguł analizy ich wyników [54].

Z uwagi na powyższe system $\langle E_3, R^{(3)} \rangle$, będący przekrojem systemu o strukturze ogólnej $\langle E_N, R \rangle$, z punktu widzenia możliwości diagnozowania stanu systemu, powinien posiadać następujące własności:

- Podzbiór $E_3 \subset E_N$ jest podzbiorem właściwym zbioru E_N , którego elementy spełniają następujący warunek $\Phi^{(3)}$:
"być elementem systemu, którego zmiana stanu⁽¹⁾ wywołuje zmianę wartości parametrów systemu, uznanych za istotne z punktu widzenia przyjętego celu badania i występujących w sposób jawny w jego opisie o wartość możliwą do zarejestrowania na drodze pomiaru".

$$E^{(3)} = \{e_{1j} \in E_N \wedge \Phi^{(3)}_{e_{1j}}\}$$

- Relacja $R^{(3)} \subset R$, wyodrębniona w R w oparciu o charakterystyki treściowe, wynikające z funkcji $\Phi^{(3)}$, jest strukturą diagnostyczną systemu, którą można zdefiniować jako:
"układ relacji ograniczonych do zbioru $E^{(3)}$, $E^{(3)} \subset E_N$, zachodzących między chwilowymi wartościami parametrów systemu, w przypadku których zmiana wartości parametrów struktury na skutek zmian stanu elementu z wyróżnionego zbioru, powoduje zmianę wartości współrzędnych sygnału diagnostycznego o wartość możliwą do zarejestrowania na drodze pomiaru". Przy tym przez parametry struktury należy rozumieć wielkości, które służą do ujęcia stosunków zachodzących między wartościami cech elementów systemu w sposób ilościowy.

Jak widać, podstawowym zadaniem sygnału diagnostycznego jest odwzorowanie zdarzeń, wielkości i funkcji procesów fizycznych, zachodzących w systemie rzeczywistym. Umożliwia to przetworzenie uzyskanych informacji, wykonanie operacji porównania rzeczywistego stanu systemu, rozpatrywanego z rozmaitych punktów widzenia, z jego stanem wzorcowym i stwierdzenie przynależności stanu badanego systemu do jednego z podzbioru stanów, z góry ustalonej klasyfikacji stanów.

4. ZASADY IDENTYFIKACJI ELEMENTÓW ISTOTNYCH ZŁOŻONEGO SYSTEMU TECHNICZNEGO Z PUNKTU WIDZENIA NIEZAWODNOŚCI

Jednym z podstawowych problemów, występujących w procesie identyfikacji systemu jest wyodrębnienie elementów tego systemu oraz istotnych sprzężeń między nimi z przyjętego punktu widzenia.

Prawidłowość realizacji procesu identyfikacji systemu uwarunkowana jest znajomością celu wynikającego z celu badań i celu ustalenia obiektu badań, dla jakiego budujemy system oraz wyborem odpowiedniego stopnia abstrakcji. Znajomość celu systemu i poprawnie ustalony stopień abstrakcji umożliwiają prawidłowy dobór kryteriów oceny ważności elementów, jak również oceny ważności ich sprzężeń.

Z przyjętego celu wynika aspekt, kąt widzenia, umożliwiające zredukowanie różnorodnych czynników tylko do najistotniejszych, mających decydujący wpływ na adekwatność modelu tego systemu.

4.1. Pojęcie istotności elementów systemu

Element istotny to taki element systemu, który posiada zbiór cech charakterystycznych z przyjętego punktu widzenia, o wartościach zawierających się w ustalonych a priori dopuszczalnych przedziałach zmienności. Liczność zbioru cech, których wartości spełniają ustalone warunki, decyduje o istotności elementu systemu.

Jest oczywiste, że dla różnych punktów widzenia należy każdorazowo rozpatrywać inne zbiory cech, wyznaczające istotność elementu.

Celem przedstawienie istotności elementów systemu technicznego, z punktu widzenia jego niezawodności, w strukturze ogólnej systemu wyodrębni-
no :

- poziome zależności, zachodzące między podsystemami, na każdym z poziomów dekompozycji, będące odzwierciedleniem struktury funkcjonalnej analizowanego systemu, umożliwiające ocenę zróżnicowania udziałów zadań realizowanych przez podsystemy w zadaniu globalnym systemu ;
- pionowe zależności, zachodzące między podsystemami, usytuowanymi na różnych poziomach, umożliwiające ocenę wpływu uszkodzenia podsystemu na możliwość realizacji zadania przez podsystemy nadrzędne.

Istotność podsystemu, w aspekcie jego niezawodności, należy zatem rozumieć jako możliwość zasięgu "pionowego oddziaływania" uszkodzenia podsystemu z rozpatrywanego poziomu na ograniczenie możliwości realizacji zadania przez podsystemy nadrzędne.

Przy tym miarą możliwości pionowego zasięgu oddziaływania uszkodzenia podsystemu jest stopień ograniczenia możliwości realizacji zadań przez podsystemy rozmieszczone na kolejnych wyższych poziomach do systemu jako całości łącznie.

Jak widać, istotność podsystemu zależna jest od posiadania przez niego wielu różnorodnych cech o ustalonych a priori przedziałach zmienności ich wartości, charakterystycznych dla danego podsystemu z przyjętego punktu widzenia.

Istotność podsystemu powinna być zatem wyznaczona za pomocą zbioru kryteriów. Przy tym, im więcej stosuje się kryteriów, tym bardziej szczegółowe jest ocena jego istotności. Jako kryterium oceny istotności podsystemu należy uważać warunek, dotyczący funkcjonau /z reguły całka po czasie lub po obszarze przestrzennym w przestrzeni parametrów określających stan systemu, zadanej funkcji parametrów systemu $f(t)$, który przypisuje każdej funkcji przestrzeni funkcyjnej pewną liczbę $\Phi_{I/f}$, pozwalający dokonać sprawdzenia czy wartość $\Phi_{I/f}$ zawiera się w ustalonym przedziale dopuszczalnych zmienności, tzn. czy spełniona jest zależność

$$a < \Phi_{I/f} < b$$

Ponieważ kryteria dotyczą wybranego zestawu cech, to stopień spełniania warunków, wynikających z kryterium, decyduje o istotności podsystemu.

Przy takim ujęciu, istotność podsystemu jest funkcją zależną od stopnia czynienia zadość warunkom wyznaczonym przez kryteria, tzn.

$$I = f/K_1, K_2, \dots, K_q, \dots, K_{n_k} / \quad q = 1, 2, \dots, n_k$$

Dla celów analitycznych dogodnie jest w tym przypadku wprowadzić następujące oznaczenie : gdy liczba $\Phi_{I/f}$ zawiera się w ustalonym przez kryterium przedziale jej dopuszczalnych zmienności, to kryterium przyporządkowujemy wartość 1, natomiast w przypadku przeciwnym - 0.

Wówczas powyższa zależność przyjmie następującą przykładowo postać :

$$I = (1, 0, \dots, 1, \dots, 0) ,$$

w której liczba oraz kolejność jedynek w ciągu wartości argumentu funkcji decyduje o istotności badanego podsystemu.

Ponieważ prawidłowa ocena istotności elementów systemu uzależniona jest w dużej mierze od właściwego doboru kryteriów, to w trakcie ich budowy należy dokonać analizy polegających według R.Kolmana [52] na :

1. Eliminowaniu kryteriów :

- tożsamościowych,

- bliskoznacznych,
- mało istotnych.

2. Ocenie wzajemnego dopełniania się kryteriów w przyjętym zbiorze.
3. Ustaleniu, w razie potrzeby, poziomów i współczynników ważności pozostałych po eliminowaniu kryteriów.

Jednocześnie należy mieć na uwadze, że zbyt duża liczba kryteriów zmniejsza operatywność analizy oraz stwarza możliwość zbędnego stosowania kryteriów mało istotnych.

4.2. Zasady budowy kryteriów oceny istotności elementów systemu

Do budowy kryteriów wyznaczania istotności elementów systemu technicznego, z punktu widzenia niezawodności, proponuje się wykorzystać opis systemu przy zastosowaniu koncepcji wejścia-wyjścia, ułatwiający wyodrębnienie i opis tych czynników, które decydują o niezawodności systemu.

Proponowany sposób opisu systemu ułatwia dokonanie klasyfikacji :

- oddziaływań otoczenia na system,
- oddziaływań systemu na otoczenie,
- oddziaływań wzajemnych w systemie,

w oparciu o które można wyznaczyć :

- zbiór cech środowiska pracy i przechowywania systemu, przy pomocy których ocenia się stopień narażenia elementów działających systemu na działanie czynników wymuszających,
- zbiór cech każdego z elementów systemu, przy pomocy których ocenia się wpływ uszkodzenia tych elementów na niezawodność i efektywność działania systemu, z uwzględnieniem jego bezpieczeństwa,
- zbiór cech elementów systemu, charakteryzujących możliwość działania czynników odnawiających,

i dokonać podziału tych zbiorów na podzbiory w taki sposób, aby podzbiory te mogły stanowić ciąg argumentów funkcji kryterialnych, na zbiorze których opisano funkcjonały /kryteria oceny istotności/ o postaci :

$$\int_{t_1}^{t_2} f(C_q) dt = \Phi_q, \quad q = 1, 2, \dots, n_k$$

Następnie każde z kryteriów należy podzielić na podkryteria $k(q)$, $l = 1, 2, \dots, p_q$, poprzez wyodrębnienie w każdym z nich odpowiednich, dopuszczalnych przedziałów zmienności wartości przyjmowanych przez ich funkcjonały.

Dokonanie podziału kryteriów na podkryteria ułatwie ich stosowania z uwagą na możliwość sformułowania podkryteriów w postaci pytań, oraz sprawdzenia każdorazowo, czy zmiana wartości rozpatrywanej cechy danego podsystemu, w wyznaczonym przedziale czasu $\langle t_1, t_2 \rangle$, nie spowoduje przekroczenia wartości funkcjonału Φ_q poza dopuszczalny przedział jego zmienności.

Ponadto stwarza możliwość alternatywnego zapisu wyniku stosowanego kryterium w układzie zero-jedynkowym.

Przyjęty tok postępowania umożliwi wyznaczenie zbioru kryteriów oceny istotności systemu, z przyjętego punktu widzenia, $K = \{K_q\}$, gdzie kryteria stanowią uporządkowane zbiory podkryteriów, tzn.

$$K_q = \{k_l^{(q)}\}, \quad q = 1, 2, \dots, n_k, \quad l = 1, 2, \dots, p_q$$

4.3. Zasady wyznaczenia istotności elementów systemu

Aby wyznaczyć istotność elementów systemu, należy do wszystkich jego elementów, na kolejnych poziomach, zastosować przyjęte kryteria ze zbioru $K = \{K_q\}$, $q = 1, 2, \dots, n_k$ /rys.5.1/. W efekcie zastosowania n_k kryteriów do elementów systemu, uzyskujemy na każdym poziomie, podział zbioru elementów tam usytuowanych E_i , $i = 1, 2, \dots, n$ na podzbiory $E_i^{(n_k+1-w)}$, w zależności od liczby spełnionych kryteriów przez te elementy w ($w = 0, 1, 2, \dots, n_k$), które nazwano warstwami i oznaczono je symbolem $\bigwedge_{i, (n_k+1-w)}$.

Wówczas :

$$E = \{E_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

gdzie : E - zbiór elementów systemu,

E_i - zbiór elementów i -tego poziomu systemu

przy tym :

$$E_i = \bigcup_{w=0}^{n_k} E_i^{(n_k+1-w)} \quad w = 0, 1, \dots, n_k$$

jednocześnie :

$$\bigwedge_{i, (n_k+1-w)} = E_i^{(n_k+1-w)}$$

oraz

$$E_i^{(n_k+1-w)} = \left\{ \bigwedge_{i, (n_k+1-w)} \mid i = \text{const.}, w = 0, 1, 2, \dots, n_k \right\}$$

gdzie : $E_i^{(n_k+1-w)}$ - podzbiór elementów i -tego poziomu dekompozycji spełniających w -kryteriów.

Następnym krokiem w procesie wyznaczania istotności podsystemów /elementów/ systemu jest uporządkowanie zbiorów elementów $E_i^{(n_k+1-w)}$, na każdym poziomie dekompozycji, według liczby spełnionych przez nie kryteriów.

Przyjęto następującą zasadę porządkowania : podsystemy /elementy/, których cechy spełniły $w = n_k$ - kryteriów, tzn. wszystkie ze stosowanych

i zostały zaszerzowane, na tej podstawie, do zbioru $E_i^{(1)}$ tworzą tzw. pierwszą warstwę istotności \bigwedge_{i1} na i -tym poziomie.

Drugą warstwę istotności \bigwedge_{i2} na i -tym poziomie stanowi rodzina zbiorów elementów, których cechy nie spełniły jednego, dowolnego z $n_k (w=n_k-1)$ - stosowanych kryteriów. Warstwa ta utworzona jest zatem z elementów o równorzędnej istotności z punktu widzenia przyjętych ocen wielokryterialnych, to znaczy z tych i tylko tych elementów, których cechy nie spełniają jednego kryterium z ilości n_k - stosowanych.

Warstwę ostatnią $\bigwedge_{i(n_k+1)}$ tworzą te elementy systemu, których cechy nie spełniają żadnego z n_k - stosowanych kryteriów ($w=0$).

Każda warstwa zawiera różne liczby zbiorów $E_i^{(n_k+1-w)}$, które wynikają z możliwości utworzenia kombinacji z n_k składników, po (n_k-w) , tzn. z liczb spełnianych przez elementy kryteriów.

W warstwie pierwszej istnieje $\binom{n_k}{0}$ zbiorów elementów, w drugiej $\binom{n_k}{1}$ zbiorów elementów, równoważnych z 0 punktu widzenia ich istotności, 1 których cechy nie spełniły tylko jednego kryterium, w warstwie trzeciej $\binom{n_k}{2}$ zbiorów elementów, których cechy nie spełniły dwóch kryteriów itd. Zbiory te oznaczono symbolem :

$$\lambda_{iwr} = E_{iwr}^{(n_k+1-w)}$$

gdzie : $E_{iwr}^{(n_k+1-w)}$ - podzbiór elementów systemu i -tego poziomu (n_k+1-w) -tej warstwy, spełniających w -kryteriów, ze zbioru K , według r -tej kombinacji

i nazwano podwarstwami.

Wyodrębnione podwarstwy uporządkowano w sensie leksykograficznym, tzn. z dwóch kombinacji ciągów wskaźników spełnianych kryteriów ta jest wcześniejsza, której pierwszy wskaźnik spełnianego kryterium posiada mniejszą wartość, tzn.

$$(a_1, a_2, \dots, a_p) < (b_1, b_2, \dots, b_q)$$

jeżeli :

$$\exists k < (p, q) \cdot a_i = b_i \cdot \forall i < k \cdot a_k < b_k$$

Oznacza to, że każda warstwa może zawierać n_{wp} uporządkowanych w ciągu podwarstw,

$$\text{gdzie : } n_{wp} = \binom{n_k}{n_k - w}$$

Zatem istotność podsystemu na i -tym poziomie $i = 1, 2, \dots, n$ wyznaczą : wartość wskaźnika $w = 0, 1, 2, \dots, n_k$, tzn. liczbą spełnianych kryteriów oraz wartość wskaźnika $r = 1, 2, \dots, \binom{n_k}{n_k - w}$, przedstawiająca kolejność podwarstwy λ_{iwr} w warstwie $\bigwedge_{i(n_k+1-w)}$.

4.4. Ocena ważności kryteriów

W przypadku badania elementu lub systemu, gdy każdy z nich opisany jest poprzez różne cechy tworzące określone zbiory, własności tych zbiorów można oceniać za pomocą kryteriów, które mogą być traktowane jako :

- równoważne, gdy wszystkie mają jednakową ważność /znaczenia/,
- nierównoważne, gdy ważności poszczególnych kryteriów są zróżnicowane.

Przedstawione sposoby oceny własności elementów scharakteryzował R. Kolman w pracy [52], podając sposób zróżnicowania ważności kryteriów oraz porządkowania ich według odpowiednich stopni ważności, wyrażonych za pomocą tak zwanych liczb lokalizacyjnych /liczb naturalnych/. W omawianej pracy przedstawiono różne wzorce i skale ustalania wartości tych liczb.

Jako jedną z metod ustalania ważności autor proponuje poddanie ocenie informacyjności kolejnych kryteriów w rozpatrywanym zbiorze, zgodnie z przedstawioną procedurą. Przez informacyjność kryterium według [52] należy rozumieć zasób przekazywanej informacji przez to kryterium, w przypadku spełniania go przez cechy obiektu badań.

Podana procedura umożliwia ustalenie zredukowanego poziomu ważności, wyrażonego odpowiednimi współczynnikami. Uszeregowane w przedstawiony sposób kryteria wykorzystuje się do oceny cech obiektów badań.

Należy jednak podkreślić, że brak w omawianej pracy wyników badań dotyczących oceny wpływu subiektywizmu na wyznaczanie współczynnika ważności kryterium, jak również brak porównania ocen, wybranych własności elementów /w pracy dotyczy to jakości/, przy zastosowaniu współczynników ważności z ocenami wyznaczonymi bez ich wprowadzenia, budzi wątpliwości co do zasadności ich stosowania do wyznaczania istotności elementów.

Natomiast A. Podsiadło w pracy [74] przedstawia sposób oceny stopnia ważności kryteriów poprzez wyznaczenie ich cenności informacyjnej I_c w oparciu o tak zwaną moc wybiórczą kryteriów, którą można rozpatrzeć na następującym przykładzie :

Zastosowanie kryterium K_1 powoduje podział zbioru elementów przekroju systemu E_A na dwa rozłączne podzbiory, tzn. E_{A1} i $(E_A \setminus E_{A1}) = \overline{E_{A1}}$, natomiast zastosowanie kryterium K_2 powoduje podział zbioru E_A na dwa inne rozłączne podzbiory, tzn. E_{A2} i $(E_A \setminus E_{A2}) = \overline{E_{A2}}$.

Powstałe zbiory E_{A1} i E_{A2} charakteryzuje się tym, że zawierają różne elementy oraz są z reguły różnej liczebności. Przy tym zgodnie z zasadami budowy kryteriów spełniają one następujące zależności :

$$E_{A1} \cap E_{A2} \neq \emptyset$$

Uogólniając powyższą zależność na n_k -kryteriów otrzymamy :

$$E_{A1} \cap E_{A2} \cap \dots \cap E_{A n_k} = E_1^{(n_k + 1 - m)}, \quad w = n_k$$

Przyjmijmy, że $N_1 < N_2$, gdzie N_1 i N_2 licznosci zbiorów elementow systemu odpowiadajacych kryterium K_1 i K_2 .

Oznacza to, ze kryterium K_1 posiada wieksza moc wybiorcza niz kryterium K_2 . Zatem w wyniku zastosowania kryterium K_1 otrzymamy zbior E_{A1} o mniejszej licznosci niz zbior E_{A2} .

W powyzzym aspekcie najwieksza moc wybiorcza posiada to kryterium, w oparciu o ktore uzyskuje sie podzbior elementow o najmniejszej licznosci.

Przedstawiona wlasnosc kryteriow stala sie punktem wyjscia do oceny cennosci informacyjnej kryteriow I_c oraz wyznaczania cennosci informacyjnej cech elementow systemu.

Informacja zasadniczo nie moze w pelni opisac zjawiska lub systemu. Wyraza ona tylko, z pewna dokladnoscia, ruzne cechy systemu lub jego zachowanie. Dlatego informacje mozna rozpatrywac jako homomorficzne odwzorowanie ruznych cech systemu.

Istotna cecha informacji, oprucz ilosci, jest jej cennosc. Pod pojeciem tym nalezy rozumiec jej wartosc uzytkowa, tzn. efekt uzyskany z wykorzystania danej informacji. Z tego punktu widzenia cennosc informacji opisano jako wzgledna wartosc udzialu elementu na skutek jego uszkodzenia w obnizeniu efektywnosci dzialania systemu, do calkowitej wartosci obnizenia efektywnosci dzialania systemu, spowodowana uszkodzeniami wazystkich jego elementow.

Przedstawiona w pracy [74] metoda mozliwina wyznaczenie o priori cennosci informacyjnej cech elementow systemu, w oparciu o informacje zawarte w dokumentacji technicznej, dotyczace cech elementow. Metoda ta moze byc wykorzystana do porownywania i oceny istotnosci cech elementow wyznaczonej w oparciu o kryteria traktowane jako rownowazne i nierownowazne.

Z uwagi na powyzzsze w niniejszej pracy dokonano porownania istotnosci elementow podwarstw, ktorych kolejnosc wyznaczone poprzez zastosowanie kryteriow traktowanych jako rownowazne z istotnoscia elementow podwarstw, ktorych kolejnosc zostala zmieniona z recji przypisania kazdemu kryterium odpowiedniego wspolczynnika waznoscii /tabl.6.2, pkt.6.1.4./.

Ma to na celu uzyskanie odpowiedzi na pytanie: czy stepniowanie waznoscii kryteriow zwieksza dokladnosc ocen, dotyczacych istotnosci elementow systemu w stopniu uzasadniajacych wzrost kosztow, ich zdobycia ?

Jest to podyktowane tym, ze decydent, poszukujac informacji o maksymalnej oplacalnosci, zainteresowany jest wysokimi wartosciami wspolczynnika efektywnosci. Zna sie przy tym ogolna prawidlowosc, ze wysilki zmierzajace do zwiekszenia dokladnoscii informacji, prowadza do logarytmicznie malejacego przyrostu jej cennosci oraz wykladniczo rosnacego kosztu jej uzyskania [70]. Istnieje zatem punkt optymalny, w ktorym przyrost cennosci informacji jest zrównowazony przyrostem kosztu jej uzyskania. Nastepny krok w kierunku zwiekszenia dokladnoscii informacji prowadzi juz do spadku jej oplacalnosci, poniewaz dodatkowa karzydz jest aniejeza od dodatkowego kosztu.

Jeżeli koszt zdobycia dodatkowej informacji oznaczmy przez $K(\Delta_1)$.

z jej opłacalność, czyli korzyść, przez $O(\Delta_1)$ to można napisać [70] :

$$O(\Delta_1) = c(\Delta_1) - \kappa(\Delta_1).$$

A więc opłacalność dodatkowej informacji jest różnicą pomiędzy cennością informacji z kosztem jej uzyskania.

W oparciu o wyniki badań, przedstawione w tabl.6.2, pkt.6.3 można przyjąć, że stosowanie stopniowania ważności kryteriów do oceny istotności elementów systemu technicznego, według przedstawionego w pracy [74] sposobu postępowania nie powoduje zwiększenia dokładności tych ocen uzasadniającego celowość ich stosowania.

5. BUDOWA MODELU WYNIKOWEGO

5.1. Model nominalny

Punktem wyjścia do budowy modelu nominalnego systemu jest wyznaczenie istotności podsystemów, przekroju tego systemu, zbudowanego z punktu widzenia niezamodności.

W tym celu zdefiniowano operator $F(a_{1j}, K_q)$ jako :

$$F(a_{1j}, K_q) = \begin{cases} 1 & \longleftrightarrow \exists_{K_q} R_{K_q} A_{1j}^{(q)} \\ & q \in (j, n_k) \\ 0 & \longleftrightarrow \exists \sim (K_q R_{K_q} A_{1j}^{(q)}) \\ & q \in (1, n_k) \end{cases}$$

gdzie $R_{K_q} = \{R_{K_q}\}$, $q = 1, 2, \dots, n_k$

R_{K_q} - jest relacje spełniania następującego warunku : podsystem a_{1j} posiada podzbiór cech $A_{1j}^{(q)}$, będących argumentami funkcji kryterialnych K_q , dla których wartość funkcjonału

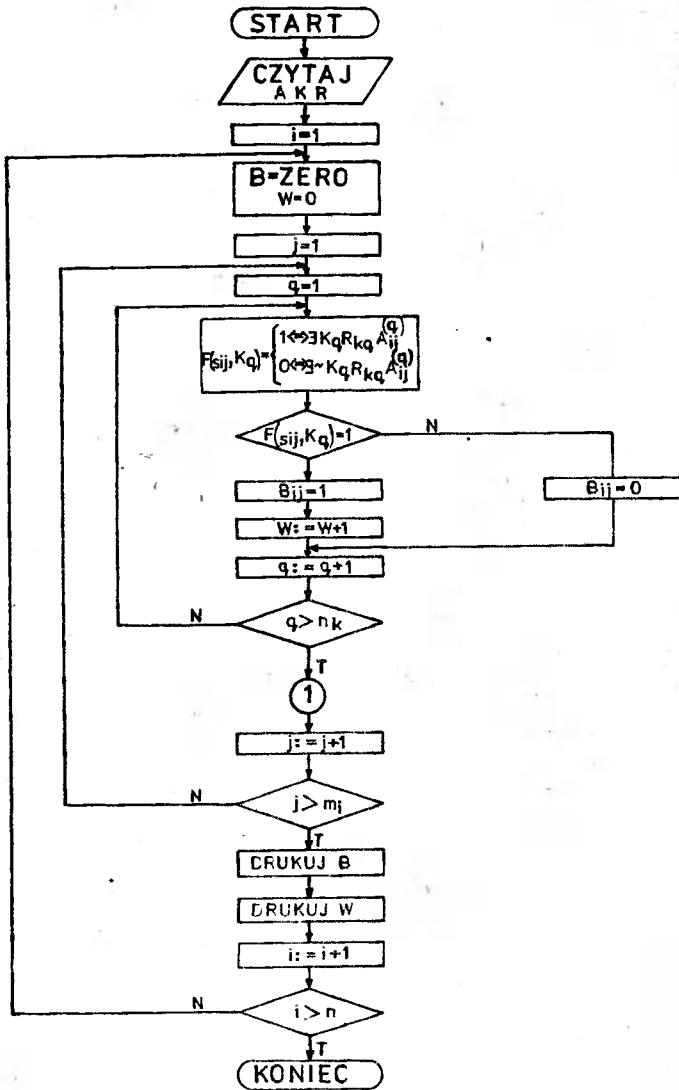
$$\Phi(f) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$

zawiera się w wyznaczonych przez to kryterium granicach, tzn. $a_q < \Phi(f) < b_q$.

Warstwę $\bigwedge_{1, (n_k+1-w)}$ wyznacza operator $G(a_{1j})$:

$$G(a_{1j}) = \sum_{q=1}^{n_k} F(a_{1j}, K_q) = w$$

gdzie : $w = 0, 1, 2, \dots, n_k$



Rys.5.1 Schemat blokowy algorytmu wyboru elementów istotnych z punktu widzenia niezawodności

Operator $G(s_{ij})$ umożliwia przyporządkowanie każdemu podsystemowi $s_{ij} \in E_i$ pewnej liczby/wagi/, która wyraża stopień istotności tego podsystemu /rys.5.1/.

Przedstawia to macierz B_i , gdzie :

$$B_i [n_k \times m_i] = [b_{w, m_i}] = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } G_{s_{ij}} = w \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

W wyniku wyznaczenia istotności elementów przekroju systemu z punktu widzenia niezawodności, na każdym jego poziomie, identyfikujemy elementy o zróżnicowanym stopniu istotności, powiązanych strukturą niezawodnościową. Przyjęto że przekrój systemu z wyznaczonymi stopniami istotności podsystemów stanowi model wstępny systemu rzeczywistego.

5.1.1. Graficzne odwzorowanie modelu nominalnego

Do graficznego odwzorowania modelu nominalnego wykorzystano graf-drzewo wchodzące, którego wierzchołki, na każdym jego poziomie, odwzorowują podsystemy aktywne systemu. Jeżeli każdemu wierzchołkowi grafu przyporządkowujemy pewną liczbę rzeczywistą w , przedstawiającą stopień istotności odpowiedniego podsystemu, to liczba ta łącznie z symbolem kodowym, stanowiącym etykietę wierzchołka, identyfikują w sposób jednoznaczny podsystem.

Budując na każdym poziomie grafu-drzewa odpowiednie struktury niezawodnościowe, sprzęgające w całość usytuowane tam wierzchołki, odwzorowujące podsystemy, otrzymamy elementarny graf skierowany H_{wr} ilustrujący model wstępny systemu /rys.5.2/.

Opisany graf H_{wr} zawiera :

- podgrafy skierowane, zawierające podzbiór wierzchołków usytuowanych na danym poziomie grafu wraz z krawędziami między nimi, przedstawiającymi strukturę niezawodnościową ;
- ścieżki skierowane, których wierzchołkami końcowymi są - dowolny wierzchołek wiszący i korzeń grafu, przy tym każdy z wierzchołków pośrednich usytuowany jest względem poprzedniego na wyższym poziomie grafu ;
- elementarne podgrafy skierowane, zawierające podzbiór wierzchołków o ustalonej wartości w i krawędzi między nimi.

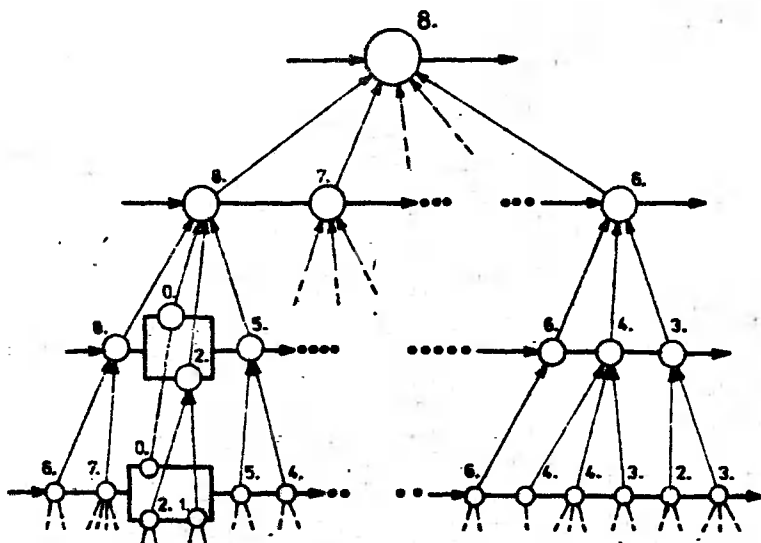
Jak wynika z rys.5.2 każdy poziom grafu H_{wr} odzwierciedla system rzeczywisty w postaci systemu o strukturze niezawodnościowej. Struktura ta sprzęga w całości elementy aktywne systemu o zróżnicowanym stopniu istotności, z punktu widzenia niezawodności systemu.

Kolejne odwzorowania systemu rzeczywistego, odwzorowane na każdym poziomie grafu H_{wr} , różnią się między sobą stopniem szczegółowości od-

wzorowania, który wynika z przyjętych zasad dekompozycji systemu.

Do opisu niezawodności każdego z odwzorowanych systemów można zatem wykorzystać zależności przedstawione w teorii niezawodności jak również stosować znane modele.

Natomiast interpretacji wymaga łatwość znaczenia krawędzi skierowanych grafu H_{WR} , łączących wierzchołki grafu uastuowanych względem siebie, na kolejnych wyższych poziomach.



Rys.5.2 Elementarny graf skierowany H_{WR} o skali stopniowej ocen istotności podsystemów

Oznaczmy zbiór zdarzeń, polegających na uszkodzeniu określonego podsystemu w systemie przez $D = \{D_f\}$, $f = 1, 2, \dots, N$, gdzie N - liczba podsystemów w systemie, a przez $q_{s_{1j}}|s_{k1}$ prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia podsystemu s_{1j} pod warunkiem uszkodzenia się jego podsystemu s_{k1} .

Wówczas :

$$q_{s_{1j}}|s_{k1} = P(D_{s_{1j}}|D_{s_{k1}}) \cdot \sum_{k>1} (i, k = 0, 1, \dots, n)$$

spełnia warunek :

$$0 < q_{s_{1j}}|s_{k1} < 1$$

Różnica $(1 - q_{s_{1j}}|s_{k1})$ jest warunkową miarą odporności podsystemu s_{1j} na skutki uszkodzeń jego dekomponentu s_{k1} .

Wyniki badań eksploatacyjnych, przedstawione w rozdziale 6 dowodzą,

Ze odporność systemu na skutki uszkodzeń jego podsystemów jest funkcją stopnia istotności tych podsystemów. Przy tym odporność systemu na skutki uszkodzeń jego podsystemów o najwyższym stopniu istotności jest bliska zeru i rośnie do jedności w miarę zmniejszania się stopnia istotności podsystemów. Analiza łańcuchów skierowanych pozwala na oszacowanie wpływu uszkodzenia elementu na efektywność podsystemu nadrzędnego, do systemu jako całości włącznie.

Mając na uwadze zróżnicowany stopień istotności podsystemów, odwzorowanych w postaci wierzchołków grafu, z grafu H_{WR} można wyodrębnić uporządkowany zbiór podgrafów h_{wr} , których wierzchołki posiadają ustalone wagi.

Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w pkt.4.3. wyodrębnione podgrafy można uporządkować następująco :

- pierwszym podgrafen jest podgraf $h_{w_{max}}$, $r = 1$ zawierający wierzchołki o maksymalnej wadze i incydentne między nimi krawędzie /rys.

5.3/ :

- drugim podgrafen jest podgraf będący sumą dwóch podgrafów, tj.

$h_{w_{max}, r=1} \cup h_{w_{max-1}, r=1}$, tzn. podgrafen zawierającym wierzchołki o wadze $w_{max, r=1}$ i $w_{max-1, r=1}$ wraz z incydentnymi między nimi krawędziami :

- kolejnym podgrafen jest podgraf będący sumą podgrafów $h_{w_{max}, r=1}$

$\cup h_{w_{max-1}, r=1} \cup h_{w_{max-1}, r=2}$ itd. aż otrzymany graf H_{WR} , będący ostatnim podgrafen w omawianym zbiorze, którego wierzchołkom przyporządkowane są wszystkie możliwe wartości wagi, tzn. od $w_{max, r=1}$ do $w = 0$.

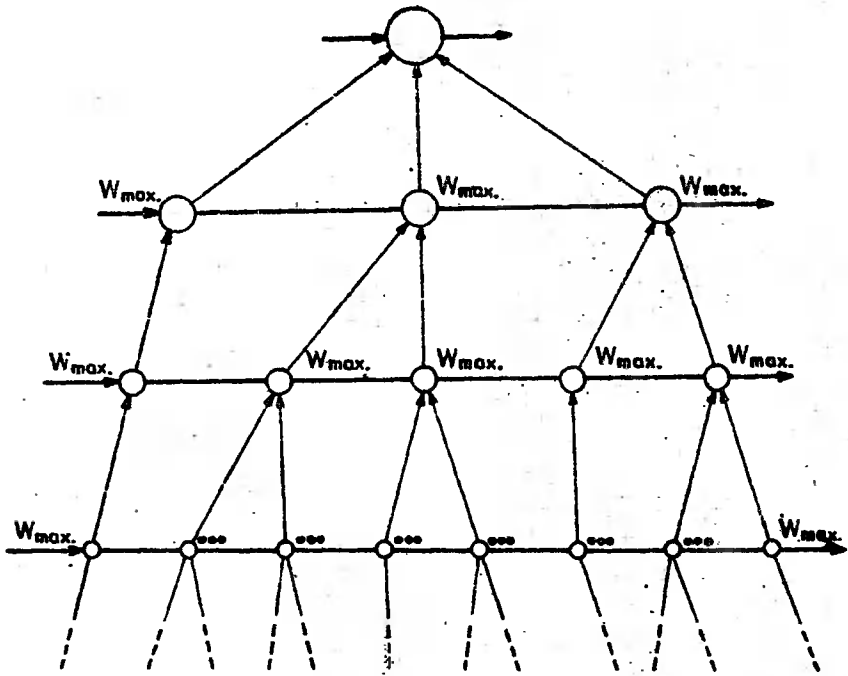
Jak widać graf H_{WR} zawiera skończoną liczbę podgrafów h_{wr} , z których każdy może stanowić model wynikowy systemu rzeczywistego.

W pierwszym etapie można przyjąć do badań prosty model wynikowy, tzn. ograniczony do niewielkiej liczby elementów o najwyższej istotności. Oznacza to, że odrzucamy dużą liczbę elementów i relacji zachodzących między nimi /rys.5.3/.

Musimy jednak zdawać sobie sprawę z tego jak daleko model i problemy, na które szukamy odpowiedzi, oddalamy od rzeczywistości.

Wnioski uzyskane we wstępnych badaniach ułatwiają wybór dokładniejszego modelu.

Należy tu wyjaśnić, że mówiąc o wyborze kolejnych modeli, należy mieć na myśli wszelkie działania, zmierzające do wyboru optymalnego modelu, tzn. takiego, który będzie najlepiej opisywać system, z przyjętego punktu widzenia.



Rys.5.3. Elementarny podgraf skierowany o maksymalnej wadze wierzchołków

5.2. Zagadnienie wyboru optymalnego modelu wynikowego

Wyboru odpowiedniego modelu wynikowego, z określonej klasy modeli dokonuje się w procesie identyfikacji.

Głównym celem identyfikacji jest wyznaczenie relacji odpowiedności między badanym systemem rzeczywistym /fragmentem rzeczywistości/ a jego modelem. W procesie identyfikacji ocenia się przydatność zastosowania modelu do odwzorowania zachowania się badanego systemu. Powstaje więc problem oceny w jakim stopniu model jest adekwatny do rzeczywistości.

Zadanie w rozpatrywanym przypadku sprowadza się do wyboru najlepszego wariantu modelu ze wszystkich możliwych, jakie zawiera model wstępny, z przyjętego punktu widzenia.

Zadanie to proponuje się rozwiązać w dwóch etapach. W pierwszym etapie przyjmujemy, że jakość modelu można ocenić za pomocą pewnej normy:

$$\left| M_R(E_i)^{(n_k+1-w)} - M_R(E_i) \right|$$

oceniającej odległość między zbiorami wartości przyjmowanymi przez określoną miarę niezawodnościową, wyznaczoną dla systemów zawierających zbiory $E_i^{(n_k+1-w)}$ oraz E_i /przy ustalonym $i = n/$.

Rodzaj operacji matematycznych jak i wybór konkretnej postaci normy $\| \cdot \|$ może być opisany przy pomocy wyrażenia zwanego funkcją jakości/kryterium jakości/. Zatem problem poszukiwania optymalnego modelu można sprowadzić do wyznaczenia minimalnego podzbioru elementów istotnych :

$$\min \text{card } E_1^{(n_{k+1}-w)}$$

dla którego spełniony jest następujący warunek :

$$Q_1 = \| M_R(E_1)^{n_{k+1}-w} - M_R(E_1) \| < \delta$$

W większości przypadków tylko przy silnym ograniczeniu stawianych wymagań można ocenić jakość modelu za pomocą jednego kryterium jakości Q_1 , które w wyniku optymalizacji może przyjąć wartość maksymalną lub minimalną.

Często natomiast z uwagi na złożony cel istnienia systemu i złożoność rozwiązywanego problemu; sytuacja zmusza do tego, aby przy wyborze odpowiedniego wariantu modelu różne punkty widzenia wyrażać za pomocą wielu kryteriów jakości Q_1, Q_2, \dots, Q_k , zależnych od zmiennych sterujących :

$$Q_i = Q_i(a_1, a_2, \dots, a_{s_i}), \quad i = 1, 2, \dots, k$$

Wówczas cel ten można osiągnąć poprzez utworzenie tzw. zastępczego kryterium jakości Q_2 z różnych, częściowo przeciwstawnych kryteriów.

Może być wówczas wymagane osiągnięcie maksymalnego efektu /np. dokładności odwzorowania/ przy minimalnych nakładach /kosztach/ lub też, aby wiele wielkości charakterystycznych osiągnęło wartości optymalne możliwie równocześnie.

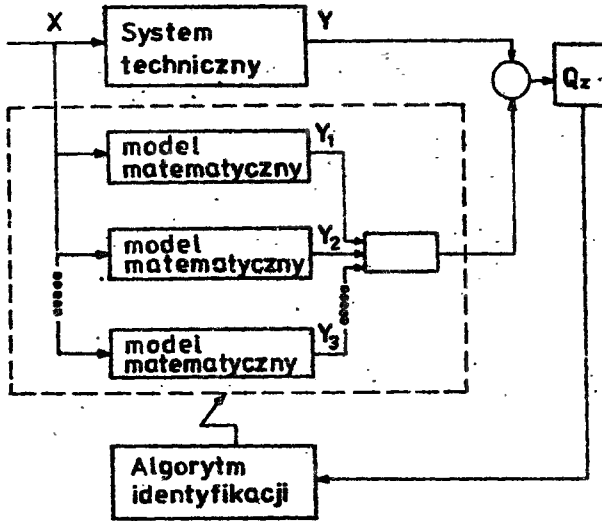
Przy dużej liczbie wymagań występują - ogólnie rzecz biorąc - sprzeczności, które prowadzą do tego, że odpowiednie kryteria jakości nie mogą być jednocześnie zoptymalizowane przez określone sterowanie /wybór wielkości sterujących/.

Pojęcie optymalizacji jest przy tym w najogólniejszym sensie rozumiane tak, że przez pewne zamierzone działanie osiąga się w systemie pewien maksymalny efekt [73].

Celem tak rozumianej optymalizacji jest wykorzystanie w relacji między kryteriami jakości i zmiennymi sterującymi do wyznaczenia pewnego optymalnego zbioru w obzarcze wartości zmiennych sterujących lub kryteriów jakości, który stanowi podstawę do przyjęcia rozwiązania kompromisowego.

A zatem w drugim etapie wyboru wariantu modelu proponuje się budowę kryteriów jakości Q_1, Q_2, \dots, Q_k , uwzględniających różne punkty widzenia, wynikające z celu badań, a następnie utworzenia z tych kryteriów zastępczego kryterium jakości Q_2 . Przez optymalizację tej zastępczej funkcji Q_2 otrzymuje się rozwiązanie kompromisowe dla całego problemu.

Postępowanie takie ma charakter procesu iteracyjnego /rys.5.4/. Nie oznacza to jednak, że na każdym kroku iteracyjnym należy automatycznie



Rys.5.4 Schemat zasady wyboru optymalnego modelu [105]

dążyć do budowy modelu o coraz bardziej złożonej strukturze, a więc poszukiwać modelu, który potencjalnie może lepiej opisywać system rzeczywisty.

Prowadzi to bowiem do konieczności zdobywania, najczęściej na podstawie pomiaru - coraz większej ilości, coraz trudniej osiągalnych informacji o systemie rzeczywistym. Powoduje to, że część informacji może być obciążona dużym błędem i w związku z tym jakość opisu systemu przy pomocy modelu o złożonej strukturze może pogorszyć się [105].



6. PRZYKŁADY

Jako przykłady obiektu badań, za pomocą których przedstawiono metodę budowy i zweryfikowane zaproponowany w rozprawie model, wybrane okrętowy silnik napędu głównego Sulzer typu RD oraz kombajn zbożowy "Bizon - Super" Z 056 i Z 050.

Oba przykłady dotyczą złożonego systemu technicznego, działającego, celowościowego, zgodnie z przyjętym w pkt.2 obiektem badań.

6.1. Okrętowy silnik napędu głównego statku Sulzer typu RD

Aktualne tendencje w rozwoju silników okrętowych świadczą o przywiązaniu dużej wagi do niezawodności ich działania [24][30][34]. Konieczność zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności silników głównych jest podstawowym problemem, wynikającym z bezpieczeństwa żeglugi, ponieważ awaria silnika głównego pociąga za sobą nie tylko stratę czasu i rybków, ale oznacza także możliwość utraty ładunku, niebezpieczeństwo kolizji lub osadzenie statku na mieliźnie, przy czym może wyniknąć zagrożenie życia ludzkiego.

Większość cech statku wynika z cech silowni, zawierającej silnik główny, instalacje zasilające oraz maszyny i urządzenia pomocnicze. Nowoczesność oraz sprawność silowni zależy bezpośrednio od walorów eksploatacyjnych silnika głównego.

Wysoka jakość wykonywanego zadania oraz efektywność i dogodność eksploatacyjna silnika głównego stanowią jedną z głównych pozycji w zespole warunków, decydujących o wartości eksploatacyjnej statku.

Biorąc pod uwagę zespół narażeń, jakie stwarza środowisko morskie, utrudnienie związane z koniecznością ciągłej pracy w zmiennych warunkach oraz brak stałego kontaktu z przedsiębiorstwami remontowymi, należy stwierdzić, że zagadnienie zapewnienia maksymalnego poziomu niezawodności silnika głównego, możliwego do osiągnięcia w danych warunkach ogólnych, staje się problemem podstawowym.

Zadanie to nabiera szczególnego znaczenia dla dużych zbiornikowców i kontenerowców, przed którymi stawia się wysokie wymagania, dotyczące bezpieczeństwa żeglugi oraz skracania czasu trwania rejsu.

Spełnienie powyższych zadań zależy, w dużym stopniu, od niezawodności i trwałości układu napędowego statku.

Przyjmując, że kryterium bezpieczeństwa żeglugi w sensie zabezpieczenie ciągłego ruchu lub ciągłej gotowości do ruchu jest podstawowym kryterium, określającym zespół warunków ogólnych, mających wpływ na niezawodność działania morskiego statku transportowego, jako przykład badań obiektu przyjęto silnik napędu głównego ataku typu RD najczęściej stosowany na statkach w Polskiej Marynarce Handlowej.

Silniki typu RD są to silniki spalinowe, nieskoobrotowe, doładowywane, dwusuwowe, jednostronnego działania, bezpośrednio nawrotne, z bezpośrednim wtryskiem paliwa o mocy dochodzącej do 20 000 kW.

Jest to typ silnika obecnie najliczniej występujący w statkach Polskiej Marynarki Handlowej [58], produkowany przez wytwórcę krajowego - Zakłady Przemysłu Metalowego H. Cegielski w Poznaniu według licencji firmy Sulzer.

6.1.1. Identyfikacja systemu

W celu umożliwienia budowy modelu wstępnego silnika, dokonano jego identyfikacji, w ramach której poddano szczegółowej analizie logicznej zasady funkcjonowania poszczególnych jego urządzeń, układów i zespołów konstrukcyjnych.

Analizę wykonano w oparciu o zbiór informacji zawartych w dokumentacji techniczno-ruchowej. Dokumentacja ta zawiera: zbiór schematów funkcjonalnych, odtwarzających wszystkie wchodzące w skład obiektu badań elementy i urządzenia oraz związki funkcjonalne między nimi, komplety rysunków zestawieniowych podzespołów, zasady montażu i demontażu itp.

Zbraną dokumentację zweryfikowano w oparciu o katalog elementów składowych silnika, wydany przez producenta.

W wyniku analizy oraz badań testowych ustalono, że silniki typu RD-68 i RD-76 różnią się między sobą w bardzo niewielu szczegółach i w związku z tym można je badać jako obiekty jednorodne. Przy tym elementy, które nie występują w jednym a występują w drugim silniku, zaznaczono na schematach oraz na kartach statystycznych.

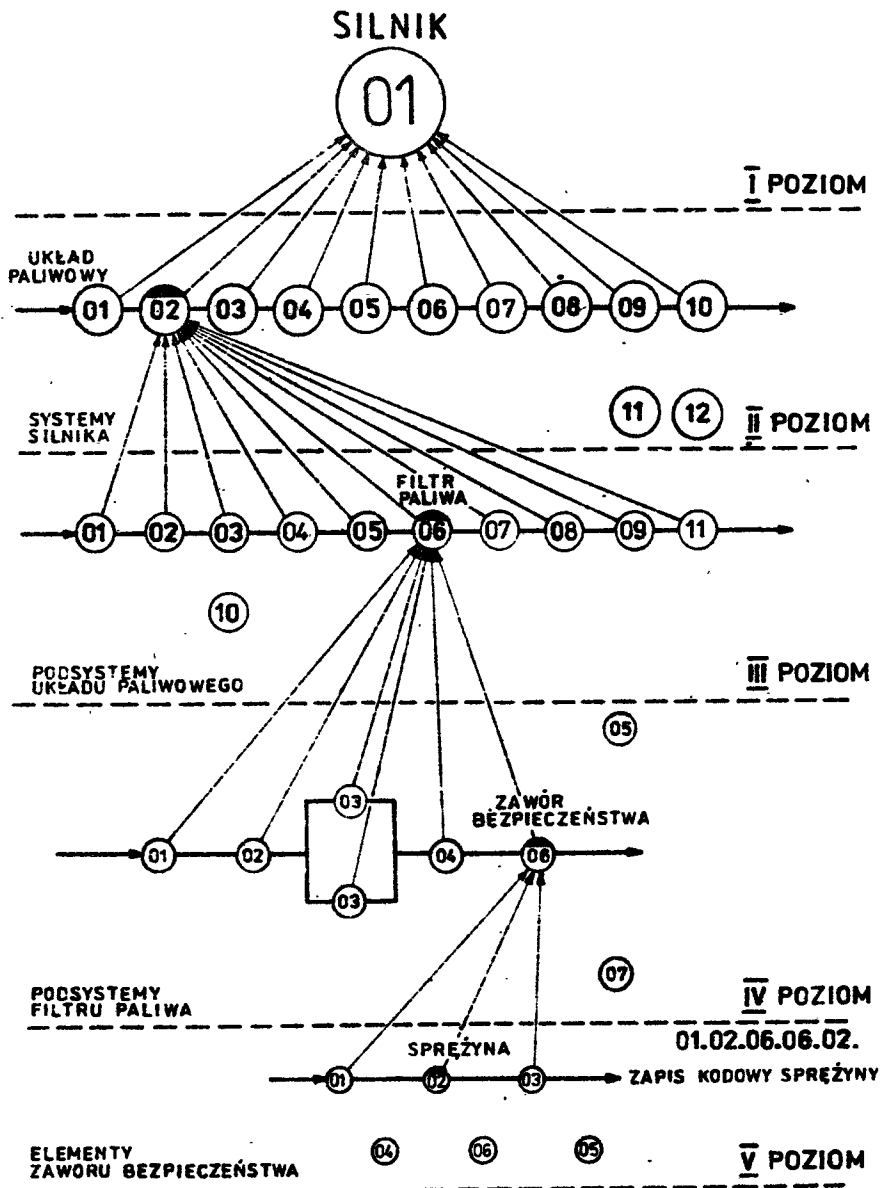
Na podstawie powyższych informacji wykonano dekompozycję obiektu badań, tzn. silnika typu RD, traktowanego jako element systemu jakim jest morski statek transportowy.

Przy tym, zgodnie z przyjętym w precy obiektem badań, silnik napędu głównego, jako element systemu, odwzorowano w postaci wierzchołka-korze - nia, na pierwszym poziomie grafu-drzewa, pomijając w odwzorowaniu te systemy, w których był ich elementem składowym.

Dwanaście wierzchołków na drugim poziomie grafu skierowanego, to wydzielone podsystemy silnika /paliwowy, chłodzenia, smarowania, wymiany ładunku, rozruchowy, tłokowo-korbowy, kadłub silnika, napędy rozrządu i przesterowania, blokady, pomiarowo-kontrolny, obracarka/, których elementy składowe, traktowane jako podsystemy, odwzorowano na niższych poziomach grafu.

Ilość poziomów grafu-drzewa wynosi $k = 5$, przy czym na poziomie pię-

tym grafu, występujące tam wierzchołki wiążące odwzorowują podsystemy, traktowane jako niepodzielne elementy /rys.6.1/.



Rys.6.1 Fragment przekroju systemu /silnika napędu głównego/ z punktu widzenia niezawodności

W celu uproszczenia odwzorowania graficznego modelu wstępnego przyjęto następujące założenia :

- elementy dostarczone przez wytwórcę silników oraz montowane bezpośrednio na obudowie silnika stanowią jego integralną część ;
- każdy element niepowtarzalny systemu /wał korbowy, łożysko oporowe, wał rozrządu itp./ jest odwzorowany jednoznacznie w postaci jednego wierzchołka ;
- elementy powtarzalne /cylindry, tłoki, pierścienia tłokowe, korbowody itp./ przyperzaskowano również jeden wierzchołek grafu, nie uwzględniając w odwzorowaniu ich wielokrotnego występowania w systemie ;
- poszczególne podsystemy i elementy rozmieszczone na różnych poziomach dekompozycji opisane przy pomocy systemu dwucyfrowych kodów adresowych według tabeli 6.1.

Tabela 6.1.

Schemat zasady kodowania elementów

Poziom	Oznaczenia cyfrowe	Opis oznaczenia /przykład/
I	01	silnik napędu głównego statku
II	01.02	układ paliwowy SG
III	01.02.06	filtr paliwa układu paliwowego
IV	01.02.06.06.	zawór bezpieczeństwa, filtra paliwa układu paliwowego SG /element systemu na poziomie IV/
V	01.02.06.06.06.	zawór bezpieczeństwa, filtra paliwa układu paliwowego SG /system na poziomie V/
	01.02.06.06.02.	sprężyna zaworu bezpieczeństwa

6.1.2. Budowa przekroju systemu z punktu widzenia niezawodności

W oparciu o warunki wynikające z funkcji zdaniowej $\Phi_i^{(2)}$ /por. pkt.3.8.2./ na zbiorze elementów systemu E_N opisano s_{ij} wielo-
członową relację równoważnościową $R_k^{(r)}$, $k = 1, 2, 3, \dots$, predykt wielo-
argumentowy - argumentami którego są różne funkcje zdaniowe ψ_k .

Relacja $R_k^{(r)}$ równoważnościowa w zbiorze elementów systemu E_N dyktuje rozkład tego zbioru na podzbiory /abstrakty/ o następujących własnościach :

- podzbiory są podziorami niepustymi zbioru E_N .
- podzbiory są rozłączne.
- łącznie dają zbiór E_N .

Jednocześnie charakterystyki treściowe, wynikające z funkcji $\phi(2)$ umożliwiają wyodrębnienie sprzężeń zachodzących między elementami wyznaczonych podzbiorów z przyjętego punktu widzenia.

Mając na uwadze oddziaływanie uszkodzenia elementu na ograniczenie możliwości realizacji zadania przez system, postacie funkcji zdaniowych przyjęto w oparciu o definicję elementów podstawowych, rezerowych i pasywnych.

Prowadzi to do podziału zbioru elementów systemu E na następujące podzbiory :

- podzbiór elementów podstawowych E_p .

$$E_p = \{ (e \in E_N) \wedge \Psi_1 \},$$

jest abstraktem, powstałym z tych elementów systemu, które spełniają warunki wynikające z następującej funkcji zdaniowej Ψ_1 :

" e jest elementem, którego zastosowanie w systemie jest niezbędne do wykonania zadania przez system".

- podzbiór elementów rezerowych E_r .

$$E_r = \{ (e \in E_N) \wedge \Psi_2 \},$$

jest abstraktem, powstałym z tych elementów systemu, które spełniają warunki wynikające z następującej funkcji zdaniowej :

" e jest elementem, przeznaczonym do przejmowania funkcji czynnego elementu systemu w przypadku, gdy element ten uszkodzi się".

- podzbiór elementów pasywnych E_z .

$$E_z = \{ (e \in E_N) \wedge \Psi_3 \},$$

jest abstraktem, powstałym z tych elementów systemu, które spełniają warunki wynikające z funkcji zdaniowej :

" e jest elementem, którego nieprzewidziane działanie, czy nawet brak w systemie nie spowoduje niezadziałania systemu, ale ma zasadniczy wpływ na dogodność użytkowania, obsługiwanie lub jakość wyrobu".

Przedstawione zbiory E_p , E_r i E_z należy tak wyznaczyć, aby spełnione były następujące zależności :

$$E_p \cup E_r \cup E_z = E_N,$$

$$E_p \cap E_r \cap E_z = \emptyset.$$

oraz

$$E_p \cap E_r = \emptyset$$

$$E_r \cap E_z = \emptyset$$

$$E_p \cap E_z = \emptyset$$

$$E_p \cup E_r = E_A$$

Dokonanie podziału zbioru elementów systemu E_N na opisane podzbiory umożliwiło odwzorowanie sieci sprzężeń zachodzących między elementami tych podzbiorów z punktu widzenia niezawodności działania systemu.

Elementy systemu powiązane szeregowo na każdym poziomie grafu / dla kompozycji / wówczas, gdy dla prawidłowego działania systemu konieczne jest działanie rozpatrywanego elementu.

Elementy powiązane równoległe na każdym poziomie grafu wówczas, gdy dla realizacji określonego zadania przez system, wystarczające jest prawidłowe działanie jednego z rozpatrywanych elementów, natomiast pozostałe elementy stanowią rezerwę systemu umożliwiającą zastąpienie w pracy elementu uszkodzonego.

Elementy pasywne, przedstawione jako monady, tzn. jako elementy niesprzężone z żadnym innym elementem działającym w systemie /rys.6.1/np. układ pomiarowo-kontrolny /1/ i obrabarka /12/ odwzorowane na drugim poziomie grafu.

Elementy aktywne powiązane z tymi podsystemami, bezpośredniego wyższego poziomu, których są dekomponentami.

W wyniku zastosowania omawianych zasad, dotyczących sposobu odwzorowania systemu, zbudowano przekrój systemu z punktu widzenia niezawodności, który w postaci grafu przedstawiono na rys.6.1.

6.1.3. Kryteria oceny istotności elementów silnika napędu głównego ze względu na niezawodność

Zgodnie z rozważaniami na temat zasad budowy kryteriów oraz w oparciu o klasyfikację :

- czynników charakteryzujących stany cech otoczenia,
- skutków stanów niezdatności elementów /podsystemów/ na efektywność działania systemu,
- możliwość działania czynników odnawiających,

opracowano zestaw kryteriów, adekwatnych do przyjętego obiektu badań. Zestaw kryteriów ułożono w trzech grupach, zgodnie z przyjętą podziałem /pkt.4.2/. Przy tym każde z kryteriów opracowano w ten sposób, aby na podstawie kolejno zadawanych pytań i uzyskiwanych odpowiedzi zapewnić możliwość jednoznacznego zakwalifikowania rozpatrywanego elementu systemu do podzbioru elementów, przyporządkowanych danemu podkryterium.

Do pierwszej grupy zaliczono kryteria K_1, K_2, K_3 , umożliwiające ocenę wpływu działania czynników wymuszających na stany cech elementów podsystemu.

K_1 - kryterium obciążenia cieplnego, zawierające podkryteria $k_1^{(1)}$.

$k_2^{(1)}$ i $k_3^{(1)}$ przy czym :

- $k_1^{(1)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z działaniem czynników wymuszających, powstałych w trakcie procesu przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię cieplną ;
- $k_2^{(1)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z działaniem czynników wymuszających, wynikających z udziału tych elementów w procesie przetwarzania energii cieplnej na pracę wykonywaną przez układ napędowy ;
- $k_3^{(1)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z działaniem czynników wymuszających, wynikających z udziału tych elementów w procesie realizacji przepływu paliwa, oleju i powietrza.

Kryterium to umożliwia wydzielenie podzbiorów elementów posiadających cechy, których wartości zawierają się w ustalonych w podkryteriach przedziałach ich zmienności w przedziale czasu Δt .

Niezbędne jest w tym celu wykonanie następujących, kolejnych "kroków" działania :

- krok polegający na wyodrębnieniu podsystemu, którego elementy realizują proces spalania /spełniają funkcję zdaniową Ψ_1 /.

Wymaga to stwierdzenia czy występująca w trakcie przebiegu procesu spalania wymuszenia robocze, traktowane jako odpowiednie składowe wektora wejścia X_w , rozpatrywanego elementu, są transformowane na składowe wektora wyjścia Y_w .

Oznacza to konieczność wyboru tych elementów, które realizują omawiany proces, wówczas :

$$X_w = S_{rs} \cdot Y_w \quad \text{dla } s \neq r$$

gdzie : S_{rs} - macierz kwadratowa zero-jedynkowa opisująca sprzężenie elementu r-tego z elementem s-ym.

Odpowiedź jest pozytywna, jeżeli określone w podkryterium oddziaływanie /wejścia/ są w korelacji ze stanami elementu lub podsystemu /wyjścia/.

Elementy, w stosunku do których otrzymano odpowiedź pozytywną, tworzą podzbiór $E_1^{(1)}$:

$$E_1^{(1)} = \{e \in E_A \wedge \Psi_1(k_1^{(1)})\},$$

gdzie : E_A - podzbiór elementów aktywnych systemu

Zatem :

$$E_A = E_p \cup E_r$$

W następnych "krokach" wyznaczono podzbiór $E_2^{(1)}$ i $E_3^{(1)}$, przy czym :

$$E_2^{(1)} = \{e \in E_A \wedge \Psi_1(k_2^{(1)})\}$$

oraz :

$$E_3^{(1)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_1(k_3^{(1)}) \}$$

K_2 - kryterium sił dynamicznych, zawierające podkryteria $k_1^{(2)}$, $k_2^{(2)}$, $k_3^{(2)}$, przy czym :

$k_1^{(2)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z oddziaływaniem sił bezwładności, w trakcie wykonywania przez te elementy ruchu postępowo-obrotowego ;

$k_2^{(2)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z oddziaływaniem sił bezwładności, w trakcie wykonywania przez te elementy ruchu obrotowego ;

$k_3^{(2)}$ - dotyczy elementów nieruchomych, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z oddziaływaniem sił /akcji-reakcji/ wynikających ze współpracy tych elementów z elementami będącymi w ruchu.

Analogicznie określone następujące podzbiory :

$$E_1^{(2)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_2(k_1^{(2)}) \}$$

$$E_2^{(2)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_2(k_2^{(2)}) \}$$

$$E_3^{(2)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_2(k_3^{(2)}) \}$$

K_3 - kryterium ciągłości pracy, zawierające podkryteria $k_1^{(3)}$ i $k_2^{(3)}$, przy czym :

$k_1^{(3)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio, w sposób ciągły, związane z działaniem czynników wymuszających, powstałych na skutek wykonywania pracy przez silnik główny. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_1^{(3)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_3(k_1^{(3)}) \}$$

$k_2^{(3)}$ - dotyczy elementów, których zmiany stanu cech są bezpośrednio związane z okresowym działaniem czynników wymuszających, powstałych w czasie rozruchu, przerywania pracy lub zmiany ilości obrotów wału silnika głównego. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_2^{(3)} = \{ \sigma \in E_A \wedge \Psi_3(k_2^{(3)}) \}$$

Do drugiej grupy zaliczono kryteria K_4 , K_5 umożliwiające ocenę skutków stanu niezdatności elementów.

K_4 - kryterium bezpieczeństwa, zawierające podkryteria $k_1^{(4)}$, $k_2^{(4)}$, $k_3^{(4)}$, przy czym :

$k_1^{(4)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenie stanowi zagrożenie bezpieczeństwa załogi i statku. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_1^{(4)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_4(k_1^{(4)})\}$$

$k_2^{(4)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenie stanowi wyraźny wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia innych elementów obiektu. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_2^{(4)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_4(k_2^{(4)})\}$$

$k_3^{(4)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenie stanowi wyraźny wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia elementów współpracujących. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_3^{(4)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_4(k_3^{(4)})\}$$

K_5 - kryterium zakłóceń ruchu, zawierające podkryteria $k_1^{(5)}$ i $k_2^{(5)}$, przy czym :

$k_1^{(5)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenie, najpoważniejsze z możliwych, spowoduje wezwanie pomocy ratowniczej lub holowniczej. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_1^{(5)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_5(k_1^{(5)})\}$$

$k_2^{(5)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenie najpoważniejsze z możliwych, spowoduje przestój statku w morzu. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_2^{(5)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_5(k_2^{(5)})\}$$

Do trzeciej grupy zaliczono kryteria K_6 i K_7 umożliwiające ocenę możliwości działania czynników odnawiających.

K_6 - kryterium naprawialności, zawierające podkryteria $k_1^{(6)}$ i $k_2^{(6)}$, przy czym :

$k_1^{(6)}$ - dotyczy elementów, których wymiana lub naprawa może być wykonana tylko przez zakłady specjalistyczne z uwagi na konieczność uzyskania atestu. Elementy te tworzą podzbiór:

$$E_1^{(6)} = \{e \mid (e \in E_A) \wedge \Psi_6(k_1^{(6)})\}$$

$k_2^{(6)}$ - dotyczy elementów, których naprawa lub wymiana może być wykonana przez załogę, po uprzednim zatrzymaniu statku. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_2^{(6)} = \{e \in E_A \wedge \Psi_6(k_2^{(6)})\}$$

K_7 - kryterium trudności, obsługi, zawierające podkryteria $k_1^{(7)}$ i $k_2^{(7)}$ przy czym :

$k_1^{(7)}$ - dotyczy elementów, do których dostęp w celu kontroli pracy jest szczególnie trudny, ponieważ wiąże się z koniecznością wykonywania dodatkowych prac takich jak : demontażu elementów, montażu przyrządów, aparatury pomiarowej itp. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_1^{(7)} = \{e \in E_A \wedge \Psi_7(k_1^{(7)})\}$$

$k_2^{(7)}$ - dotyczy elementów, których konserwacja bieżąca jest szczególnie trudna, ponieważ wiąże się z koniecznością wykonywania demontażu elementów, mycia, czyszczenia itp. Elementy te tworzą podzbiór :

$$E_2^{(7)} = \{e \in E_A \wedge \Psi_7(k_2^{(7)})\}$$

6.1.4. Zasady stosowania kryteriów do oceny istotności elementów silnika napędu głównego

Jako przykład ilustrujący zasady stosowania kryteriów, wybrano jeden z systemów silnika napędu głównego, a mianowicie układ wymiany ładunku, pełniący w odzworowaniu, ze względu na przejrzystość zapisu graficznego, układy sprzężone z rozpatrywanym układem.

W oparciu o powyższe, układ wymiany ładunku, będący podsystemem silnika i odzworowany na drugim poziomie dekompozycji, potraktowano jako system, którego dekompozycję wykonano zgodnie z zasadami przedstawionymi w pkt.3.3.

Na rysunku 6.2 przedstawiono odzworowanie rozpatrywanego układu, wyodrębniając na drugim poziomie grafu /dekompozycji/ następujące podsystemy :

- O1 - obrotowy zawór wylotu.
- O2 - turbosprężarka.
- O4 - przewody wydychowe.
- O5 - zasobnik powietrza.
- O6 - zawory zwrotne.

Wierzchołek grafu z etykietą O3 przedstawiający zespół podpór turbosprężarki, eliminujący drgania wywołane pulsacyjnym przepływem spalin, wyeliminowano z dalszych rozważań w procesie modelowania, tzn. w procesie budowy przekroju systemu. Przy tym należy podkreślić, że brak kolejności numeracji oznaczeń wierzchołków grafu, przedstawiających elementy poszczególnych układów, wynika z dokonanego uproszczenia polegającego na wyeliminowaniu z odzworowania wierzchołków przedstawiających elementy pa-

sywne.

Trzeci poziom grafu to wyodrębnione podsystemy, systemów przedstawionych na drugim jego poziomie.

Na czwartym poziomie grafu przedstawiono podsystemy, w postaci wierzchołków wiązanych, które ze względu na cel badania potraktowano jako niepodzielne elementy /wał, śruba, kołek itd./.

W stosunku do każdego z elementów odwzorowanych na kolejnych poziomach grafu w postaci wierzchołków zastosowano zestaw siedmiu kryteriów selekcyjnych, zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys.6.3.

Zaszeregowanie elementu do odpowiedniego podzbioru, przyporządkowanemu danemu kryterium, oznaczono poprzez przyporządkowanie każdemu wierzchołkowi grafu indeksów spełnianych kryteriów.

6.1.5. Elementy istotne z punktu widzenia niezawodności okrętowego silnika Sulzer RD-68 i RD-76

Zastosowanie siedmiu kryteriów do oceny istotności elementów systemu umożliwia uporządkowanie tych elementów, na każdym poziomie dekompozycji, w warstwy oraz w każdej warstwie w podwarstwy.

Mając na uwadze, że dokładność uzyskiwanych ocen dotyczących niezawodności systemu rzeczywistego zniekształca się wraz ze wzrostem szczegółowości rozpatrywania systemu /poziomu dekompozycji/, co jest wynikiem zwiększającej się liczności podzbioru elementów na każdym, kolejnym poziomie dekompozycji, jak również to, że sposób ich uzyskiwania jest dla każdego poziomu identyczny, przedstawione w pracy wyniki badań ograniczone do jednego ostatecznego /piątego/ poziomu dekompozycji.

Na poziomie tym uporządkowano elementy w ośmiu warstwach, zawierających osiemdziesiąt siedem podwarstw.

PIĘRWSZĄ WARSZTWE w przekroju systemu, z punktu widzenia niezawodności, na piątym poziomie dekompozycji, wyznacza dla silników typu RD-68 i RD-76 podzbiór 17 elementów. Są to elementy, których cechy spełniają wszystkie siedem kryteriów i uporządkowane są w jednej podwarstwie,

DRUGĄ WARSZTWE wyznaczają elementy, posiadające cechy nie spełniające wyłącznie jednego z siedmiu kryteriów. Warsztwę tę wyznacza podzbiór 63 elementów rozmieszczonych w 5 podwarstwach:

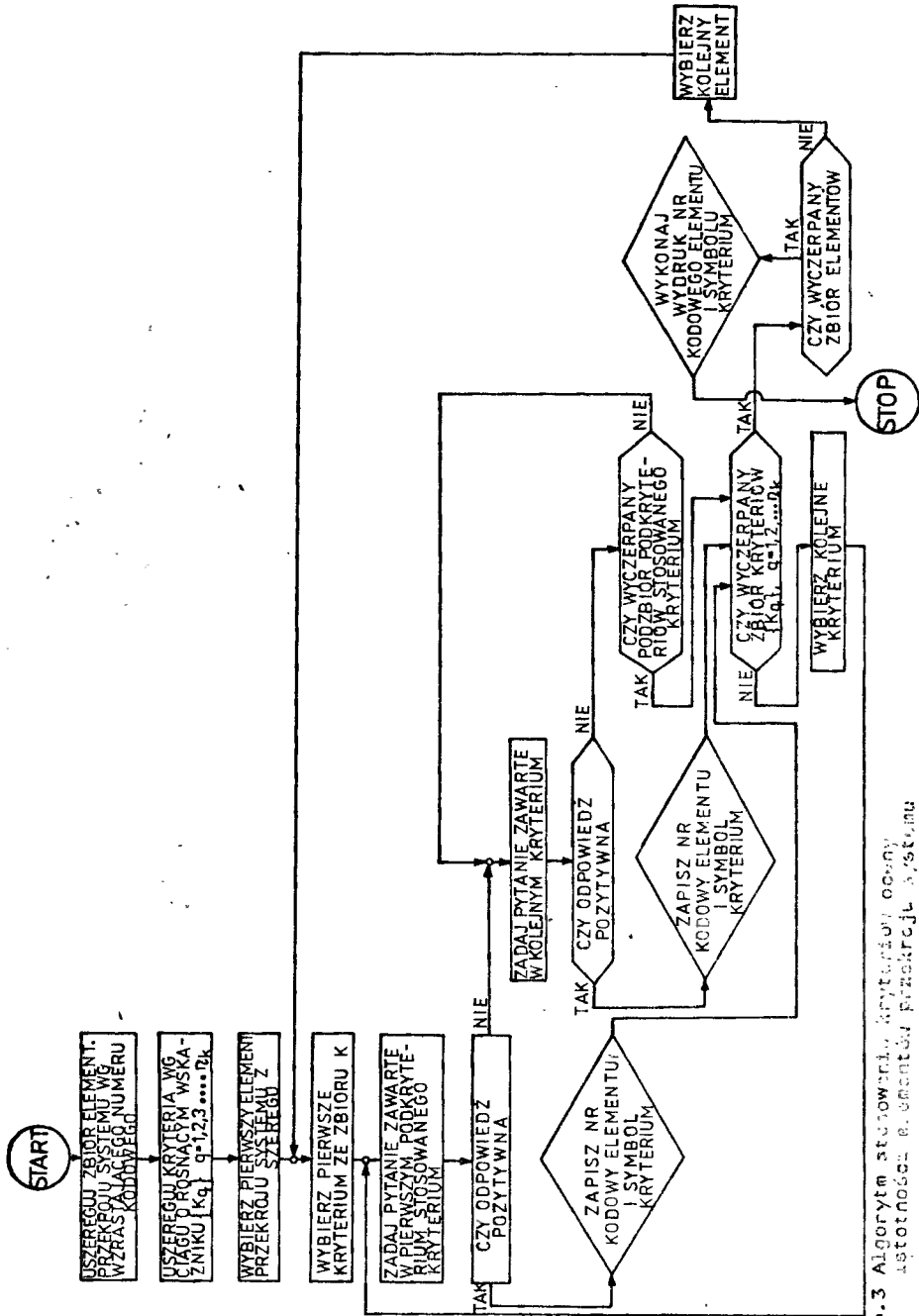
TRZECIĄ WARSZTWE wyznacza podzbiór 85 elementów rozmieszczonych w 13 podwarstwach.

CZWARTEJ WARSZTWE wyznacza podzbiór 112 elementów, rozmieszczonych w 18 podwarstwach.

PIĄTEJ WARSZTWE wyznacza podzbiór 167 elementów, rozmieszczonych w 22 podwarstwach dla silnika RD-68, natomiast dla silnika RD-76, 166 elementów rozmieszczonych również w 22 podwarstwach.

SZÓSTEJ WARSZTWE wyznacza podzbiór 219 elementów, dla silnika RD-68 i 218 elementów dla silnika RD-76 rozmieszczonych w 19 podwarstwach.

SIEDMĄ WARSZTWE wyznacza podzbiór 312 elementów, dla silnika RD-68 oraz 316 elementów dla silnika RD-76 rozmieszczonych w 7 podwarstwach.



Rys. 6.3 Algorytm sterowania kryteriami obrotu i stopniowość elementów przekroju systemu

ÓSMĄ WARSTWĘ wyznacza podzbiór 597 elementów dla silnika RD-68, natomiast dla silnika RD-76 podzbiór 599 elementów.

Warstwa ta zawiera pozostałe elementy przekroju systemu, z punktu widzenia niezawodności, to znaczy elementy, które nie spełniły żadnego ze stosowanych kryteriów.

Zatem warstwy wyznaczone dla silnika Sulzer typu RD-68 zawierają 975 różnorodnych elementów, których cechy spełniają od 1 do 7 kryteriów.

Natomiast warstwy wyznaczone dla silnika Sulzer typu RD-76 zawierają 977 różnorodnych elementów spełniających od 1 do 7 kryteriów.

Należy w tym miejscu podkreślić, że w niniejszej pracy uszeregowanie podwarstw przyjęto w wyniku zastosowania 7 kryteriów, traktowanych jako kryteria "równej wagi". Jest to podyktowane tym, że zmiana kolejności podwarstw, będąca wynikiem przyporządkowania każdemu kryterium odpowiednich współczynników ważności, zaproponowanych przez A. Podsiedło w pracy [74], nie powoduje zwiększenia dokładności ocen, dotyczących istotności elementów istotności, mierzonej wartością wskaźnika W_i .

Jak wynika z tabeli 6.2, zastosowane w pracy [74] współczynniki ważności kryteriów nie tylko nie powodują zwiększenia dokładności ocen dotyczących wyznaczania istotności elementów systemu, ale w przypadku elementów silników Sulzer typu RD-68 powodują wyraźne jej zmniejszanie.

6.1.6. Weryfikacja przyjętego sposobu wyznaczenia istotności elementów systemu z punktu widzenia niezawodności

W oparciu o tezę, że na bezpieczeństwo pływania statku oraz na efektywność jego działania oddziałują w sposób zróżnicowany niezawodność działania pewnej liczby elementów tzw. istotnych, jako kryterium oceny udziału uszkodzeń elementu w obniżeniu efektywności działania obiektu badań, przyjęto wartość wskaźnika udziału W_i [74], [109]

$$W_i = \frac{T_{u_i}}{\sum_{i=1}^{86} T_{u_i}}$$

przedstawiającego sobą stosunek straconego czasu eksploatacyjnego T_{u_i} , wynikającego na skutek uszkodzenia elementów i -podwarstw, $i = 1, 2, \dots, 86$, do całkowitego straconego czasu eksploatacyjnego przez obiekt $\sum T_{u_i}$ wynikającego z uszkodzeń jego wszystkich elementów składowych. Przy tym jako stracony czas eksploatacyjny przyjmuje się czas zużyty na przestoje przypadkowe, wynikłe z konieczności wykrycia i usunięcia uszkodzeń oraz czas przedłużenia trwania rejsów, powstały na skutek obniżenia parametrów eksploatacyjnych w trakcie wykonywania czynności diagnostycznych lub w trakcie wykonywanej naprawy.

Wartość przyjętego wskaźnika W_i wyznaczono w oparciu o wyniki badań statystycznych. Badaniami statystycznymi objęto wszystkie elementy skła-

Tabela 6.2

Porównanie wartości wskaźnika udziału W_1 podwarstw elementów o należącej istotności, wyznaczonej według kryteriów równoważnych i nierównoważnych dla silników Sulzer typu RD-68 i RD-76 [74],[109]

SILNIKI SULZER TYPU RD-68				SILNIKI SULZER TYPU RD-76			
Kolejność podwarstw wyznaczona według kryteriów równoważnych		Kolejność podwarstw wyznaczona według kryteriów nierównoważnych		Kolejność podwarstw wyznaczona według kryteriów równoważnych		Kolejność podwarstw wyznaczona według kryteriów nierównoważnych	
Lp.	Skumulowana wartość wskaźnika W_1	1	Skumulowana wartość wskaźnika W_1	Lp.	Skumulowana wartość wskaźnika W_1	1	Skumulowana wartość wskaźnika W_1
1	2	3	4	5	6	7	8
11	0,1146	1	0,1146	1	0,2331	1	0,2331
22	0,1172	2	0,1172	2	0,2398	2	0,2398
33	0,2551	4	0,1185	3	0,3791	4	0,2434
44	0,2564	3	0,2564	4	0,3827	3	0,3827
55	0,2673	5	0,2673	5	0,4097	5	0,4097
66	0,3033	26	0,2792	6	0,4875	26	0,4123
77	0,3062	6	0,2802	7	0,4901	6	0,2236
88	0,3162	7	0,2854	8	0,5014	7	0,4521
9	0,3214	8	0,2889	9	0,5299	8	0,4542
10	0,3217	10	0,2892	10	0,5320	9	0,4542
11	0,3275	12	0,2979	11	0,5330	12	0,4705
12	0,3310	9	0,3037	12	0,5330	10	0,4715
13	0,3397	11	0,3037	13	0,5493	11	0,4715
14	0,8700	29	0,3037	14	0,5515	29	0,4715
15	0,8700	31	0,3123	15	0,5515	30	0,4828
16	0,8717	36	0,3123	16	0,5629	36	0,5256
17	0,8717	30	0,3325	17	0,5629	31	0,3297
18	0,8717	35	0,3326	18	0,5629	35	0,5297
19	0,8717	37	0,3368	19	0,5758	37	0,5321
20	0,8717	13	0,3368	20	0,5758	13	0,5344
21	0,8803	15	0,3368	21	0,5871	15	0,5344
22	0,8803	14	0,3368	22	0,5871	14	0,5421
23	0,9005	17	0,3375	23	0,6299	16	0,5431
24	0,9005	16	0,3416	24	0,6340	17	0,5671
25	0,9006	18	0,3416	25	0,6340	18	0,5676
26	0,9048	19	0,3776	26	0,6364	19	0,6454
27	0,9048	20	0,3776	27	0,6387	20	0,6454
28	0,9048	39	0,3777	28	0,6387	39	0,6519
29	0,9051	41	0,9080	29	0,6467	40	0,6541

1	2	3	4	5	6	7	8
30	0,9052	38	0,9080	30	0,6517	38	0,6541
31	0,9206	40	0,9080	31	0,6753	41	0,6541
32	0,9206	42	0,9086	32	0,6761	42	0,6588
33	0,9206	43	0,9086	33	0,6973	43	0,6588
34	0,9206	45	0,9086	34	0,6973	44	0,6588
35	0,9227	50	0,9086	35	0,7116	50	0,6588
36	0,9227	44	0,9103	36	0,7116	45	0,6702
37	0,9227	48	0,9103	37	0,7147	47	0,6831
38	0,9227	21	0,9104	38	0,7147	21	0,6881
39	0,9234	23	0,9104	39	0,7157	23	0,6881
40	0,9275	24	0,9258	40	0,7397	24	0,6961
41	0,9275	22	0,9261	41	0,7474	22	0,7197
42	0,9275	25	0,9261	42	0,7479	25	0,7205
43	0,9275	46	0,9261	43	0,7479	46	0,7417
44	0,9284	51	0,9261	44	0,7541	51	0,7417
45	0,9312	52	0,9261	45	0,7572	52	0,7417
46	0,9312	53	0,9261	46	0,7572	53	0,7417
47	0,9312	55	0,9267	47	0,7572	54	0,7448
48	0,9312	49	0,9267	48	0,7572	49	0,7448
49	0,9329	54	0,9267	49	0,7667	55	0,7448
50	0,9352	57	0,9288	50	0,7983	56	0,7591
51	0,9352	62	0,9297	51	0,7983	62	0,7635
52	0,9352	64	0,9325	52	0,7983	63	0,7666
53	0,9352	56	0,9325	53	0,7983	57	0,7666
54	0,9352	58	0,9342	54	0,7983	58	0,7666
55	0,9359	63	0,9342	55	0,8004	64	0,7761
56	0,9402	59	0,9342	56	0,8217	59	0,8077
57	0,9402	61	0,9365	57	0,8248	60	0,8077
58	0,9414	66	0,9372	58	0,8289	66	0,8077
59	0,9414	60	0,9415	59	0,8320	61	0,8290
60	0,9414	27	0,9415	60	0,8320	27	0,8321
61	0,9420	32	0,9415	61	0,8367	32	0,8352
62	0,9421	28	0,9415	62	0,8432	28	0,8352
63	0,9421	33	0,9415	63	0,8432	33	0,8352
64	0,9421	34	0,9415	64	0,8432	34	0,8373
65	0,9421	65	0,9415	65	0,8432	65	0,8373
66	0,9421	68	0,9427	66	0,8432	67	0,8414
67	0,9421	67	0,9427	67	0,8432	68	0,8414
68	0,9421	69	0,9427	68	0,8453	69	0,8414
69	0,9475	75	0,9427	69	0,8494	74	0,8435
70	0,9487	70	0,9439	70	0,8504	70	0,8445
71	0,9487	74	0,9447	71	0,8504	75	0,8445

c.d.tabeli 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8
72	0,9566	76	0,9447	72	0,8572	76	0,8775
73	0,9566	72	0,9447	73	0,8572	71	0,8775
74	0,9572	77	0,9447	74	0,8585	77	0,8816
75	0,9572	79	0,9501	95	0,8605	78	0,8816
76	0,9580	71	0,9580	76	0,8930	72	0,8884
77	0,9580	73	0,9586	77	0,8930	73	0,8897
78	0,9637	78	0,9643	78	0,9325	79	0,8917
79	0,9643	47	0,9643	79	0,9325	48	0,9312
80	0,9643	80	0,9643	80	0,9325	80	0,9312
81	0,9668	82	0,9657	81	0,9388	82	0,9387
82	0,9721	84	0,9682	82	0,9643	83	0,9450
83	0,9805	81	0,9799	83	0,9420	81	0,9707
84	0,9922	83	0,9922	84	0,9839	84	0,9826
85	0,9982	85	0,9982	85	0,9948	85	0,9948
86	1,0000	86	1,0000	86	1,0000	86	1,0000

dowe 31 silników Sulzer typu RD-68 oraz wszystkie elementy 26 silników Sulzer typu RD-76, zainstalowanych na statkach Polskiej Marynarki Handlowej.

Dla każdego elementu składowego silnika, który uległ uszkodzeniu, wypełniono kartę uszkodzeń oraz sporządzono zapis w chronologicznej karcie eksploatacyjnej poprzez przyporządkowanie odnośnych kart uszkodzeń wyodrębnionym zdarzeniom.

Informacje, dotyczące uszkodzeń elementów silnika głównego, uzyskano z dokumentacji eksploatacyjnej, sporządzonej przez oficerów mechaników w trakcie użytkowania statku. Przy tym czasie realizacji badań, tzn. od chwili rozpoczęcia obserwacji obiektu /przekazania statku użytkownikowi do eksploatacji/ do chwili całkowitego jej zakończenia, wyniósł dla poszczególnych obiektów od trzech do dziesięciu lat.

Uzyskane dane, zawarte na około 11500 kart uszkodzeń przetworzono według opracowanego programu w EMC /Hewlett Packard Calculator 9830A, Math Pac Vol.1-Polynomial Regression/.

Wybrane wyniki przeprowadzonych badań statystycznych, dotyczące kolejnych podwarstw elementów, silników Sulzer typu RD przedstawiono w tabeli 6.3 i 6.4.

Wyniki badań przedstawione w tabelach 6.2, 6.3, 6.4 dowodzą, że zgodnie z przyjętymi założeniami elementy obiektu badań zostały a priori uporządkowane w warstwy o malejącej istotności, wyznaczonej udziałem skutków uszkodzeń elementów w nich zawartych w obniżaniu efektywności jego działania. Elementy zaszeregowane do początkowych warstw to te elementy, których uszkodzenia powodują największe straty z punktu widzenia wykorzystania technicznego systemu.

Tabela 6.3

Wybrane wyniki badań eksploatacyjnych silników Sulzer typu RD-68 [74],[109]

Numer warstwy	Liczba elementów w warstwie	Wartość wskaźnika udziału W_1	Skumulowana wartość wskaźnika udziału W_1	Skumulowana liczba elementów w warstwach	Średni czas naprawy elementów w warstwie T_N godz.	Liczba uszkodzeń w warstwie
1	2	3	4	5	6	7
I	17	0,1146	0,1146	17	23,17	314
II	63	0,1887	0,3033	80	12,80	204
III	85	0,6830	0,8717	165	23,67	349
IV	112	0,0510	0,9227	277	4,00	868
V	167	0,0187	0,9414	444	6,78	542
VI	219	0,0223	0,9637	663	2,47	457
VII	312	0,0345	0,9982	975	7,132	764
VIII	597	0,0018	1,000	1572	6,01	571

Tabela 6.4

Wybrane wyniki badań eksploatacyjnych silników Sulzer typu RD-76 [74]

Numer warstwy	Liczba elementów w warstwie	Wartość wskaźnika udziału W_1	Skumulowana wartość wskaźnika udziału W_1	Skumulowana liczba elementów w warstwach	Średni czas naprawy elementów w warstwie T_N godz.	Liczba uszkodzeń w warstwie
1	2	3	4	5	6	7
I	17	0,1146	0,1146	17	25,42	379
II	63	0,3729	0,4875	80	21,28	624
III	85	0,0883	0,5758	165	18,83	525
IV	112	0,1389	0,7147	277	5,59	877
V	106	0,1173	0,8320	443	3,32	1642
VI	218	0,1605	0,9925	661	10,75	653
VII	316	0,0623	0,9548	977	4,23	1205
VIII	599	0,0052	1,000	1576	4,01	88

Z tabel 6.3 i 6.4 widać, że w przypadku silników RD-68 92,3 % straconego czasu eksploatacyjnego spowodowane zostało przez uszkodzenia elementów wchodzących w skład czterech pierwszych warstw, stanowiących 11,46% liczby elementów istotnych, tzn. spełniających co najmniej jedno z n_k -zasosowanych kryteriów oraz stanowiących 7,1 % liczby elementów przekroju systemu. Przy tym uszkodzenia elementów czterech pierwszych warstw, silnika typu RD-76, powodują 71,5 % strat czasu eksploatacyjnego i 92,27 % strat czasu eksploatacyjnego silnika typu RD-68.

Zwiększenie liczby badanych elementów o 60,27 %, tzn. o 166 elementów V-ej warstwy, powoduje przyrost wartości wskaźnika udziału W_1 , z powodu ich uszkodzeń, zaledwie o 11,73 %, a w przypadku silnika RD-68 tylko o 1,8 %. Należy podkreślić, że uszkodzenia tylko 17 elementów warstwy pierwszej powodują wzrost wartości rozpatrywanego wskaźnika o 11,46 %. Przy tym, jak widać z tablic 6.3 i 6.4, uszkodzenia 597 elementów silnika typu RD-68, zaszergowanych do warstwy VIII, powodują zwiększenie wartości wskaźnika W_1 zaledwie o 0,18 %, gdy uszkodzenia 277 elementów, zaszergowanych do czterech pierwszych warstw, powodują wzrost wartości wskaźnika W_1 o 92,27 %.

Jak wynika z powyższego, poczęwszy od warstwy V wzrost liczby elementów, dobieranych do badań, jest niewspółmiernie wysoki do wartości używanych z tych badań informacji, mierzonych przyrostem wartości wskaźnika W_1 .

Na uwagę zasługuje również fakt zmniejszania się średniego czasu naprawy pojedynczego elementu w warstwie, mającego bezpośredni wpływ na wartość czasu przestojów awaryjnych.

Jednocześnie należy podkreślić, że uszkodzenia elementów, które uznano za pasywne i nie zaszergowano do zbioru elementów przekroju systemu nie spowodowały ani razu straty czasu eksploatacyjnego.

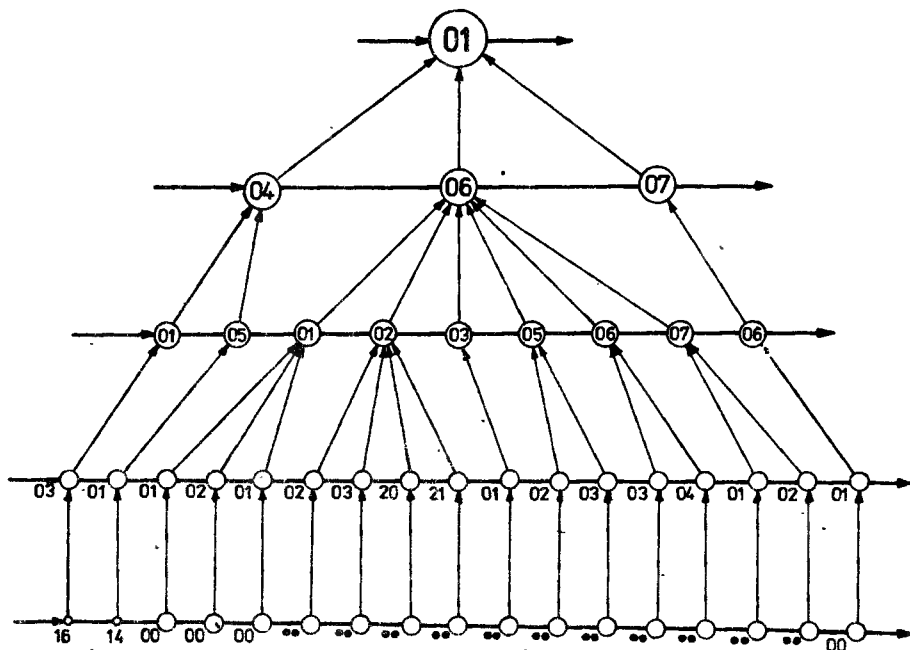
Mając na uwadze zmiany wartości wskaźnika W_1 , dla poszczególnych podwarstw, należy podkreślić celowość stosowania proponowanego sposobu wyłaniania elementów istotnych i budowania z nich modeli, według przedstawionych w pracy zasad, przeznaczonych do badania niezawodności, poprzez sprzęganie tych elementów strukturą niezawodnościową w całość.

6.1.7. Budowa i opis modelu wynikowego

W pkt.5.1.1. przedstawiono opis modelu wstępnego, zawierającego ciąg modeli wynikowych, uporządkowanych w zależności od minimalnego stopnia istotności jago elementów.

Pierwszym z możliwych do wyboru modeli wynikowych jest model, którego elementy spełniły wszystkie zastosowane kryteria, tzn. dla których liczba spełnionych kryteriów $w = n_k$. Model w formie elementarnego grafu skierowanego przedstawiono na rys.6.4.

Na drugim poziomie przedstawionego grafu znajdują się trzy wierzchołki przedstawiające następujące układy silnika głównego : O4 - układ wymiany ładu, O6 - układ tłokowo-korbowy i O7 - kadłub silnika.



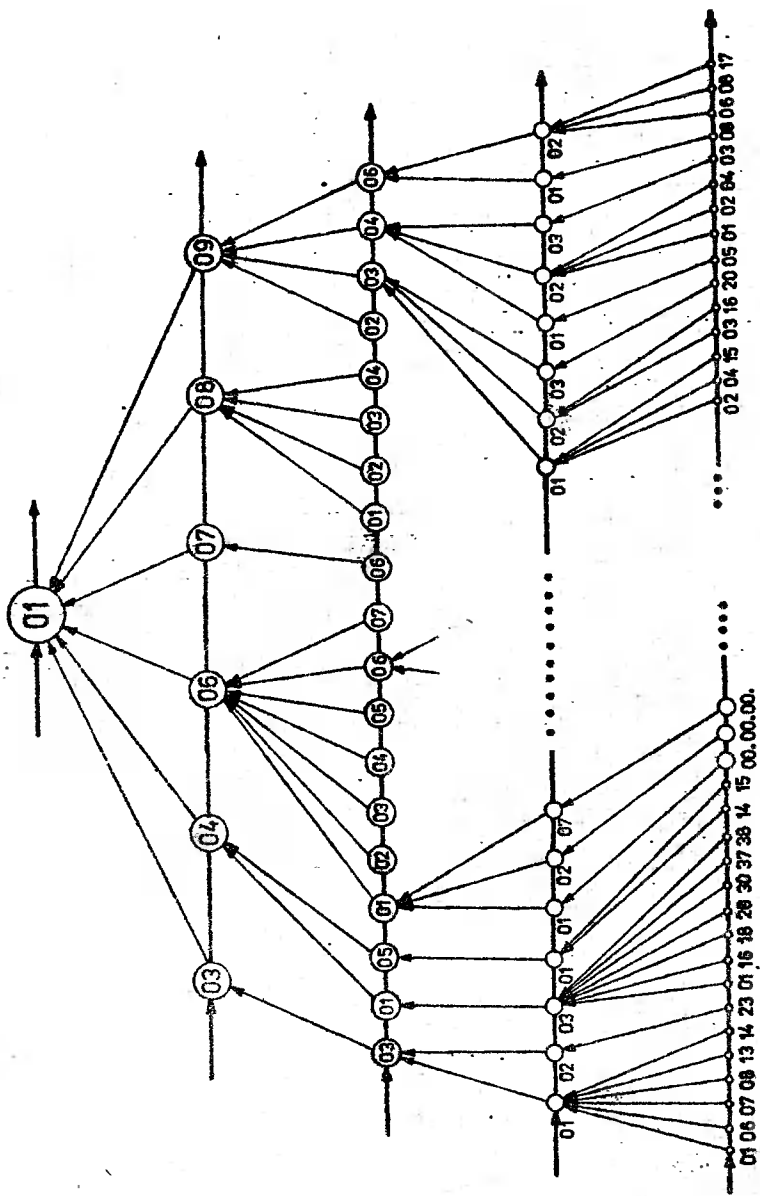
Rys.6.4 Elementarny graf skierowany o maksymalnej wadze wierzchołków, dla których $w = n_k$

Trzeci poziom grafu odwzorowuje dziewięć podukładów, zawierających siedemnaście elementów, które w postaci wierzchołków wiszących występują na ostatnim poziomie grafu.

Jak wynika z tabeli 6.2, uszkodzenia siedemnastu elementów, odwzorowanych w postaci wierzchołków wiszących na piątym poziomie grafu /modelu/ z liczby 1572 elementów odwzorowanych w przekroju systemu, powoduje 11,46 % strat czasu eksploatacyjnego. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że uszkodzenia trzech układów z dziewięciu, odwzorowane na drugim poziomie grafu, powodują 79,14 % strat czasu eksploatacyjnego. Natomiast uszkodzenia dziewięciu podukładów tych układów /z sześćdziesięciu jeden/ powodują 62,08 % omawianych strat.

Natomiast szósty z możliwych do wyboru wariant modelu wynikowego, przedstawiony w formie grafu na rys.6.5, zawiera na drugim poziomie sześć układów, tzn. trzy układy przedstawione na rys.6.4 na drugim poziomie grafu oraz trzy, dla których liczba spełnionych kryteriów $w = (n_k - 1)$. Są to 03 - układ smarowania, 08 - napędy rozrządu, 09 - układ przesterowania i mechanizmów blokady. Układy te posiadają dziewiętnaście podukładów, z których dziesięć spełnia $(n_k - 1)$ kryteriów, odwzorowanych na trzecim poziomie grafu oraz osiemdziesiąt elementów, przedstawionych w postaci wierzchołków wiszących.

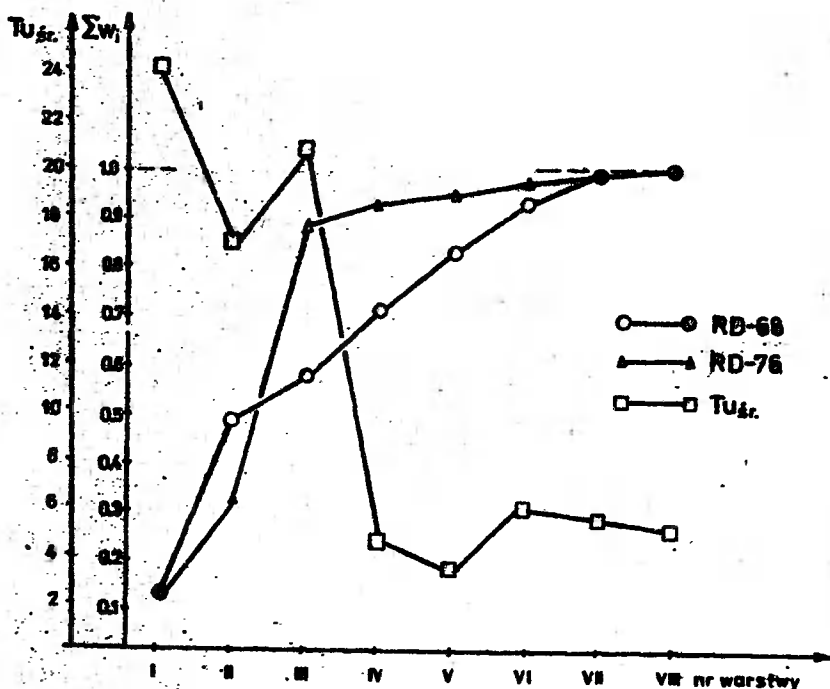
Uszkodzenia tych elementów powodują 30,33 % strat czasu eksploata-



Rys.6.5 Elementarny graf skierowany o nadze wierzchołków $W = W_{max}$ i $W = (W_{max}-1)$

cyjnego silnika Sulzer typu RD-68 i 48,75 % strat czasu eksploatacyjnego silnika Sulzer typu RD-76.

Jak wynika z powyższego, kolejne modele przedstawione w postaci grafów na rys. 6.4 i 6.5 różnią się od siebie liczbą mierzelek i liczbę spełnianych kryteriów przez pedestety oraz jak wynika z tabeli 6.2, 6.3 i 6.4 dokładnością odzwierciedlenia rzeczywistości. Przedstawiono to na rysunku 6.6.



Rys. 6.6 Przebieg zmian wartości wskaźnika W_1 oraz zmian czasu T_U w zależności od warstw modelu

Ostatni z możliwych do wyboru wariantów modelu wynikowego zawiera na ostatnim poziomie 1572 różnorodnych elementów, których występujące uszkodzenia powodują 100 % strat czasu eksploatacyjnego.

Warto przy tym mieć na uwadze, że np. siedmiocylindrowy silnik RD-68 składa się z 36 974 elementów konstrukcyjnych, w których wyróżnia się 2796 elementów różnorodnych funkcjonalnie.

6.2. Kombajn zbożowy Bison-Super

Mechanizacja rolnictwa w krajach rozwiniętych jest jedną z czynników, wpływających w różnych zakresach i formach na produkcję rolniczą. Można rozpatrywać ją z różnych punktów widzenia, tj. przyrodniczego, technicznego, społecznego i ekonomicznego, odniesionych do specyficznych warunków każdego kraju. Te właśnie specyficzne warunki naszego kraju zdecydowały, że rozwój mechanizacji przed laty wynikał z potrzeby zastępowania ciężkiej pracy fizycznej pracą maszyn, a następnie ciągłego zwiększania wydajności pracy i efektów produkcyjnych.

W drugim etapie mechanizacja stała się koniecznością ze względu na migrację ludności ze wsi do miast, powodującą zmniejszenie się liczby zatrudnionych w rolnictwie. Mniejszą uwagę zwracano wówczas na mechanizację całych procesów produkcyjnych, na wszystkie ich ogniwa w ciągach technologicznych, na ich optymalizację, problemy niezawodności i trwałości środków technicznych mechanizacji.

Wprowadzenie ciągników dużej mocy powoduje zasadnicze zwiększenie wydajności uprawy gleby drogą wzrostu szerokości roboczej maszyn i ich prędkości. Z prognoz wynika, że rozwój kombajnów dotyczyć będzie zwiększenia ich przepustowości do około 15-17 kg/s, przy szerokości roboczej 7,5 - 8 m i prędkości około 10 km/h oraz zwiększenia stopnia automatyzacji, niezawodności i trwałości [20].

Wynika to stąd, że np. kombajn Bison-Super pracuje w sezonie zbioru rzepaku i zbóż od 25 do 30 dni, osiągając w gospodarstwie wielkoobszarym sezonową wydajność od 160 do 170 ha i 500 t zebranego ziarna. Dzienna wydajność kombajnu zbożowego ograniczona jest przez organizację zbioru, warunki klimatyczne i jego niezawodność. Dwa pierwsze czynniki, jak się zdaje, najsilniej ograniczają dzienną wydajność kombajnów. Niemniej w prawidłowo zorganizowanych gospodarstwach niezawodność kombajnu odgrywa podstawową rolę, z uwagi na trudne warunki klimatyczne, występujące w okresie zniw w ostatnich siedmiu latach.

Zatem zachodzi konieczność zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności kombajnów w krótkotrwałym sezonie agrotechnicznym, z uwagi na straty wynikające z nieterminowego zbioru zbóż.

Do budowy modelu wstępnego i wynikowego kombajnu zbożowego wykorzystano zasady oraz tok postępowania przedstawiony w pkt. 6.1. na przykładzie okrętowego silnika napędu głównego Sulzer typu RD-68.

Z uwagi na powyższe w dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono wybrane fragmenty opisu identyfikacji obiektu badań, różniące się od analogicznych z punktu 6.1., tj. dotyczące kryteriów oceny istotności, elementów istotnych oraz weryfikacji istotności elementów obiektu badań.

6.2.1. Charakterystyka kombajnów zbożowych Bizon-Super Z050 i Z056

Kombajn zbożowy Bizon-Super przeznaczony jest do zbioru ziarna i nasion zbóż strączkowych, oleistych, ryżu, kukurydzy itd. Poniżej przedstawiono kilka najbardziej charakterystycznych parametrów :

- okres użytkowania w ciągu roku - 25 dni /10 h dziennie/.
- przepustowość młocarni - 5-6 kg/s.
- szerokość robocza - 4,0 m.
- źródło energii - silnik wysokoprężny 75-105 kW,
- prędkość robocza - 1,5-8 km/h.
- prędkość transportowa - do 20 km/h.
- masa kombajnu - 7000 kg.
- wydajność - 6,5-7,5 t/h.
- obsługa - 1 osoba.
- przewidywany czas eksploatacji - 8 lat,
- wykorzystanie w czasie eksploatacji 1600 h,
- producent : Fabryka Maszyn Zniwnych w Płocku.

6.2.2. Opis badań

Badaniami objęto 31 następujących kombajnów zbożowych :

Lp.	Typ	Rok produkcji	Ilość sztuk	Ilość przeliczonych sezonów agrotechnicznych
1	Z050	1973	5	8
2	Z050	1974	3	7
3	Z050	1975	7	6
4	Z050	1976	8	5
5	Z056	1978	2	3
6	Z056	1980	5	1

Kombajny te przeliczyły łącznie 6959 godzin w ciągu 947 dni.

Dane, dotyczące badań eksploatacyjnych, zebrano na kartach uszkodzeń i napraw kombajnów [90]. Wybrane wyniki badań przedstawiono w tabeli 6.5.

Aby umożliwić ocenę wpływu uszkodzenia elementów kombajnu na stopień ograniczenia efektu końcowego, kombajn zdekomponowano na podsystemy, rozmieszczone na pięciu poziomach dekompozycji.

Na drugim poziomie dekompozycji uzyskano :

01 01 podsystem napędowy.

01 02 podsystem zniwny.

01 03 podsystem osłotowo-czyszczący.

01 04 podsystem wspomaganie i sterowania hydraulicznego.

01 05 podsystem sterowania i sygnalizacji.

01 06 podsystem transportowy,

01 07 podsystem zawieszenia obudowy i wyposażenia specjalnego.

Celem u rozszerzenie opisu i prezentacji wyników badań dalsze rozważenie ograniczono do dwóch podsystemów : y01 02 - podsystemu żniwnego i 01 03 - podsystemu oazotowo-czyszczącego.

Na piątym poziomie dekompozycji uzyskano 698 różnorodnych podsystemów, które potraktowano jako niepodzielne elementy. W stosunku do wyróżnionych elementów zastosowano osiem następujących kryteriów oceny ich istotności z punktu widzenia niezawodności.

6.2.3. Kryteria oceny istotności elementów kombajnu zbożowego, ze względu na niezawodność

K_1 - kryterium sił bezwładności, zawierające podkryteria :

$k_1^{(1)}$ - dotyczy elementów, których zmiany wartości cech są bezpośrednio związane z oddziaływaniem sił bezwładności w trakcie wykonywania przez te elementy ruchu postępowo-zwrotnego,

$k_2^{(1)}$ - dotyczy elementów, których zmiany wartości cech są bezpośrednio związane z oddziaływaniem sił bezwładności w trakcie wykonywania przez te elementy ruchu obrotowego,

K_2 - kryterium skutków uszkodzeń podsystemów, zawierające podkryteria :

$k_1^{(2)}$ - dotyczy elementów, których zmiana stanu cech może być bezpośrednio związana z uszkodzeniem systemu jako całości /kombajnu/.

$k_2^{(2)}$ - dotyczy elementów, których zmiana stanu cech może być bezpośrednio przyczyną uszkodzenia podzespołów i zespołów współpracujących,

K_3 - kryterium warunków użytkowania zawierające podkryteria :

$k_1^{(3)}$ - dotyczy elementów, na których zmianę stanu cech ma wpływ wilgotność gruntu,

$k_2^{(3)}$ - dotyczy elementów, na których zmianę stanu cech ma wpływ wilgotność zboża,

$k_3^{(3)}$ - dotyczy elementów, na których zmianę stanu cech ma wpływ zakamienienie gruntu.

K_4 - kryterium poprawności pracy operatora, zawierające podkryteria :

$k_1^{(4)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia są spowodowane bezpośrednio błędami operatora,

$k_2^{(4)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia są spowodowane nieprzestrzeganiem przez operatora parametrów eksploatacyjnych,

K_5 - kryterium poprawności obsługi, zawierające podkryteria :

$k_1^{(5)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia mogą być spowodowane niesprawnością w układzie smarowania,

$k_2^{(5)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia mogą być spowodowane brakiem oleju w układzie hydraulicznym,

Tabela 6.5

Wybrane wyniki badań eksploatacyjnych kombajnów zbożowych Z050 i Z056 80

Lp.	Czas pracy h	Zbiór zboża ha	Ilość ziarna t	Liczba uszkod- zeń	Liczba uszko- dzonych części	Średnia wartość uszkodz. części	Liczba wymie- nionych części	Liczba rodzaj- ów uszkodz. części	Średni czas zdat- ności	Ilość ha między uszkodze- niami
1	949	714	1629	55	209	3,8	120	66	18,1	13,0
2	507	404	883	35	227	6,48	214	56	17,5	11,9
3	1510	1052	2289	115	655	5,69	627	92	13,9	10,3
4	1633	1125	2513	108	539	4,90	479	142	15,1	10,4
5	606	390	992	27	61	2,30	54	40	22,5	14,4
6	1674	988	2244	72	376	5,20	356	91	23,5	13,7

- $k_3^{(5)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia mogą być spowodowane brakiem oleju w skrzyni przekładniowej,
- K_6 - kryterium miejsca odnowy, zawierające podkryteria :
- $k_1^{(6)}$ - dotyczy elementów, których wymiana lub naprawa może być wykonana przez specjalistyczny warsztat naprawczy,
- $k_2^{(6)}$ - dotyczy elementów, których wymiana lub naprawa może być wykonana przez warsztat naprawczy użytkownika,
- K_7 - kryterium podatności naprawczej, zawierającej podkryteria :
- $k_1^{(7)}$ - dotyczy elementów, do wymiany których należy zdemontować współpracujące podzespoły,
- $k_2^{(7)}$ - dotyczy elementów, do wymiany których należy zdemontować tylko jeden podzespół,
- K_8 - kryterium podatności diagnostycznej, zawierające podkryteria :
- $k_1^{(8)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia są identyfikowane dostępnymi środkami diagnostycznymi bez konieczności demontażu zespołu,
- $k_2^{(8)}$ - dotyczy elementów, których uszkodzenia identyfikowane są dostępnymi środkami diagnostycznymi z koniecznością demontażu zespołu.

6.2.4. Elementy istotne, z punktu widzenia niezawodności, kombajnu zbożowego

W wyniku zastosowania ośmiu kryteriów, uzyskano następujące uporządkowanie elementów :

- I warstwa - 5 elementów, które spełniły 7 kryteriów,
 II warstwa - 6 elementów, które spełniły 6 kryteriów,
 III warstwa - 6 elementów, które spełniły 5 kryteriów,
 IV warstwa - 14 elementów, które spełniły 4 kryteria,
 V warstwa - 24 elementy, które spełniły 3 kryteria,
 VI warstwa - 29 elementów, które spełniły 2 kryteria,
 VII warstwa - 41 elementów, które spełniły 1 kryterium,
 VIII warstwa - 573 elementy, które nie spełniły żadnego kryterium.

6.2.5. Weryfikacja przyjętego sposobu wyznaczania istotności elementów systemu z punktu widzenia niezawodności

Ponieważ w precy przyjęto założenie, że na efektywność i niezawodność złożonego systemu technicznego mają decydujący wpływ uszkodzenia elementów istotnych, jako kryterium oceny udziału uszkodzenia elementu w obniżeniu efektywności działania obiektu badań, przyjęto wartość wskaźnika udziału W_1 114, przedstawionego w pkt.6.1.6. :

$$W_1 = \frac{Tu_i}{\sum Tu_i}$$

gdzie : Tu_i - stracony czas eksploatacyjny, wynikający na skutek uszkodzenia elementów i-warstw $i = 1, 2, \dots, 8$

$\sum Tu_i$ - stracony czas eksploatacyjny, wynikający z uszkodzeń jego wszystkich elementów

Dla każdego elementu składowego kombajnu zbożowego, który uległ uszkodzeniu wypełniono kartę uszkodzeń i napraw. Uzyskane dane, zawarte na około 2000 kart uszkodzeń, dotyczą :

- czasu pracy elementu, podzespołu, zespołu, do uszkodzenia,
- ilości zebranego ziarna,
- rodzaju zboża,
- rodzaju pracy,
- liczności uszkodzeń w dniu roboczym,
- kodu identyfikującego uszkodzony podsystem,
- rodzaju i postaci uszkodzenia,
- przypuszczalnych przyczyn powstania uszkodzenia,
- sposobu naprawy,
- miejsca naprawy,
- ilości osób naprawiających,
- skutków uszkodzeń itd.

Wybrane wyniki przeprowadzonych badań statystycznych, dotyczące kolejnych warstw elementów kombajnu zbożowego, przedstawiono w tabeli 6.6.

Wyniki badań przedstawione w tabeli 6.6 dowodzą, że zgodnie z przyjętymi założeniami elementy obiektu badań zostały a priori uporządkowane w warstwy o malejącej istotności, wyznaczonej udziałem skutków uszkodzeń elementów w nich zawartych w obniżaniu efektywności jego działania. Elementy zarezerwowane do początkowych warstw to te elementy, których uszkodzenie powoduje największe straty z punktu widzenia wykorzystania technicznego systemu.

Z tabeli 6.6 widać, że uszkodzenia elementów czterech pierwszych warstw, stanowiących 24,8 % liczby elementów istotnych, tzn. spełniających co najmniej jedno kryterium z ośmiu stosowanych i zaledwie 4,444 % liczby elementów modelu wstępnego, powoduje 71,2 % strat czasu eksploatacyjnego. Zwiększenie liczby elementów o 77,41 %, tzn. o elementy V warstwy powoduje wzrost wartości wskaźnika W_1 o 15,5 %. Natomiast uszkodzenie elementów VII warstwy stanowiące 32,8 % elementów istotnych, powoduje wzrost wartości wskaźnika W_1 zaledwie o 5,9 %, gdy uszkodzenia elementów I warstwy, stanowiących 4 % elementów istotnych powodują 29 % strat czasu eksploatacyjnego.

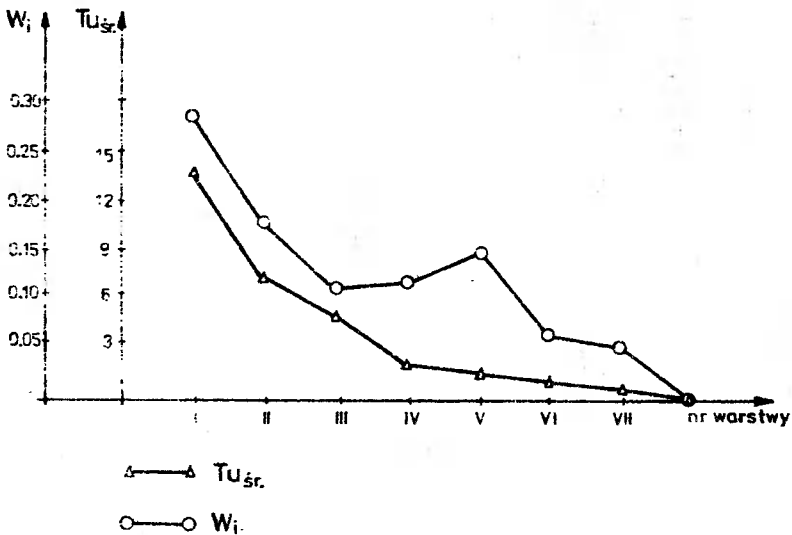
Przy tym, jak widać z omawianej tabeli, uszkodzenia 573 elementów warstwy VIII stanowiących 82 % elementów modelu wstępnego nie spowodowały strat czasu eksploatacyjnego.

Jak widać z rys. 6.7, począwszy od warstwy V wzrost liczby elementów dołączanych do badań, jest niewapóźnieński wysoki do wartości uzyskiwanych z tych badań informacji, mierzonych przyrostem wartości wskaźnika W_1 .

Tabela 6.6

Wybrane wyniki badań eksploatacyjnych podzespołów kombajnów zbożowych
Bizon-Super [80]

Numer warstwy	Liczba elementów w warstwie	Wartość wskaźnika udziału W_i	Skumulowana wartość wskaźnika udziału W_i	Średnia wartość wskaźnika W_i na jeden element	Skumulowana liczba elementów w warstwach	Średni czas naprawy elementów w warstwie $T_{N/godz./}$
I	5	0,290	0,290	0,058	5	14,4
II	6	0,173	0,463	0,0268	11	7,2
III	6	0,113	0,576	0,0188	17	4,7
IV	14	0,136	0,712	0,0098	31	2,4
V	24	0,155	0,867	0,00387	55	1,6
VI	29	0,074	0,941	0,00255	84	0,6
VII	41	0,059	1,000	0,0014	125	0,4
VIII	573	-	1,000	-	698	-



Rys. 6.7 Przebieg zmian wartości wskaźnika W_i oraz zmian czasu napraw T_u w zależności od warstw modelu

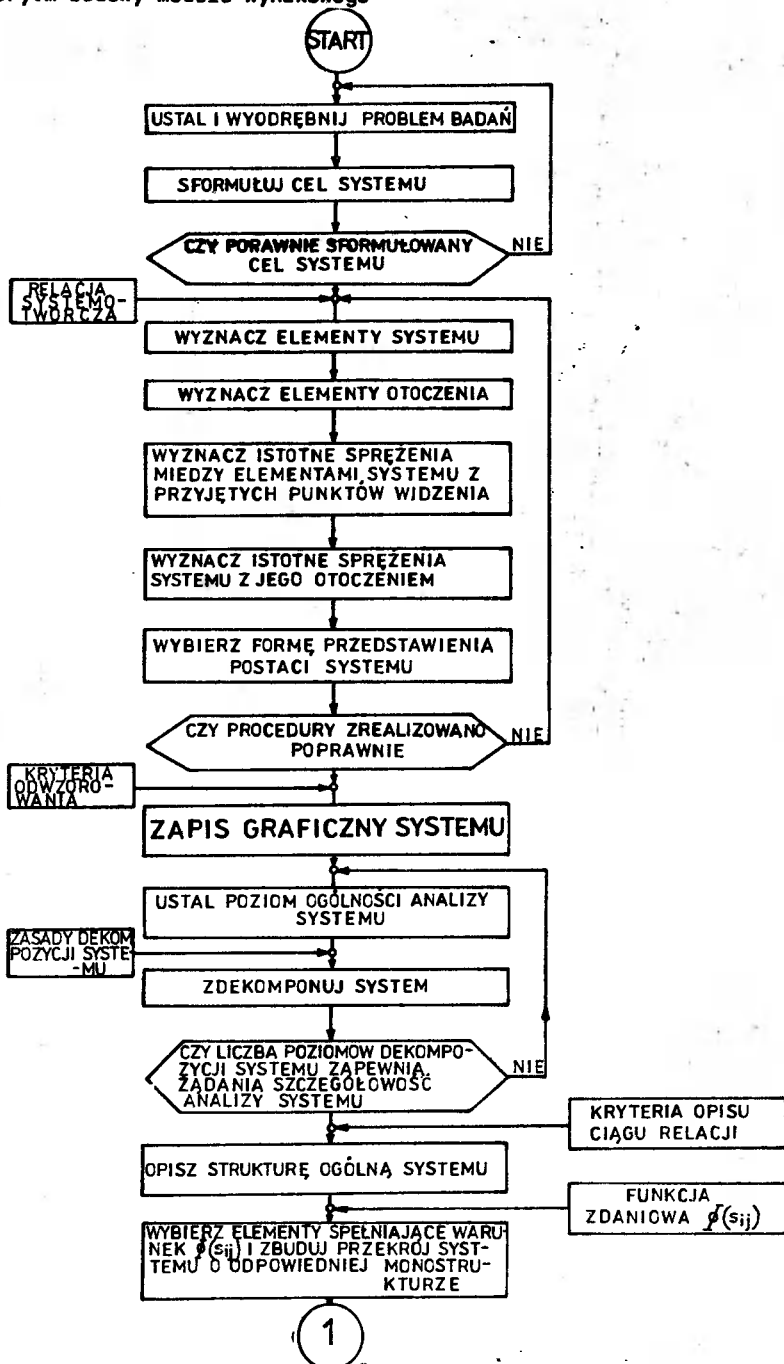
Na uwagę zasługuje fakt zmniejszania się średniego czasu naprawy pojedynczego elementu w warstwie, mającego bezpośredni wpływ na wartość czasu przestoju awaryjnych.

Jednocześnie należy podkreślić, że uszkodzenia elementów, które nie spełniły żadnego ze stosowanych kryteriów, nie spowodowały ani razu straty czasu eksploatacyjnego.

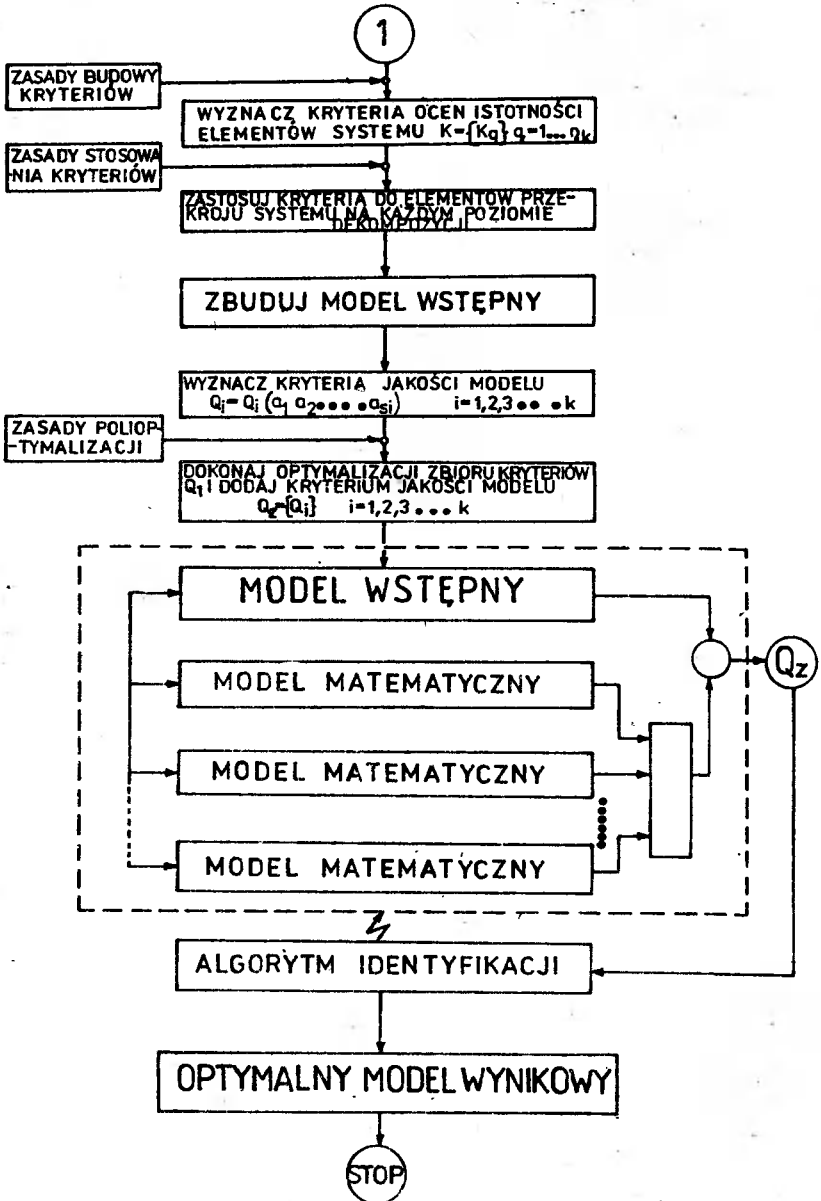
Mając na uwadze zmiany wartości wskaźnika W_2 dla poszczególnych warstw, należy podkreślić celowość stosowania proponowanego sposobu wyznaczania elementów istotnych i budowania z nich modeli, według przedstawionych w pracy zasad, przeznaczonych do badania niezawodności.

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodę budowy modelu wynikowego w postaci algorytmu w oparciu o rozważania przedstawione w części II niniejszej pracy.

6.3. Algorytm budowy modelu wynikowego



Rys. 6/8 Algorytm budowy wielopoziomowego systemu z elementów o ustalonej a priori istotności



7. WNIOSKI

1. W oparciu o wyniki przeprowadzonych statystycznych badań eksploatacyjnych, dla potrzeb oceny niezawodności złożonych systemów technicznych stwierdzono, że o niezawodności działania tych systemów decyduje pewna, stosunkowo niewielka liczba elementów, które nazwane elementami istotnymi.
2. Stosując wielokryterialną ocenę cech elementów systemu rzeczywistego, można wyznaczyć uporządkowanie tych elementów według malejącej istotności.
3. Ze złożoności systemu technicznego oraz celu badań wynika liczba poziomów dekompozycji, na których należy dokonać oceny istotności elementów, aby uzyskać model, którego badanie umożliwi rozwiązanie postawionego problemu o żądanym stopniu szczegółowości.
4. Wykorzystanie proponowanej w pracy metody, umożliwia budowanie wielopoziomowych systemów z elementów o ustalonej a priori istotności. Przy tym o istotności elementów, zaszerzowanych do zbioru elementów budowanych systemów, decydują względy niezawodnościowe.
5. Model zbudowany według zaproponowanych zasad umożliwia analizę wpływu niezawodności podsystemu usytuowanego na dowolnym poziomie dekompozycji, na niezawodność podsystemów nadrzędnych, do systemu jako całości łącznie. Jednocześnie do opisu niezawodności tak zbudowanych systemów można stosować zależności, przedstawione w teorii niezawodności co pozwala na budowę modelu matematycznego, w ramach przyjętych ograniczeń.
6. Złożoność problemów badawczych oraz złożony stopień dokładności ich rozwiązania decyduje o ilości iteracji, realizowanych w trakcie budowy modelu. Przy tym w kolejnych iteracjach rozpatruje się różne poziomy dekompozycji systemu i różne liczby elementów uznanych za istotne.
7. Proponowana metoda budowy systemów /modeli/ może być wykorzystana do budowy wielopoziomowych systemów z elementów istotnych, z punktu widzenia funkcjonalności, możliwości diagnozowania stanu, efektywności, ergonomiczności, gotowości, organizacji itd. Mówiąc inaczej, prezentowana metoda umożliwia budowanie systemów z różnych punktów widzenia. Wówczas o istotności elementów decyduwać będą względy funkcjonalne, dia-

gnostyczne, efektywności, organizacyjne itd.

6. Przedstawiona w pracy metoda budowy wielopoziomowych systemów z elementów istotnych, z punktu widzenia niezawodności, ułatwia działania w kierunku sukcesywnego spełniania postulatów maksymalnej niezawodności na etapach projektowania, wytwarzania i eksploatacji, wynikające z możliwości ich apriorycznego wyznaczenia.
9. Niezbędne jest prowadzenie dalszych prac nad algorytmizacją toku postępowania przy budowie proponowanego modelu, z różnych punktów widzenia, z wykorzystaniem elektronicznych maszyn cyfrowych.
10. Prawidłowe wykorzystanie techniki cyfrowej i analogowej w procesie projektowania i modernizacji, do analizy i syntezy systemów technicznych z różnych punktów widzenia, uwarunkowane jest koniecznością posiadania możliwie prostych modeli matematycznych, które poprawnie opisują przebieg procesów zachodzących w tych systemach. Ponieważ przy budowie modelu matematycznego konieczne jest przeprowadzenie pewnej idealizacji systemu rzeczywistego - matematyczny opis systemu uwzględnić tylko istotne, z punktu widzenia celu badania, cechy systemu i procesy w nim zachodzące.

Budowę takiego modelu matematycznego, w ramach przyjętych ograniczeń, który opisywałby możliwie najlepiej zachowanie się rzeczywistego systemu, ułatwia przedstawiony w pracy sposób budowy modeli, których postać determinowana jest celem badań.



LITERATURA

- [1] Adankiewicz W., Podsiadło A. : Analiza mocy wybiórczej kryteriów selekcyjnych w zastosowaniu do silnika Sulzer RD-68. Zakład Doświadczalny WSM, Gdynia 1972
- [2] Adankiewicz W., Włodarek K. : Unifikacja systemów siłowni okrętowych. Zakład doświadczalny - Wyższa Szkoła Morska, Gdynia 1974
- [3] Adankiewicz W., Stankiewicz J., Podsiadło A., Śliwiński R., Woropay M. : Aprioryczna metoda wyłaniania elementów węzłowych. Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn PAN. OPT, Katowice 1974
- [4] Ashby W.R. : Systemy i ich miary informacyjne. Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976
- [5] Barlow R., Proschan F. : Mathematical theory of reliability, New York 1965
- [6] Bartkowiak A. : Podstawowe algorytmy statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1979
- [7] Bazovsky I. : Reliability theory and Practice, Practice-Hall, Englewood Cliffs 1961
- [8] Berg A.I. : Informacja i cybernetyka. WNT, Warszawa 1970
- [9] Będkowski L. : Elementy ogólnej teorii diagnostyki technicznej. Biuletyn WAT, Warszawa 1981
- [10] Bobrowski D. : Wprowadzenie matematyczne do teorii niezawodności. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1977
- [11] Bojarski A. : Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych. PWN, Warszawa 1967
- [12] Bojarski W. : Metodyka oceny efektywności społeczno-gospodarczej programów rozwoju wielkich systemów i ich elementów. Szkoła Podstaw Inżynierii Systemów, część II, PAN Orzysz 1976
- [13] Brandowski A., Wrześniński M. : O efektywności technicznej. Cybernetyka w gospodarce morskiej. Gdynia 1977
- [14] Bremermann H.J. : Quantal Noise and Information In Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability 1967
- [15] Bubnicki Z. : Identyfikacja obiektów sterowania. PWN, Warszawa 1974
- [16] Buslenko N.P. : Modelowanie złożonych systemów. Izdatelstwo Nauka, Moskwa 1968
- [17] Buslenko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I.N. : Teoria systemów złożonych. PWN, Warszawa 1979
- [18] Bychowski M., Wiazniawskij A., Charnes C. : Woprosy nastrojenia diagnostycznego procesu pri pomoschi matematičeskich mašin. Eksperimen-

- talna chirurgia i anestezjologia, Nr 7, 1961
- [19] Calabro S.R. : Reliability Principles Practices, Mc Grawhill, New York - Toronto - London 1962
- [20] Czerniak I.I. : Pojęcia systemu wielkiego i systemu złożonego w aspekcie teoretycznym. Teoria i technika wielkich systemów. Ossolineum 1972
- [21] Czerwonow A.A. : Metody określenia i kontrola niezawodności bolnich sistem, Moskwa 1976
- [22] Deo N. : Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. PWN, Warszawa 1980
- [23] Dietrych J. : System i konstrukcje. WNT, Warszawa 1978
- [24] Dobreczyński A. : Prognoza światowego rozwoju siłowni okrętowych do 1985 r. Silniki Spalinowe Nr 2, 1969
- [25] Dwiliński L. : O niezawodności maszyn i urządzeń mechanicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1978
- [26] Esary I.D., Proschan F. : Coherent Structures of Nonidentical Components. Technometrics 1963
- [27] Findjeen W. : Wielopoziomowe układy sterowania. PWN, Warszawa 1974
- [28] Firkowicz S. : O liczbowej ocenie statystycznej wyrobów. Archiwum Elektrotechniki Z 7, 1967
- [29] Fokin I.G. : Niezawodność eksploatacyjna urządzeń technicznych, MOK, Warszawa 1973
- [30] Gasparski W. : Prolegomena do metodologii projektowania. Praksecologia nr 41, 1972
- [31] Gercbach I.B., Kordoński Ch. : Modele niezawodnościowe obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1968
- [32] Gniedenko B., Bielajew, Sołowiew A. I. : Metody matematyczne w teorii niezawodności. PWN, Warszawa 1968
- [33] Gosiewski A., Mulica T. : Wielopoziomowa struktura sterowania ciągu wykańczającego Walcowni Gorącej Blach. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, Tom XXIII, Zeszyt 1-2, 1977
- [34] Górecki M. : Problemy optymalizacji struktur hierarchicznych. Szkolenie Podstaw Inżynierii Systemów. Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn P.O. Orzysz 1976
- [35] Górecki M. : Teoria sterowania. WNT, 1974
- [36] Greniewski H. : Cybernetyka niematematyczna. WNT, Warszawa 1960
- [37] Gutenbaum I., Nicolò F. : Optymalny i suboptymalny podział zasobów w pewnych systemach hierarchicznych. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, Tom XXI, Zeszyt 4, 1976
- [38] Grzesiak K. : Niezawodność urządzeń elektronicznych. PWN, Warszawa 1965
- [39] Jagłom A.M., Jagłom I.M. : Prawdopodobieństwo i informacja. Książka i wiedz, Warszawa 1963
- [40] Jazdon A. : Badania niezawodności motorowera „Komar” typ 2330. Politechnika Poznańska 1972
- [41] Jazwiński J. : Problemy zapewnienia niezawodności systemów technicznych na etapie eksploatacji. OPT, Katowice 1976

- [42] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiók K. : Niezawodność i bezpieczeństwo systemów technicznych. Sesja Naukowa. Niezawodność Transportu. Politechnika Warszawska, Warszawa 1980
- [43] Jędrzejowicz P. : Badania nad systemem sterowania eksploatacją floty handlowej. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Z.1/33/ 1978
- [44] Jędrzejowicz P. : Poszukiwania optimum struktury niezawodnościowej na etapie projektowania systemu. Materiały na „Szkołę Zimową -76”. Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn PAN. Wydawnictwo CPT, Katowice 1976
- [45] Juran I.M., Gryna F.M. : Jakość, projektowanie, analiza. WNT, Warszawa 1974
- [46] Kacprzyk I., Weinfeld R. : Prosty algorytm przypadkowej generacji struktur organizacyjnych o zadanej liczbie poziomów hierarchii. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, Tom XXII, Zeszyt 1-2, 1977
- [47] Kapłon K. : Analiza niezawodnościowa hierarchicznego systemu sterowania. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej Nr 18, Wrocław 1976
- [48] Karpiński J. : Wyznaczenie postaci funkcyjnej dystrybucyjności czasu poprawnej pracy systemu. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn Z.1/29/. Warszawa 1977
- [49] Kiliński A. : Przemysłowe procesy realizacji. WNT, Warszawa 1976
- [50] Klir G.I. : Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976
- [51] Klir G.I., Vallah M. : Cybernetic Modelling. New York, 1967
- [52] Kołman R. : Sterowanie jakością wytwarzania. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1977
- [53] Kulikowski R. : Sterowanie w wielkich systemach. WNT, Warszawa 1974
- [54] Kurowski W., Ziemia S. : Wybrane zagadnienia z cybernetyki technicznej. Diagnostyka, IPFT PAN, Warszawa, 1977
- [55] Kuźmin J. : Ocena efektywności i optymalizacja ASUC. Sowieckoje Radio, Moskwa 1974
- [56] Lange O. : Całość i rozwój w świetle cybernetyki. PWN, Warszawa 1962
- [57] Lange O. : Wstęp do cybernetyki ekonomicznej. PWN, Warszawa 1962
- [58] Maciejewski M., Sobkiewicz T. : Krajowa produkcja silników okrętowych i kolejowych w 1974. Silniki Spalinowe Nr 4, 1975
- [59] Machol R.E. : System Engeneering Handbook, t.1. rosyjskie. Sovetskoe Radio, Moskwa 1970
- [60] Malinowski O.O., Ujemov A.I. : Organizacja jak sistema. Typy system i osnovni biologiczni zakonomernosti. Kijew 1966
- [61] Mazur M. : Cybernetyka i charakter. PIW, Warszawa 1976
- [62] Mazur M. : Pojęcie systemu i rygory jego stosowania. Materiały na Szkołę Podstaw Inżynierii Systemów, Szefostwo Badań i Rozwoju Techniki Wojskowej. SPEM PAN, Orzysz 1976
- [63] Mazur T., Pelc H., Rasznov I. : Modela klasyfikacyjne stanów diagnostycznych urządzeń. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, Warszawa Nr 4/20/, 1971
- [64] Mesarović M.D. : Matematyczna teoria systemów ogólnych. Praca zbiorowa pod redakcją Klira G.I. Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976
- [65] Mesarovic M.D. : Systems theory and biology. Proceedings of the

Second Systems Symposium at Case Institute of Technology. New York 1968

- [66] Mesarovic M., Macko D., Takachars Y. : Teorija hierarchiczeskich mnogourowniennyh sistem. Mir, Moskwa 1973
- [67] Milsum J.H. : Podstawa hierarchiczna dla systemów ogólnych żywych. Ogólna teoria systemów pod redakcją G.I.Klira, WNT, Warszawa 1976
- [68] M'Pherson P.K. : Nauka o systemach i filozofia systemów. Zagadnienia Naukoznawstwa 4/40/, 1974
- [69] Muszyńska A. : Niektóre problemy modelowania układów mechanicznych. Mechanika Teoretyczna i Stosowana, Nr 2 1976
- [70] Mynarski S. : Elementy teorii systemów i cybernetyki. PWN, Warszawa 1977
- [71] Pabis S. : Modelowanie systemowe. Materiały na Szkołę Podstaw Inżynierii Systemów. Sekcja Podstaw Eksploatacji Maszyn. Orzysz 1976
- [72] Pabis S. : O metodologii modelowania systemowego. Cybernetyka w gospodarce morskiej. Sopot 1977
- [73] Paschel M., Riedel C. : Polioptymalizacja. WNT, Warszawa 1979
- [74] Podsiadłe A. : Sposób wstępnej oceny wpływu niezdatności elementów na efektywność działania systemu. Praca doktorska IMER, Warszawa 1978
- [75] Pollek I.Sz. : Metodologia badań systemów technicznych. Problemy metodologii badań systemowych. WNT, Warszawa 1973
- [76] Praca zbiorowa : Diagnostyka i niezawodność systemów. Prace naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1975
- [77] Praca zbiorowa : Diagnostyka urządzeń technicznych. IPPT PAN, Warszawa 1977
- [78] Praca zbiorowa : Odkrycie, abstrakcja, prawda, empiria, historia a idealizacja. PWN, Warszawa 1979
- [79] Praca zbiorowa : Problemy metodologii badań systemowych. WNT, Warszawa 1973
- [80] Praca zbiorowa : Sprawozdanie z eksploatacyjnych badań niezawodnościowych kombajnów zbożowych w sezonie agrotechnicznym. Akademia Rolniczo-Techniczna, Olsztyn 1980
- [81] Rabinin I. : Osnovy teorii u rasčeta nadežnosti sudovych energetičeskich sistem. Sovetskoe Radio, Moskwa 1964
- [82] Sadowski W. : Podstawy ogólnej teorii systemów. PWN, Warszawa 1978
- [83] Sastova G.A., Koskin A.I. : Wybór i optymalizacja struktury informacyjnych sistem. Energijs, Moskwa 1972
- [84] Scobel H. : Zur Entwicklung der Gross-Diesel-motoren, MTZ, Nr 11, 1969
- [85] Sieniutycz S. : Optymalizacja w inżynierii procesowej. WNT, Warszawa 1978
- [86] Szałko Z. : Ocena niezawodności pojedynczych obiektów mechanicznych. OPT, Katowice 1972
- [87] Szałko Z. : Podstawy projektowania niezawodnych maszyn i urządzeń mechanicznych. PWN, Warszawa 1972
- [88] Szałko Z. ; Wierusiejczyk W. : Wybrane problemy zapewnienia niezawodności

- zawodności układów mechanicznych na etapie projektowania. Problemy zapewnienia niezawodności systemów technicznych. Sekcja Eksploatacji Maszyn, Katowice 1976
- [89] Sotсков B.S. : **Niezawodność elementów i urządzeń automatyki.** - WNT, Warszawa 1973
- [90] Stanicki T. : **Teoria Systemów.** Politechnika Wrocławska, Wrocław 1975
- [91] Stanicki T., Szlachcic E. : **Wybrane zagadnienia teorii systemów. Diagnostyka urządzeń mechanicznych.** Praca zbiorowa IPPT PAN, Warszawa 1977
- [92] Sztuff W. : **Modelowanie i filozofia.** PWN, Warszawa 1977
- [93] Szeloch R.F. : **Podstawy niezawodności urządzeń elektronicznych.** Politechnika Wrocławska, Wrocław 1976
- [94] Szypulska M. : **Algorytmy optymalizacji struktur niezawodnościowych.** Cybernetyka w gospodarce morskiej. Materiały Konferencji Naukowej PTC, Sopot 1977
- [95] Tarski A. : **Contributions to the Theory of Models Investigations Mathematicae** 1964
- [96] Tempczyk M. : **Pojęcie systemu a teoria kategorii.** Prakseologia Nr 2 /50/, Warszawa 1974
- [97] Tiemnikow F., Afonin W., Dinitrijew W. : **Podstawy techniki informacyjnej.** WNT, Warszawa 1974
- [98] Tomaszewski K., Orzechowski J. : **Problemy II generacji maszyn rolniczych.** Maszyny i Ciągniki Rolnicze nr 6/78
- [99] Ujomow A.I. : **Systemy i badania systemowe.** Problemy metodologii badań systemowych. WNT, Warszawa 1973
- [100] Usakov I.A. : **Effektivnost funkcioniravanja sloznych sistem.** Sovetskoe radio, Moskwa. 1966
- [101] Van Orman Quine W. : **Logika matematyczna.** PWN, Warszawa 1974
- [102] Walentyłowicz B. : **Istota myślenia systemowego.** Politechnika Poznańska, Poznań 1977
- [103] Warzapietjan A.G. : **Techničeskaja efektywnost i nadežnost sudowych sistem upravlenija.** Sudostrojjenje, 1969
- [104] Weinberg G.M. : **Ogólna teoria systemów w ujęciu informatyki.** Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976
- [105] Wicher I. : **Problemy identyfikacji systemów technicznych ze szczególnym uwzględnieniem układów mechanicznych.** IPPT PAN, Warszawa 1975
- [106] Wierzbicki T. : **Wstęp do informatyki w zarządzaniu.** PWN, Warszawa 1976
- [107] Wintgen W. : **System cybernetyczny w świetle teorii mnogości.** Problemy Organizacji Nr 2, Warszawa 1972
- [108] Woropaj M. : **Systemowe aspekty modelowania struktur niezawodnościowych złożonych obiektów mechanicznych.** Cybernetyka w Gospodarce Morskiej PTC, Sopot 1977
- [109] Woropaj M. : **Warstwowy model badań niezawodności złożonych obiektów mechanicznych na przykładzie okrętowego silnika napędu głównego Sulzer typu RD-68.** Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1976
- [110] Woropaj M. i inni : **Aprioryczna, warstwowa analiza istotności ele-**

- mentów złożonych obiektów mechanicznych. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975
- [111] Worepaj M. : Niezawodnościowa wielostanowość systemu w ujęciu teorii zbiorów rozmytych. Zagańnienie Eksploatacji Maszyn, WNT /w druku/
- [112] Worepaj M. i inni : Badania eksploatacyjne maszyn i urządzeń okrętowych metodą warstwowego badania. Sposób badania. Zakład Doświadczalny WSM, Gdynia 1974
- [113] Worepaj M. i inni : Wyniki badań eksploatacyjnych dla zbioru statków. Zakład Doświadczalny WSM, Gdynia 1975
- [114] Worepaj M., Michalecki R. : Wyznaczanie hierarchicznej struktury niezawodnościowej złożonego systemu technicznego. IV Konferencja Niezawodności i Kontrola Jakości. Instytut Badań Systemowych, PAN, Jabłonna 1981
- [115] Zadeh L.A. : Fuzzy Restrainted Calculus. Projektowanie i Systemy. PAN Komitet Naukcznowstwa, Ossolineum 1980
- [116] Zamojski W. : Teoria i Technika Niezawodności. Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976
- [117] Ziomba S. : Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych. PWN, Warszawa 1976
- [118] Ziomba S. : Współczesne kierunki w mechanice i teorii maszyn w aspekcie nowoczesnej techniki. Archiwum Budowy Maszyn. Tom XXII, Zeszyt 4, 1975
- [119] Ziomba S., Jereminek W., Stanisławski R. : Problemy teorii systemów. Ossolineum 1980

METHOD OF BUILDING MULTILEVEL SYSTEMS FOR TESTING RELIABILITY
MADE OF ELEMENTS WITH ESTABLISHED A PRIORI SIGNIFICANCE

Abstract

Method of building models of complex technical systems suitable for their reliability evaluation, functionality, and identification of state has been presented in the paper. These models are built of chosen elements from the given point of view, which significance has been determined basing itself on the applied significance evaluation criteria, and also from isolated relations occurring among these elements.

Taking into consideration differentiated significance of elements of modelled system in the given model permits in great part for limitation in number of tested elements and also to generalize proposed way of proceeding by making possible its utilization in constructing models for different aims of testing described in the paper.

Application of the method results in obtaining simple models having great accuracy which can be regulated at discretion in case of need. The most important part of the paper presents application of model building method which has been constructed for two different objects of testing that is for the main engine of a ship 'Bulzer' of RD type and also for combine - harvester 'Bison-Super'.

Results of exploitation tests prove equality of assumptions made in the work.

МЕТОД СТРОЕНИЯ МНОГООУРОВНЕВНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ С УСТАНОВЛЕННОЙ А PRIORI СУЩЕСТВЕННОСТИ**Резюме**

В работе представлен метод строения моделей сложных технических систем, пригодных для оценки их надёжности, эффективности, функциональности, а также идентификации состояния.

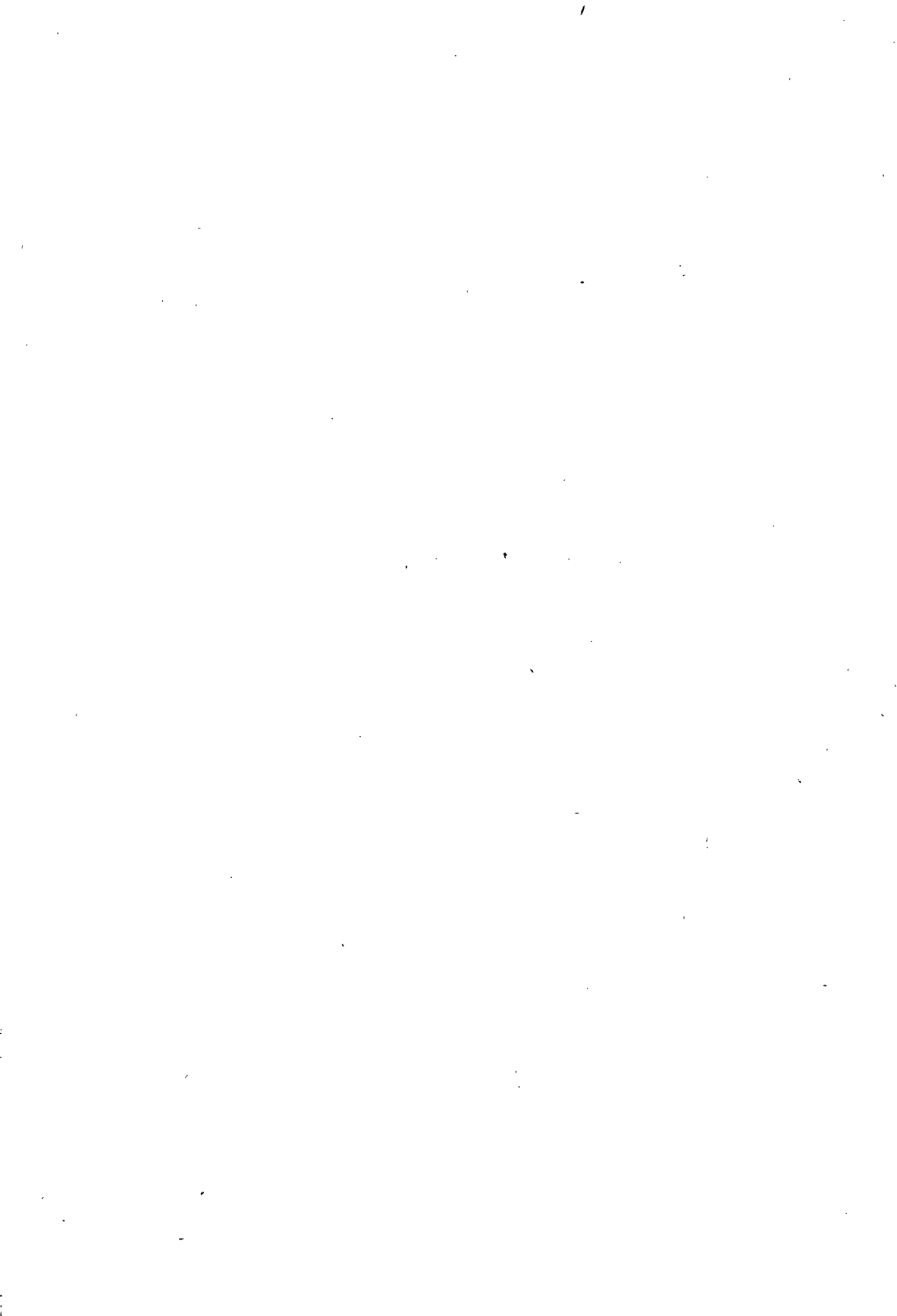
Эти модели построены из выбранных элементов, так называемых, существенных элементов с данной точки зрения, существенность которых определена опираясь на применение критериев оценки существенности, а также из выделенных состояний происходящих между этими элементами.

Применение в модели дифференцированной существенности элементов моделированной системы даёт возможность ограничить, в значительной степени, количество исследуемых элементов, а также для обобщения предлагаемого способа поведения данного возмущения использовать метод для строения модели в различных исследовательских целях описанных в работе.

В результате применения разработанного метода получаем простые модели большой точности, которую можно произвольно регулировать в зависимости от потребностей. Одновременно системный подход к проблеме даёт возможность решать задания на каждом уровне общности.

Важным элементом диссертации является представленный пример использования метода строения модели, которая построена для двух разных объектов исследований, а именно: двигателя движения главного судна Sulzer типа RD, а также зернового комбайна Vicon-Super.

Полученные результаты эксплуатационных исследований подтверждают правильность применения принятых в работе положений.



**Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy**

63631