

Ryszarda IWANEJKO¹
Jarosław BAJER²

APLIKACJE DEKOMPOZYCJI WIELOKROTNEJ DO DOKŁADNEGO WYZNACZANIA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW ZŁOŻONYCH

Dla systemów inżynierskich, zarówno na etapie ich projektowania jak i eksploatacji, niezmiernie ważna jest umiejętność wyznaczania ich podstawowej miary niezawodności K . Znajomość tej wartości, interpretowanej jako prawdopodobieństwo sprawności systemu, umożliwia przeprowadzenie oceny działania tego systemu i podjęcie decyzji czy przypadkiem nie jest konieczna jego modernizacja. W rzeczywistości wiele strategicznych systemów charakteryzuje się znaczną złożonością, która uniemożliwia zastosowanie najprostszej, analitycznej metody do dokładnego wyznaczenia niezawodności K . Aby ominąć tę trudność bardzo często wystarczy przeprowadzić dekompozycję systemu. Proces dekompozycji może być przeprowadzany ze względu na jeden, kilka lub w ostateczności ze względu na wszystkie elementy. Elementy te nazywa się elementami dekompozycyjnymi. W artykule przedstawiono praktyczne zastosowania dekompozycji wielokrotnej. W każdym z nich rozpatruje się rozłączne przypadki, gdy wybrane elementy dekompozycyjne są sprawne i gdy są niesprawne. W zależności od wyboru elementów dekompozycyjnych przeprowadza się dekompozycję równoczesną, stopniową lub kombinowaną. Proces dekompozycji prowadzi się tak długo, aż struktury uzyskane dla wszystkich możliwych kombinacji stanów sprawności lub niesprawności elementów dekompozycyjnych będą mieszane. Zastosowanie na końcu wzoru na prawdopodobieństwo zupełne umożliwia łączne uwzględnienie wszystkich analizowanych przypadków. Przedstawione przykłady pokazują, że metoda jest stosunkowo prosta i mało pracochłonna w porównaniu z dokładną metodą przeglądu zupełnego. Choć o pracochłonności i powodzeniu metody w znacznym stopniu decyduje wybór elementów dekompozycyjnych, to nie wpływa to ujemnie na jej przydatność w praktyce. Metoda może znaleźć zastosowanie do wyznaczania, przy stosunkowo niewielkim nakładzie pracy, niezawodności wielu systemów i obiektów o dość złożonych strukturach.

Słowa kluczowe: stacjonarny wskaźnik gotowości, element dekompozycyjny, dekompozycja stopniowa, dekompozycja równoczesna, dekompozycja kombinowana

¹ Ryszarda Iwanejko, riw@vistula.wis.pk.edu.pl

² Autor do korespondencji / corresponding author: Jarosław Bajer, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. +(48) 12 6282877; jbajer@vistula.wis.pk.edu.pl

1. Wstęp

Niniejsza praca jest kontynuacją artykułu [5], w którym w oparciu o literaturę fachową [1,2,3,4,6,7,8,9,10,11] i autorskie propozycje, objaśniono podstawy teoretyczne procesu dekompozycji systemów złożonych. Ponieważ stanowi ona jego integralną część tematyczną (przykłady aplikacyjne do podanej metodyki prowadzenia dekompozycji), wskazanym jest, aby Czytelnik zapoznał się z nią w połączeniu z częścią wprowadzającą, zawartą w pracy [5]. Poniżej, już bez omawiania zagadnień teoretycznych, zamieszczono kilka przykładów pozwalających na dokładne prześledzenie sposobu postępowania, gdy niemożliwe jest skonstruowanie prawidłowego schematu niezawodnościowego a zastosowanie dekompozycji umożliwia wyznaczenie dokładnej wartości miary niezawodności K niewielkim nakładem pracy.

2. Przykłady aplikacyjne

2.1. Przykład 1

Należy w najprostszy sposób wyznaczyć wskaźnik gotowości pompowni $K(Po)$, w której zainstalowano $n=6$ agregatów pompowych o różnych wydajnościach, lecz jednakowych niezawodnościach (tab.1). Warunkiem sprawności pompowni jest $Q_w=Q_n$. Przyjęcie tutaj równej niezawodności dla wszystkich elementów nie jest koniecznym założeniem stosowania procesu dekompozycji, lecz pozwala jedynie na uproszczenie dalszych obliczeń. Przyjęto, że agregaty z technicznego punktu widzenia są połączone równoległe a pozostałe elementy pompowni (np. zasuwki odcinające, zawory zwrotne, kosze ssawne, przewody, kształtki) są wysoce niezawodne i nie uwzględnia się ich.

Tabela 1. Parametry agregatów pompowych zamontowanych w Po (opracowanie własne)

Table 1. Parameters of pumps in Po (authors' work)

i - numer agregatu	1	2	3	4	5	6
parametr						
Q_i [% Q_n]	60	20	10	10	10	10
K_i	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

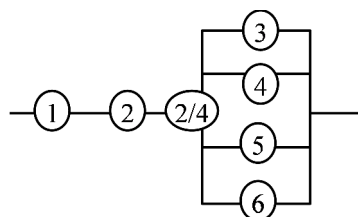
Na pierwszy rzut oka wydaje się, że powinno udać się skonstruować schemat niezawodnościowy. Wyznaczając sumę wszystkich wydajności równą $\sum_{i=1}^5 Q_i = 120\%Q_n$ widać, że rezerwa wynosi jedynie $20\%Q_n$, co oznacza, że element 1 musi występować we wszystkich drogach sprawności. Liczba minimalnych dróg sprawności - MDS wynosi 7 (tab.2).

Tabela 2. Minimalne drogi sprawności do przykładu 1 (opracowanie własne)

Table 2. Minimal efficiency routes for example 1 (authors' work)

Droga	Elementy					
	1	2	3	4	5	6
I	1	2	3	4		
II	1	2	3		5	
III	1	2	3			6
IV	1	2		4	5	
V	1	2		4		6
VI	1	2			5	6
VII	1		3	4	5	6

Jednak próby skonstruowania schematu niezawodnościowego kończą się niepowodzeniem. Przykładowo, ze schematu przedstawionego na rys. 1 nie można odczytać drogi VII, co oznacza, że schemat jest nieprawidłowy. Widać, że nie jest możliwe skonstruowanie prawidłowego schematu niezawodnościowego, więc do wyznaczenia $K(Po)$ niemożliwe jest zastosowanie wprost wzorów analitycznych. Należy przeprowadzić dekompozycję.



Rys. 1. Próba (nieudana) skonstruowania schematu niezawodnościowego dla danych z przykładu 1 (opracowanie własne)

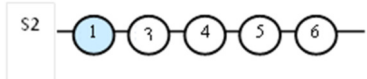
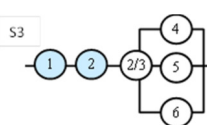
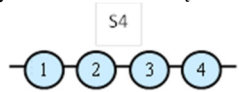
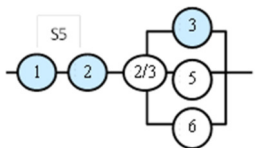
Fig. 1. An attempt (unsuccessful) to construct a reliability scheme for example 1 (authors' work)

Jako pierwszy element dekompozycyjny (e_1) wybrano agregat pompowy o największej wydajności (nr 1), który występuje we wszystkich drogach sprawności. Jako drugi (e_2) wybrano agregat 2, który występuje w 6 spośród 7 dróg. Proces dekompozycji wielostopniowej najlepiej jest prowadzić w formie tabelarycznej (tab.3), gdyż w „czystej” postaci drzewiastej nie jest zbyt czytelny. W tabeli dla poszczególnych przypadków zamieszczono schematy niezawodnościowe pompowni. Ponieważ agregaty pompowe są tzw. elementami produkcyjnymi (w odróżnieniu od tzw. elementów przepływowych, którymi są zasowy, i przez które może przepływać różna ilość wody), to w sytuacji, gdy są sprawne, nie wolno ich pominąć na schemacie niezawodnościowym (konieczne jest ich uwzględnienie, aby mógł zostać spełniony warunek na Q_w), jednak elementy, o których wiemy, że są sprawne na schemacie oznaczamy wypełnieniem. Takie elementy sprawne należy pominąć przy wyznaczaniu $K(S_i)$ lub równorzędnie

przyjąć, że ich niezawodność wynosi 1, gdyż tak naprawę wówczas niezawodność systemu K jest prawdopodobieństwem sprawności struktury warunkowym (tzn. w sytuacji sprawności lub niesprawności pewnych elementów). Wartość niezawodności elementów sprawnych należy jednak uwzględnić przy wyznaczaniu prawdopodobieństwa zajścia danej sytuacji $P(S_i)$. Należy pamiętać o tym, że suma prawdopodobieństw zajścia wszystkich sytuacji (warunków) musi być równa 1.

Tabela 3. Wielostopniowa dekompozycja systemu z przykładu 1 (opracowanie własne)

Table 3. Multistage decomposition of the system, example 1 (authors' work)

Dekompozycja ze względu na: 1	
<p><u>1 zdatny</u> z prawdopodobieństwem K_1, konieczny jest kolejny etap czyli dekompozycja ze względu na element 2</p>	<p><u>1 niezdatny</u> – z prawdopodobieństwem $[1-K_1]$; struktura S_1 złożona z elementów 2,3,4,5,i 6 – jest NIEZDATNA, bo nie spełnia kryterium sprawności (Suma wydajności $Q_2+\dots+Q_6=60\%Q_n<Q_w$); więc $K(S_1)=0$ – tu kończy się gałąź dla przypadku, gdy 1 jest niezdatny S_1 – struktura niezdatna</p>
Dekompozycja ze względu na: 2 (w sytuacji, gdy 1 jest zdatny)	
<p><u>2 zdatny</u> z prawdopodobieństwem K_2, konieczny jest kolejny etap, czyli dekompozycja ze względu na element 3</p>	<p><u>2 niezdatny</u> – z prawdopodobieństwem $[1-K_2]$; struktura S_2 (złożona z elementów 1 - sprawny, 3, 4, 5 i 6 – mogą być w dowolnym stanie niezawodnościowym) jest zdatna z prawdopodobieństwem $K(S_2)$</p> 
Dekompozycja ze względu na: 3 (w sytuacji, gdy 1 i 2 są zdatne)	
<p><u>3 zdatny</u> z prawdopodobieństwem K_3, konieczny jest kolejny etap, czyli dekompozycja ze względu na element 4</p>	<p><u>3 niezdatny</u> – z prawdopodobieństwem $[1-K_3]$; struktura S_3 jest zdatna z prawdopodobieństwem $K(S_3)$</p> 
Dekompozycja ze względu na: 4 (w sytuacji, gdy 1,2 i 3 są zdatne)	
<p><u>4 zdatny</u> z prawdopodobieństwem K_4; struktura S_4 (złożona ze sprawnych elementów 1, 2, 3 i 4) jest zdatna z prawdopodobieństwem $K(S_4)=1$ (suma Q_i daje Q_n); kolejny etap nie jest już potrzebny (stany elementów 5 i 6 są nieistotne)</p> 	<p><u>4 niezdatny</u> – z prawdopodobieństwem $[1-K_4]$; struktura S_5 jest zdatna z prawdopodobieństwem $K(S_5)$</p> 

Powyżej, w procesie dekompozycji wielostopniowej, dokonano identyfikacji 5 różnych wzajemnie wykluczających się sytuacji. W 4 przypadkach uzyskano struktury, dla których można zastosować MWA i wyznaczyć $K(S_2)$, $K(S_3)$, $K(S_4)$ i $K(S_5)$. Na samym końcu do wyznaczenia $K(P_0)$ należy zastosować wzór na prawdopodobieństwo zupełne w postaci:

$$K(S) = K(S_1) \cdot P(S_1) + K(S_2) \cdot P(S_2) + K(S_3) \cdot P(S_3) + K(S_4) \cdot P(S_4) + K(S_5) \cdot P(S_5)$$

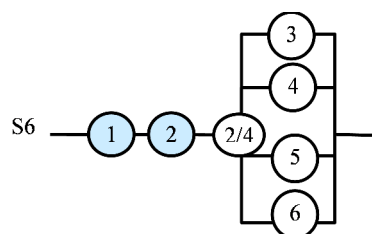
Wartości występujące w powyższym wzorze również najlepiej wyznaczać tabelarycznie (tab.4).

Tabela 4. Wyznaczanie członów występujących we wzorze na prawdopodobieństwo zupełne (opracowanie własne)

Table 4. Determination of elements in the formula for a complete probability (authors' work)

Struktura	Prawdopodobieństwo sprawności struktury S_i (warunkowe)	Prawdopodobieństwo zajęcia sytuacji (warunku) $P(S_i)$	Iloczyn $K(S_i) \cdot P(S_i)$
S1	$K(S_1)=0$	$P(S_1)=1-K_1=0,1$	0
S2	$K(S_2)=K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6=0,6561$	$P(S_2)=K_1 \cdot (1-K_2)=0,09$	0,059049
S3	$K(S_3)=K(2z3)=K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 + K_4 \cdot K_5 \cdot (1-K_6) + K_4 \cdot (1-K_5) \cdot K_6 + (1-K_4) \cdot K_5 \cdot K_6=0,972$	$P(S_3)=K_1 \cdot K_2 \cdot (1-K_3)=0,081$	0,078732
S4	$K(S_4)=1$	$P(S_4)= K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 0,6561$	0,6561
S5	$K(S_5)= 1-(1-K_5) \cdot (1-K_6)=0,99$	$P(S_5)= K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot (1-K_4) = 0,0729$	0,072171
	Suma	1,0	0,866052

Uzyskujemy wynik $K(P_0)= 0,866052$. Proces dekompozycji pozwolił nam na uzyskanie dokładnego wyniku $K(P_0)$ i znaczne ograniczenie pracochłonności – zamiast 64 stanów MPZ należało uwzględnić jedynie 5 różnych sytuacji i zastosować wzór na prawdopodobieństwo zupełne. W tym przykładzie, gdy agregat nr 1 występuje we wszystkich MDS, można było nie przeprowadzać dekompozycji ze względu na agregat, gdyż $K(P_0)=K_1 \cdot K(S^*)$, gdzie S^* - struktura złożona z agregatów 2, 3, 4, 5 i 6. Natomiast przy wyznaczaniu $K(S^*)$ należy dekompozycję zastosować, co prowadzi do wydzielenia pozostałych struktur. Warto jeszcze zaznaczyć, że możliwe było jeszcze większe uproszczenie obliczeń, gdyż w przypadku, gdy elementy 1 i 2 są zdadne (gwarancja $Q_1+Q_2=80\%Q_n$), można było skonstruować schemat niezawodnościowy nowej struktury S_6 (rys.2) obejmujący łącznie przypadki S_3, S_4 i S_5 .



Rys. 2. Struktura S_6 możliwa do utworzenia na drugim etapie dekompozycji (opracowanie własne)

Fig. 2. Structure S6 possible to create at the second stage of decomposition (authors' work)

Należy też podkreślić, że wyznaczone w tabeli 4 iloczyny postaci $K(S_i) \cdot P(S_i)$ są równocześnie bezwarunkowymi prawdopodobieństwami sprawności struktur S_i . Mogłyby one być wyznaczone za pomocą MPZ po odpowiednim pogrupowaniu stanów elementarnych. W tabeli 5 zamieszczono wszystkie $I=2^6=64$ stany elementarne pompowni właśnie po takim pogrupowaniu, przy czym k oznacza liczbę agregatów równocześnie niesprawnych. Stanów sprawności (E1) jest tylko 12. Natomiast suma prawdopodobieństw zajść tych stanów wynosi:

$$K(\text{MPZ}) = \sum_{i \in E1} P_i = 0,866052.$$

Tabela 5. MPZ dla przykładu 1 po pogrupowaniu stanów elementarnych zgodnie ze strukturami S_i (opracowanie własne)Table 5. MPZ for example 1 after grouping elementary states according to S_i structures (authors' work)

i	k	1	2	3	4	5	6	P_i	Stan	S_i
1	5	0	0	0	1	0	0	9,00E-06	E0	S1
2	4	0	0	0	1	0	1	8,10E-05	E0	
3	4	0	0	0	1	1	0	8,10E-05	E0	
4	3	0	0	0	1	1	1	0,000729	E0	
5	6	0	0	0	0	0	0	1,00E-06	E0	
6	5	0	0	0	0	0	1	9,00E-06	E0	
7	5	0	0	0	0	1	0	9,00E-06	E0	
8	4	0	0	0	0	1	1	8,10E-05	E0	
9	4	0	0	1	1	0	0	8,10E-05	E0	
10	3	0	0	1	1	0	1	0,000729	E0	
11	3	0	0	1	1	1	0	0,000729	E0	
12	2	0	0	1	1	1	1	0,006561	E0	
13	5	0	0	1	0	0	0	9,00E-06	E0	
14	4	0	0	1	0	0	1	8,10E-05	E0	
15	4	0	0	1	0	1	0	8,10E-05	E0	
16	3	0	0	1	0	1	1	0,000729	E0	
17	4	0	1	0	1	0	0	8,10E-05	E0	
18	3	0	1	0	1	0	1	0,000729	E0	
19	3	0	1	0	1	1	0	0,000729	E0	
20	2	0	1	0	1	1	1	0,006561	E0	
21	5	0	1	0	0	0	0	9,00E-06	E0	
22	4	0	1	0	0	0	1	8,10E-05	E0	
23	4	0	1	0	0	1	0	8,10E-05	E0	
24	3	0	1	0	0	1	1	0,000729	E0	
25	3	0	1	1	1	0	0	0,000729	E0	
26	2	0	1	1	1	0	1	0,006561	E0	
27	2	0	1	1	1	1	0	0,006561	E0	
28	1	0	1	1	1	1	1	0,059049	E0	
29	4	0	1	1	0	0	0	8,10E-05	E0	
30	3	0	1	1	0	0	1	0,000729	E0	
31	3	0	1	1	0	1	0	0,000729	E0	
32	2	0	1	1	0	1	1	0,006561	E0	

Tabela 5 (cd.). MPZ dla przykładu 1 po pogrupowaniu stanów elementarnych zgodnie ze strukturami Si (opracowanie własne)

Table 5 (cont.). MPZ for example 1 after grouping elementary states according to Si structures (authors' work)

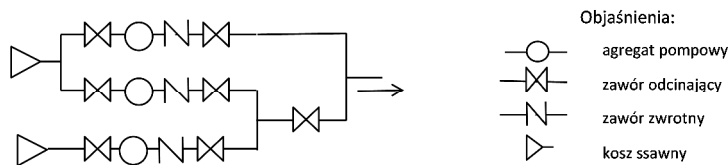
i	k	1	2	3	4	5	6	Pi	Stan	Si
33	4	1	0	0	1	0	0	8,10E-05	E0	S2
34	3	1	0	0	1	0	1	0,000729	E0	
35	3	1	0	0	1	1	0	0,000729	E0	
36	2	1	0	0	1	1	1	0,006561	E0	
37	5	1	0	0	0	0	0	9,00E-06	E0	
38	4	1	0	0	0	0	1	8,10E-05	E0	
39	4	1	0	0	0	1	0	8,10E-05	E0	
40	3	1	0	0	0	1	1	0,000729	E0	
41	3	1	0	1	1	0	0	0,000729	E0	
42	2	1	0	1	1	0	1	0,006561	E0	
43	2	1	0	1	1	1	0	0,006561	E0	
44	1	1	0	1	1	1	1	0,059049	E1	
45	4	1	0	1	0	0	0	8,10E-05	E0	
46	3	1	0	1	0	0	1	0,000729	E0	
47	3	1	0	1	0	1	0	0,000729	E0	
48	2	1	0	1	0	1	1	0,006561	E0	
49	3	1	1	0	1	0	0	0,000729	E0	
50	2	1	1	0	1	0	1	0,006561	E1	
51	2	1	1	0	1	1	0	0,006561	E1	
52	1	1	1	0	1	1	1	0,059049	E1	
53	4	1	1	0	0	0	0	8,10E-05	E0	
54	3	1	1	0	0	0	1	0,000729	E0	
55	3	1	1	0	0	1	0	0,000729	E0	
56	2	1	1	0	0	1	1	0,006561	E1	
57	2	1	1	1	1	0	0	0,006561	E1	
58	1	1	1	1	1	0	1	0,059049	E1	
59	1	1	1	1	1	1	0	0,059049	E1	
60	0	1	1	1	1	1	1	0,531441	E1	
61	3	1	1	1	0	0	0	0,000729	E0	
62	2	1	1	1	0	0	1	0,006561	E1	
63	2	1	1	1	0	1	0	0,006561	E1	
64	1	1	1	1	0	1	1	0,059049	E1	

Jak widać, nakład pracy przy zastosowaniu procesu dekompozycji jest nieporównywalnie mniejszy niż przy zastosowaniu MPZ, a uzyskany wynik K jest dokładny.

2.2. Przykład 2

Należy w najprostszy sposób wyznaczyć niezawodność pompowni, której schemat techniczny przedstawiono poniżej (rys. 3). Dla spełnienia warunku $Q_w=Q_n$ agregaty muszą pracować w strukturze „1 z 3”. Agregaty są jednorodne o niezawodności $K(A_{Pi})=0,90$, natomiast dla zasuw odcinających (ZO) i zaworów zwrotnych (ZZ) niezawodność wynosi $K(ZO)=K(ZZ)=0,98$. Ponadto ZO oraz ZZ to tzw. elementy „nieprodukcyjne” (przepływowe), dla których umow-

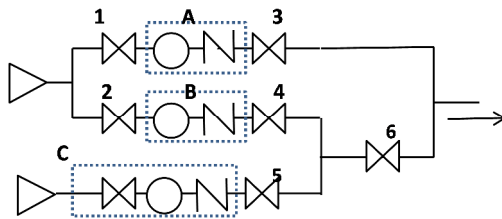
nie (przy konstruowaniu schematów niezawodnościowych) przyjmuje się $Q(ZO)=Q(ZZ)=0$. W tym przykładzie nie jest analizowana poprawność schematu technicznego pompowni.



Rys. 3. Schemat techniczny pompowni do przykładu 2 (opracowanie własne)

Fig. 3. Technical diagram of the pump station, example 2 (authors' work)

Najpierw należy podjąć próbę skonstruowania schematu niezawodnościowego. W tym celu, uwzględniając tzw. „kontakt hydrauliczny” blokuje się elementy (rys. 4) i wypisuje minimalne drogi sprawności (tab.6).



Rys. 4. Blokowanie elementów z uwzględnieniem tzw. kontaktu hydraulicznego (opracowanie własne)

Fig. 4. Blocking of elements including so-called hydraulic contact (authors' work)

Tabela 6. Minimalne drogi sprawności dla pompowni z przykładu 2 (opracowanie własne)

Table 6. Minimal efficiency routes for the pump station, example 2 (authors' work)

Droga	Blok i elementy								
	A	B	C	1	2	3	4	5	6
I	A			1	2	3			6
II		B		1	2	3	4	5	6
III			C			3	4	5	6

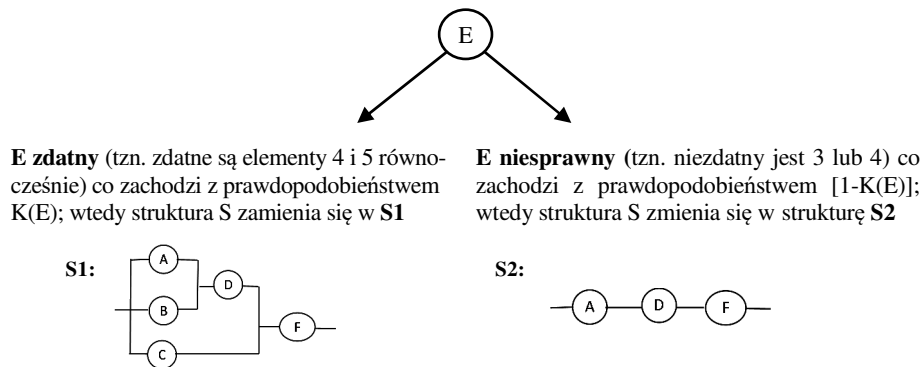
Łatwo zauważyć, że pewne elementy występują zawsze razem (tutaj 1 i 2 albo 4 i 5), można je więc również zblokować. I tak blok D będzie złożony z szeregowo połączonych elementów 1 i 2, blok E – z szeregowo połączonych elementów 4 i 5, a blok F z szeregowo połączonych elementów 3 i 6. Teraz tabelę MDS można przedstawić w postaci uproszczonej (tab.7).

Tabela 7. Minimalne drogi sprawności dla pompowni z przykładu 2 po dodatkowym pogrupowaniu elementów (opracowanie własne)

Table 7. Minimal efficiency routes for the pump station (example 2) after elements grouping (authors' work)

Droga	Bloki i elementy					
	A	B	C	D (1+2)	E (4+5)	F (3+6)
I	A			D		F
II		B		D	E	F
III			C		E	F

Jak widać nie można skonstruować prawidłowego schematu dla struktury równoległej „1 z 3”. Tutaj wystarczy przeprowadzić dekompozycję jednostopniową a jako element dekompozycyjny wybrano blok E. Równocześnie przedstawienie procesu dekompozycji w formie drzewa jest czytelne (rys.5).



Rys. 5. Proces dekompozycji jednostopniowej dla przykładu 2 ze względu na blok E (opracowanie własne)
 Fig. 5. Single - stage decomposition with regard to block E, example 2 (authors' work)

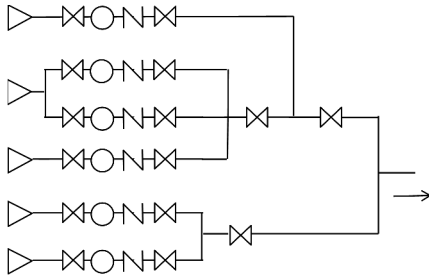
Zastosowanie wzoru na prawdopodobieństwo zupełne pozwala uzyskać dokładny wynik. Tutaj $K(S) = K(S1) \cdot K(E) + K(S2) \cdot [1 - K(E)]$. Z obliczeń uzyskujemy: $K(S1)=0,953499$ i $K(S2)=0,813529$ oraz $K(S)=0,947956$.

Taki sam wynik uzyskuje się po zastosowaniu MPZ, w której należy uwzględnić $I=2^6=64$ stany elementarne, wśród których jest tylko 15 stanów zdatności. Jest oczywiste, że można było przeprowadzać dekompozycję ze względu na blok D (zamiast E).

2.3. Przykład 3

Podobnie jak w poprzednim przykładzie należy w najprostszy sposób wyznaczyć niezawodność pompowni, której schemat techniczny przedstawiono poniżej (rys. 6). Dla spełnienia warunku $Q_w=Q_n$ agregaty muszą pracować

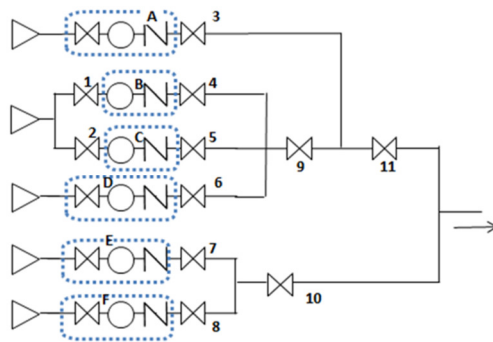
w strukturze „3 z 6”. Agregaty są jednorodne o niezawodności $K(\text{APi})$, natomiast dla zasuw odcinających i zaworów zwrotnych niezawodność wynosi $K(\text{ZO})=K(\text{ZZ})$. Ponadto, jak poprzednio, ZO i ZZ to tzw. elementy „nieprodukcyjne” (przepływowe), dla których umownie (przy konstruowaniu schematów niezawodnościowych) przyjmuje się $Q(\text{ZO})=Q(\text{ZZ})=0$. Podobnie jak w przykładzie 3 do celów badań niezawodnościowych dopuszczono nieprawidłowy z technicznego punktu widzenia schemat pompowni.



Rys. 6. Schemat techniczny pompowni do przykładu 3

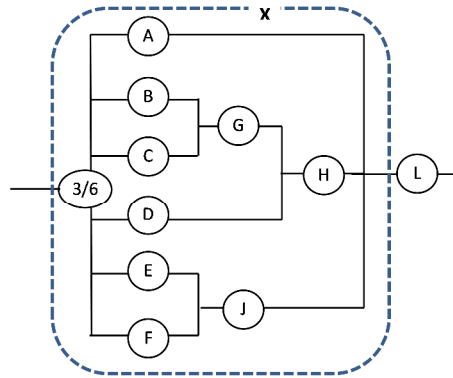
Fig. 6. Technical diagram of the pump station, example 3

Podobnie jak w przykładzie 3 najpierw, w celu uproszczenia schematu, poblokowano i ponumerowano elementy, uwzględniając przy tym kontakt hydrauliczny (rys.7), po czym dla określonych powyżej wymagań skonstruowano schemat niezawodnościowy (rys.8). Blok G tworzą szeregowo połączone zasuwę 1 i 2, blok H – zasuwę 4, 5 i 6, blok J – zasuwę 7 i 8 a blok L – zasuwę 3, 9, 10 oraz 11.



Rys. 7. Blokowanie elementów pompowni z przykładu 3 z uwzględnieniem kontaktu hydraulicznego (opracowanie własne)

Fig. 7. Blocking of the pump station elements (example 3) including a hydraulic contact (authors' work)



Rys. 8. Schemat niezawodnościowy nietypowej struktury progowej dla przykładu 4 (opracowanie własne)

Fig. 8. The reliability scheme of an unusual threshold structure, example 4 (authors' work)

Strukturę niezawodnościową pompowni sprowadzono do szeregowego połączenia bloków X oraz L. Stąd $K(P_o) = K(X) \cdot K(L)$. Blok X stanowi nietypową strukturę progową, której niezawodność $K(X)$ należy wyznaczyć wykorzystując dekompozycję ze względu na bloki G, H oraz J. Najbardziej optymalne będzie przeprowadzenie tzw. dekompozycji kombinowanej: najpierw dekompozycji ze względu na blok H, od którego „zależy najwięcej” (tab. 8), a później dekompozycji równoczesnej ze względu na bloki G i J. Między blokami G oraz J nie ma takiej zależności, że każda droga zawierająca jeden z tych bloków musiałaby zawierać drugi blok. Należy zwrócić uwagę, że jeśli blok H jest niesprawny, to stan bloku G jest nieistotny, co w tabeli 8 oznaczono symbolem gwiazdki „*” (przez analogię do maski pasującej do wszystkiego i stosowanej w systemie MS Office). Stan pierwszy (-,*,*) ze względu na bloki H, G oraz J tak naprawdę obejmuje 4 stany (-, +, +), (-, +, -), (-, -, +) oraz (-, -, -), a tu zastosowanie maski pozwoli na uproszczenie obliczeń. Dla sytuacji, gdy blok H jest sprawny przeprowadzono dekompozycję równoczesną ze względu na bloki G oraz J, czyli rozważono 4 przypadki.

Tabela 8. Pierwszy etap dekompozycji kombinowanej – ze względu na blok H (opracowanie własne)

Table 8. The first phase of a combined decomposition with regard to block H (authors' work)

Blok			Struktura	Prawdopodobieństwo przypadku
H	G	J		
-	*	*	X1: „4 z 4” (A,E,F,J)	$P(X1) = 1 - K(H)$
+	+	+	X2: „3 z 6” (A,B, C,D, E,F)	$P(X2) = K(H) \cdot K(G) \cdot K(J)$
	+	-	X3: „3 z 4” (A, B, C, D)	$P(X3) = K(H) \cdot K(G) \cdot [1 - K(J)]$
	-	+	X4: „3 z 4” (A, D, E, F)	$P(X4) = K(H) \cdot [1 - K(G)] \cdot K(J)$
	-	-	X5: niesprawna	$P(X5) = K(H) \cdot [1 - K(G)] \cdot [1 - K(J)]$
			suma	1,0

Zastosowanie wzoru na prawdopodobieństwo zupełne pozwala wyznaczyć $K(X)$ jako:

$$K(X) = K(X1) \cdot P(X1) + K(X2) \cdot P(X2) + K(X3) \cdot P(X3) + K(X4) \cdot P(X4)$$

Wyznaczenie prawdopodobieństw sprawności bloków $X1$, $X2$, $X3$ i $X4$ nie powinno stwarzać problemów, gdyż są to już struktury typowe, jednak należy pamiętać o ich niejednorodności, która wynika z faktu, że bloki składają się z różnych elementów.

3. Podsumowanie

W praktyce inżynierskiej mogą występować przypadki, gdy nie można skonstruować schematu niezawodnościowego systemu, przez co nie można wyznaczyć dokładnie wartości niezawodności systemu K . Znajomość tej miary jest ważna, gdyż umożliwia przeprowadzenie oceny działania systemu. Jednak w wielu sytuacjach można ominąć tę trudność poprzez zastosowanie procesu dekompozycji.

Proces dekompozycji może być stosowany w zależności od potrzeb jako dekompozycja jednokrotna albo jako dekompozycja wielokrotna. W drugim przypadku odpowiednio do sytuacji może to być: dekompozycja stopniowa - dokonywana kolejno (stopniowo) ze względu na kilka elementów, dekompozycja równoczesna - dokonywana od razu ze względu na kilka elementów (najczęściej dwa) albo dekompozycja kombinowana - składająca się z kilku etapów dekompozycji wielostopniowej i/lub równoczesnej. W każdym przypadku, w zależności od stanów elementarnych elementów dekompozycyjnych, generowana są nowe struktury (tzw. warunkowe), w których elementy dekompozycyjne nie występują. Proces dekompozycji jest prowadzony etapowo, aż do chwili, gdy dla wszystkich struktur warunkowych S_i możliwe jest wyznaczenie dokładnej wartości $K(S_i)$ za pomocą wzorów analitycznych. Na końcu należy zastosować wzór na prawdopodobieństwo zupełne, który łącznie ujmuje wszystkie możliwe przypadki dekompozycji. Uzyskany niewielkim nakładem pracy wynik jest dokładny. Przedstawiona metodyka, wyjaśniona szczegółowo na kilku przykładach aplikacyjnych, jest jednocześnie prosta i przydatna. Może znaleźć zastosowanie do wyznaczania niezawodności wielu systemów i obiektów, gdy znajomość dokładnej wartości K warunkuje podjęcie prawidłowej, strategicznej decyzji dotyczącej ewentualnej konieczności modernizacji obiektu.

Literatura

- [1] Bajer J., Iwanejko R., Kapcia J., Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych w zadaniach, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [2] Ermolin Ju. A., Alekseev M. I.: Metod dekompozicii i ekwivalentirovanija kanlizacionnoj seti. Vodosnabżenie i Sanitarnaja Technika No 11, s. 51-57, 2012.

- [3] Iwanejko R., Analiza błędów metod wyznaczania miar niezawodności obiektów komunalnych na przykładzie systemu zaopatrzenia w wodę. *Czasopismo Techniczne 3-Ś/2009*, Zeszyt 11, str. 21-38, Kraków 2009.
- [4] Iwanejko R., Accuracy of reliability measures of water supply and sewage facilities. *Scientific Problems Of Machines Operation And Maintenance*, 1 (157) 2009, ss. 29-36.
- [5] Iwanejko R., Bajer J., Dekompozycja wielokrotna jako metoda dokładnego wyznaczania niezawodności systemów złożonych, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, t. XXXIV, z. 64 (4/II/17), s. 287-296. DOI:10.7862/rb.2017.246.
- [6] Królikowska J., Kubala M., Analiza problemów praktycznego zastosowania metody dekompozycji i ekwiwalentowania, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, 2015 z. 62, nr 3/I, s. 243-252, DOI: 10.7862/rb.2015.109.
- [7] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*, Arkady, Warszawa 1993.
- [8] Migdałski J. (red.), *Poradnik niezawodności, Podstawy matematyczne*. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1982.
- [9] Rak J. i inni, *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
- [10] Wieczysty A., *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych., Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
- [11] Wieczysty A. (red.), *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*, Monografie KIS PAN, Kraków 2001.

APPLICATIONS FOR MULTIPLE DECOMPOSITION FOR ACCURATE DETERMINATION OF RELIABILITY OF COMPLEX SYSTEMS

Summary

During both design and operation of engineering systems determination of their basic reliability measure K becomes extremely important. Knowledge of this value, interpreted as a probability of system efficiency, helps to evaluate the system operation and to decide whether it needs modernization. In real life, many strategic systems are considerable complex and therefore the reliability of K cannot be accurately determined using the simplest analytical method. To get around this difficulty, system decomposition is often needed. The decomposition process can be carried out with regard to one, several or even to all elements. These elements are called decomposition elements. The article presents practical applications of multiple decomposition. Each example involves separate cases, when either the selected decomposition elements are in working order or they are out of order. Depending on the choice of decomposition elements, a simultaneous, gradual or combined decomposition is carried out. The decomposition process is carried out until the structures obtained for all possible combinations of efficiency or failure conditions of decomposition elements are mixed. The use of a complete probability formula allows for a combined consideration of all analyzed cases. The presented examples show that the method is relatively simple and not very labor-intensive, if compared to the exact method of a complete review. Although the effort and the method's success are largely determined by a choice of

decomposition elements, this does not affect its practical application. The method can be used to determine reliability of many systems and objects of rather complex structures with a relatively small effort.

Keywords: stationary readiness indicator, single parameter methods, step decomposition, simultaneous decomposition, combined decomposition

Przesłano do redakcji: 20.11.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.