ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ Nr 271
Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 57 (1/10) 2010

Krzysztof BORYCZKO
Janusz R. RAK
Politechnika Rzeszowska

ROZWAŻANIA NA TEMAT PODWYŻSZANIA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU O PODSTAWOWYCH STRUKTURACH NIEZAWODNOŚCIOWYCH

Celem pracy jest przedstawienie możliwości podwyższania niezawodności systemów o podstawowych strukturach niezawodnościowych. Wyznaczono przyrost wskaźnika gotowości elementu struktury szeregowej oraz równoległej zapewniający wymagany przyrost niezawodności systemu. Zaprezentowano metody analizy niezawodności na przykładzie systemu zaopatrzenia w wodę (SZW). Obliczono prawdopodobieństwa stanów pracy SZW składającego się z trzech jednakowych podsystemów dostaw wody (PsDoW) o takich samych wskaźnikach gotowości, a także dla różnych wartości tych wskaźników. W pracy przedstawiono przykład wyznaczenia dystrybuanty zdolności produkcyjnej metodą rekurencyjną (rekursywną) dla SZW składającego się z trzech różnych PsDoW o różnych wskaźnikach gotowości.

1. Wstęp

O niezawodności systemów technicznych decyduje niezawodność ich elementów składowych. Awarie z kolei mają w większości przypadków swój początek w uszkodzeniu pojedynczych elementów. Jedna z metod oceny ilościowej niezawodności elementów polega na statystycznym wyznaczeniu estymatorów wskaźników niezawodności na podstawie badań eksploatacyjnych lub testowych. Podstawowym źródłem danych są użytkownicy, jednostki prowadzące remonty, naprawy gwarancyjne i diagnostykę. Badania przyśpieszone można prowadzić w warunkach laboratoryjnych. Informacje pozyskuje się także z badań prototypów. Dane eksploatacyjne pozwalają na określenie liczby awarii w jednostce czasu, czasów pracy bezuszkodzeniowej, czasów trwania napraw, a także objawów, przyczyn i skutków uszkodzeń.

Podstawowym wskaźnikiem niezawodności jest stacjonarny wskaźnik gotowości K wyznaczany ze wzoru [4]:

$$K = \frac{T_p}{T_p + T_n} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \tag{1}$$

gdzie: T_p – estymator średniego czasu pracy bezuszkodzeniowej,
T_n – estymator średniego czasu naprawy,
μ – estymator intensywności naprawy,
λ – estymator intensywności uszkodzeń.

Stacjonarny wskaźnik gotowości K to poziom, przy którym dany system, podsystem lub układ elementów swoje zadania spełnia w sposób zadowalający użytkowników, a chwilowe przerwy w pracy lub okresy pracy ze zmniejszonym zakresem zadań lub z obniżonymi parametrami technologicznymi zdarzają się stosunkowo rzadko [5].

Poszczególne elementy tworzące system wchodzą w skład uporządkowanych struktur niezawodnościowych.

2. Krótka charakterystyka podstawowych struktur niezawodnościowych

Wskaźnik gotowości struktury szeregowej K_{ss} wynosi:

$$K_{ss} = \prod_{i=1}^{n} K_i \tag{2}$$

gdzie K_i – wskaźnik gotowości i-tego elementu.

Wskaźnik gotowości struktury równoległej K_{sr} wynosi:

$$K_{sr} = 1 - \prod_{j=1}^{m} (1 - K_j) \tag{3}$$

gdzie: K_j – wskaźnik gotowości j-tego elementu.

3. Podwyższenie niezawodności systemu

Struktura szeregowa

Wymagany poziom niezawodności systemu o strukturze szeregowej należy zwiększyć do $K_{SS} + \Delta K_{SS}$. Osiąga się to przez zwiększenie wskaźnika gotowości dowolnego elementu:

$$K_{ss} + \Delta K_{ss} = K_1 \cdot K_2 \cdot \ldots \cdot K_{i-1} \cdot (K_i + \Delta K_i) \cdot K_{i+1} \cdot \ldots \cdot K_n \tag{4}$$

$$K_{ss} + \Delta K_{ss} = \prod_{i=1}^{n} K_i + \left(\prod_{i=1, i \neq i}^{n} K_i \right) \Delta K_i \tag{5}$$

gdzie: ΔK_i – przyrost wskaźnika gotowości i-tego elementu zapewniający wymagany przyrost niezawodności systemu o strukturze szeregowej.

Jeżeli

$$K_{ss} = \prod_{i=1}^{n} K_i \tag{6}$$

to podstawiając do zależności (5) otrzymuje się:

$$\Delta K_i = \frac{\Delta K_{ss}}{\prod\limits_{i=1, i \neq i}^{n} K_i} \tag{7}$$

Dodatkowo powinien być spełniony warunek:

$$K_i + \Delta K_i \leq 1{,}0. \tag{8}$$

Przykład 1. Podwyższenie niezawodności systemu o strukturze szeregowej

Struktura szeregowa składa się z trzech elementów o wskaźnikach gotowości K_1 = 0,6, K_2 = 0,7, K_3 = 0,8. Wskaźnik gotowości struktury szeregowej wynosi:

$$K_{ss} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 0{,}6 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8 = 0{,}336.$$

Zadanie polega na zwiększeniu K_{SS} = 0,336 do wartości wymaganej K_{SSW} = = 0,500, czyli o ΔK_{SS} = 0,164.

Podwyższenie niezawodności systemu o strukturze szeregowej można osiągnąć poprzez zwiększenie o ΔK wg wzoru (7):

- elementu 1. o

$$\Delta K_1 = \frac{0{,}164}{0{,}7 \cdot 0{,}8} = 0{,}2929,$$

- lub elementu 2. o

$$\Delta K_2 = \frac{0{,}164}{0{,}6 \cdot 0{,}8} = 0{,}3416,$$

- lub elementu 3. o

$$\Delta K_3 = \frac{0{,}164}{0{,}6 \cdot 0{,}7} = 0{,}3905.$$

Podwyższenie niezawodności systemu o strukturze szeregowej poprzez zwiększenie o ΔK elementu 2. lub 3. nie jest możliwe, gdyż dla tych elementów nie jest spełniony warunek (8).

Struktura równoległa

Wskaźnik gotowości struktury równoległej wyznacza się ze wzoru:

$$\Delta K_{sr} = 1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - K_j) \tag{9}$$

Zwiększenie niezawodności systemu można uzyskać poprzez zwiększenie wskaźnika gotowości dowolnego j-tego elementu:

$$K_{sr} + \Delta K_{sr} = 1 - (1 - K_1)(1 - K_2) \cdot \ldots \cdot [1 - (K_j + \Delta K_j)] \cdot \ldots \cdot (1 - K_m) \tag{10}$$

$$K_{sr} + \Delta K_{sr} = 1 - \left[\prod_{j=1, j \neq j}^{m}(1 - K_j)\right] \cdot (1 - K_j - \Delta K_j) =$$

$$= 1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - K_j) + \Delta K_j \left[\prod_{j=1, j \neq j}^{m}(1 - K_j)\right] \tag{11}$$

i ostatecznie:

$$\Delta K_j = \frac{\Delta K_{sr}}{\prod_{j=1, j \neq j}^{m}(1 - K_j)} \tag{12}$$

Przykład 2. Podwyższenie niezawodności systemu o strukturze równoległej

Struktura równoległa składa się z trzech elementów o wskaźnikach gotowości K_1 = 0,6, K_2 = 0,7, K_3 = 0,8. Wskaźnik gotowości struktury równoległej wynosi:

$$K_{sr} = 1 - (1 - 0,6)(1 - 0,7)(1 - 0,8) = 0,976\,.$$

Zadanie polega na zwiększeniu K_{sr} = 0,976 do wartości wymaganej K_{srw} = 0,990, czyli o ΔK_{sr} = 0,014.

Podwyższenie niezawodności systemu o strukturze równoległej można osiągnąć poprzez zwiększenie o ΔK wg wzoru (12):

- elementu 1. o

$$\Delta K_1 = \frac{0,014}{(1 - 0,7) \cdot (1 - 0,8)} = 0,2333333,$$

- elementu 2. o

$$\Delta K_2 = \frac{0,014}{(1 - 0,6) \cdot (1 - 0,8)} = 0,175,$$

- elementu 3. o

$$\Delta K_3 = \frac{0,014}{(1-06)\cdot(1-0,7)} = 0,1166666.$$

4. Czynnik kosztów

Struktura szeregowa

Zadanie polega na znalezieniu takiego elementu struktury szeregowej, dla którego podniesienie niezawodności o ΔK_i będzie najbardziej efektywne – odbędzie się najmniejszym kosztem.

Wskaźnik gotowości struktury zwiększony z K_{SS} do $K_{SS} + \Delta K_{SS}$ może być zrealizowany przez wzrost wskaźnika gotowości i-tego elementu z K_i do $K_i + \Delta K_i$ lub j-tego elementu z K_j do $K_j + \Delta K_j$. Na podstawie zależności (7) można wyznaczyć:

$$\Delta K_{ss} = \Delta K_i \cdot \left(\prod_{i=1, i\neq i}^{n} K_i \right) = \Delta K_j \cdot \left(\prod_{j=1, j\neq j}^{n} K_j \right) \tag{13}$$

Przekształcając, otrzymuje się:

$$\Delta K_i \cdot \frac{K_{ss}}{K_i} = \Delta K_j \cdot \frac{K_{ss}}{K_j} \tag{14}$$

i ostatecznie:

$$\Delta K_i = \frac{K_i}{K_j} \Delta K_j \tag{15}$$

Jednostkowy koszt związany z podniesieniem niezawodności struktury z K_{SS} do $K_{SS} + \Delta K_{SS}$ poprzez i-ty lub j-ty element oznaczono jako C_i i C_j. Koszt poniesiony na wzrost niezawodności systemu o strukturze szeregowej na podstawie wzoru (15) wynosi:

$$\Delta K_i \cdot C_i = \frac{K_i}{K_j} \cdot \Delta K_j \cdot \frac{C_i}{C_j} \cdot C_j \tag{16}$$

Minimalna wartość $C_i \cdot K_i$ spełnia nierówność:

$$\frac{C_i \cdot K_i}{C_j \cdot K_j} < 1 \tag{17}$$

czyli

$$C_i \cdot K_i = \min_{j=1,2,...,n} C_j \cdot K_j \tag{18}$$

Struktura równoległa

Ze wzoru (12) można otrzymać:

$$\Delta K_{sr} = \Delta K_i \left[\prod_{i=1, i \neq i}^{m} (1 - K_i) \right] = \Delta K_j \left[\prod_{j=1, j \neq j}^{m} (1 - K_j) \right] \tag{19}$$

Przekształcając, otrzymuje się:

$$\frac{\Delta K_i}{(1 - K_i)} \cdot \prod_{i=1}^{m} (1 - K_i) = \frac{\Delta K_j}{(1 - K_j)} \cdot \prod_{j=1}^{m} (1 - K_j) \tag{20}$$

i ostatecznie:

$$\Delta K_i = \frac{1 - K_i}{1 - K_j} \Delta K_j \tag{21}$$

Koszt poniesiony na wzrost niezawodności systemu o strukturze równoległej na podstawie zależności (21) wynosi:

$$\Delta K_i \cdot C_i = \frac{1 - K_i}{1 - K_j} \cdot \Delta K_j \cdot \frac{C_i}{C_j} \cdot C_j \tag{22}$$

Minimalna wartość $C_i \cdot (1 - K_i)$ spełnia nierówność:

$$\frac{C_i \cdot (1 - K_i)}{C_j \cdot (1 - K_j)} < 1 \tag{23}$$

czyli

$$C_i \cdot (1 - K_i) = \min_{j=1,2,...,n} C_j \cdot (1 - K_j) \tag{24}$$

5. Metoda analizy niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę

Podstawą oceny niezawodności są tzw. badania eksploatacyjne niezawodności. Badania tego typu są badaniami określającymi, prowadzonymi w warunkach normalnych, tj. podczas eksploatacji obiektów wodociągowych. Analiza procesu eksploatacji pozwala na przyjęcie dwustanowego modelu niezawodności, na który składają się zdatność i niezdatność [1].

Analizę niezawodności SZW można prowadzić, opierając się na rozkładzie dystrybuanty dobowej zdolności produkcji wody. Często SZW dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych składa się z m podsystemów dostawy wody (PsDoW). Każdy i-ty (i = 1, 2, …, m) PsDoW z prawdopodobieństwem K_i znajduje się w stanie zdatności, a z prawdopodobieństwem K_{Pi} w stanie niezdatności. Zachodzi przy tym zależność:

$$K_i = 1 - K_{Pi} \tag{25}$$

W najprostszym przypadku, jeżeli podsystemy dostawy wody charakteryzują się takimi samymi wskaźnikami gotowości (K_i = K) i wskaźnikami postoju (K_{Pi} = K_P), to prawdopodobieństwo awarii k podsystemów spośród m wyznacza się ze wzoru:

$$P_k = \binom{m}{k} K^{m-k} \cdot K_P^k = \frac{m!}{k!(m-k)!} \cdot K^{m-k} \cdot K_P^k \tag{26}$$

W rzeczywistości SZW składa się z różnych PsDoW o różnych zdolnościach produkcyjnych i różnych wskaźnikach niezawodnościowych. Prawdopodobieństwo przebywania SZW w różnych stanach można określić przez iloczyn dwumianów:

$$\prod_{i=1}^{m}(K_i + K_{Pi}) = (K_1 + K_{P1}) \cdot (K_2 + K_{P2}) \cdot \ldots \cdot (K_m + K_{Pm}) = K_1 \cdot K_2 \cdot \ldots \cdot K_m +$$
$$+ K_{P1} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \ldots \cdot K_m + K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \ldots \cdot K_m + \ldots + K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot \ldots \cdot K_{Pm} = 1 \tag{27}$$

Pierwszy człon w rozwinięciu odpowiada prawdopodobieństwu pracy wszystkich PsDoW, a ostatni określa prawdopodobieństwo awarii wszystkich PsDoW.

Przykład 3. Aplikacja metody obliczania prawdopodobieństwa przebywania SZW w różnych stanach przy stałej wartości K dla PsDoW

System zaopatrzenia w wodę składa się z trzech jednakowych PsDoW o zdolności produkcyjnej 30000 m^3/d każdy i wskaźniku gotowości K_1 = K_2 = = K_3 = K = 0,95 i wskaźniku postoju K_P = 0,05.

Prawdopodobieństwa stanów pracy obliczono na podstawie wzoru (26), przedstawiają się one następująco:

- praca trzech PsDoW ze zdolnością produkcyjną Q_d = 90000 m^3/d

  k = 0, m = 3,

  $$P_0 = \frac{3!}{0!(3-0)!} \cdot 0{,}95^3 \cdot 0{,}05^0 = 0{,}857375,$$

- praca dwóch PsDoW ze zdolnością produkcyjną Q_d = 60000 m^3/d

  k = 1, m = 3,

  $$P_1 = \frac{3!}{1!(3-1)!} \cdot 0,95^2 \cdot 0,05^1 = 0,135375,$$

- praca jednego PsDoW ze zdolnością produkcyjną Q_d = 30000 m^3/d

  k = 2, m = 3,

  $$P_2 = \frac{3!}{2!(3-2)!} \cdot 0,95 \cdot 0,05^2 = 7,125 \cdot 10^{-3},$$

- awaria wszystkich trzech PsDoW

  k = 3, m = 3,

  $$P_3 = \frac{3!}{3!(3-3)!} \cdot 0,95^0 \cdot 0,05^3 = 1,25 \cdot 10^{-4}.$$

Przykład 4. Obliczanie prawdopodobieństwa przebywania SZW w różnych stanach przy różnych wartościach K dla PsDoW

System zaopatrzenia w wodę składa się z czterech PsDoW o zdolności produkcyjnej 30000 m^3/d każdy. Wskaźniki gotowości wynoszą odpowiednio: K_1 = 0,99, K_2 = 0,98, K_3 = 0,97 i K_4 = 0,96.

Obliczone ze wzoru (27) prawdopodobieństwa stanów pracy wynoszą:

- praca czterech PsDoW – zdolność produkcyjna Q_d = 120000 m^3/d

  $$K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,96 = 0,90345024,$$

- praca trzech PsDoW — zdolność produkcyjna Q_d = 90000 m^3/d

  $$K_{P1} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 + K_1 \cdot K_{P2} \cdot K_3 \cdot K_4 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_{P3} \cdot K_4 +$$
  $$+ K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{P4} = 0,01 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,96 + 0,99 \cdot 0,02 \cdot 0,97 \cdot 0,96 +$$
  $$+ 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,03 \cdot 0,96 + 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,04 = 0,09314904,$$

- praca dwóch PsDoW – zdolność produkcyjna Q_d = 60000 m^3/d

  $$K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_3 \cdot K_4 + K_{P1} \cdot K_2 \cdot K_{P3} \cdot K_4 + K_{P1} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{P4} +$$
  $$+ K_1 \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} \cdot K_4 + K_1 \cdot K_{P2} \cdot K_3 \cdot K_{P4} + K_1 \cdot K_2 \cdot K_{P3} \cdot K_{P4} =$$
  $$= 0,01 \cdot 0,02 \cdot 0,97 \cdot 0,96 + 0,01 \cdot 0,98 \cdot 0,03 \cdot 0,96 + 0,01 \cdot 0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,04 +$$
  $$+ 0,99 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,96 + 0,99 \cdot 0,02 \cdot 0,97 \cdot 0,04 + 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,03 \cdot 0,04 =$$
  $$= 0,00335144,$$

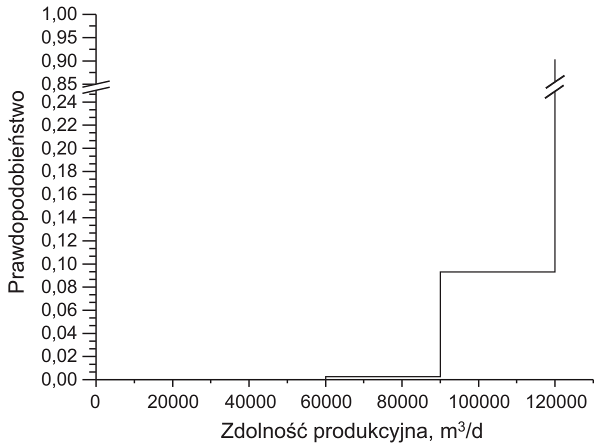
- praca jednego PsDoW – zdolność produkcyjna Q_d = 30000 m^3/d

$$K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} \cdot K_4 + K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_3 \cdot K_{P4} + K_{P1} \cdot K_2 \cdot K_{P3} \cdot K_{P4} + \\ + K_1 \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} \cdot K_{P4} = 0,01 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,96 + 0,01 \cdot 0,02 \cdot 0,97 \cdot 0,04 + \\ + 0,01 \cdot 0,98 \cdot 0,03 \cdot 0,04 + 0,99 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,04 = 0,00004904,$$

- całkowita awaria PsDoW – brak dostaw wody

$$K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} \cdot K_{P4} = 0,01 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,04 = 2,4 \cdot 10^{-7}.$$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wykres dystrybuanty zdolności produkcyjnej SWZ o zdolności osiągalnej 120000 m^3/d

Przedstawiona metoda wyznaczania dystrybuanty zdolności produkcyjnej jest mało efektywna w stosunku do systemów złożonych z dużej liczby PsDoW, wymaga bowiem dla modelu dwustanowego rozpatrzenia 2^n kombinacji. Dystrybuantę zdolności produkcyjnej (odwróconą dystrybuantę awaryjnych ubytków zdolności produkcyjnej) można wyznaczyć metodą rekurencyjną (rekursywną). Niech x będzie dowolną zmienną losową przyjmującą dwie wartości: a z prawdopodobieństwem p i 0 z prawdopodobieństwem q = 1 – p. Wówczas dystrybuanta zmiennej losowej x ma postać [2]:

$$F(x) = q1(x) + p1(x - a) \tag{28}$$

gdzie 1(x) jest funkcją skoku jednostkowego

$$1(x) = \begin{cases} 0, & \text{dla } x \le 0 \\ 1, & \text{dla } x > 0 \end{cases} \tag{29}$$

Przykład 5. Aplikacja metody wyznaczania dystrybuanty zdolności produkcyjnej metodą rekurencyjną

Wyznaczyć metodą rekurencyjną dystrybuantę zdolności produkcyjnej SZW złożonego z trzech PsDoW o zdolnościach produkcyjnych 24, 26, 50 tys. m^3/d i wskaźnikach gotowości K odpowiednio 0,98, 0,97, 0,96.

- **Krok 0**. Wartości początkowe, system zerowy
  Ustalenie wartości X (ubytku zdolności produkcyjnej): X = {0, 24, 26, 50, 74, 76, 100}
  Ustalenie wartości dystrybuanty: F_0 = {1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}
- **Krok 1**. Dodanie pierwszej jednostki – zdolność produkcyjna systemu 24 tys. m^3/d

  $F_1(0) = 0{,}98 \cdot F_0(0) + 0{,}02 \cdot F_0(0\text{-}24) = 0{,}98 \cdot F_0(0) + 0{,}02 \cdot F_0(0) = 0{,}98 \cdot 1{,}0 + 0{,}02 \cdot 1{,}0 = 1{,}0$

  $F_1(24) = 0{,}98 \cdot F_0(24) + 0{,}02 \cdot F_0(24) = 0{,}98 \cdot F_0(24) + 0{,}02 \cdot F_0(0) = 0{,}98 \cdot 0{,}0 + 0{,}02 \cdot 1{,}0 = 0{,}02$

- **Krok 2**. Dodanie drugiej jednostki – zdolność produkcyjna systemu 50 tys. m^3/d

  $F_2(0) = 0{,}97 \cdot F_1(0) + 0{,}03 \cdot F_1(0\text{-}26) = 0{,}97 \cdot F_1(0) + 0{,}03 \cdot F_1(0) = 0{,}97 \cdot 1{,}0 + 0{,}03 \cdot 1{,}0 = 1{,}0$

  $F_2(24) = 0{,}97 \cdot F_1(24) + 0{,}03 \cdot F_1(24\text{-}26) = 0{,}97\ F_1(24) + 0{,}03 \cdot F_1(0) = 0{,}97 \cdot 0{,}02 + 0{,}03 \cdot 1{,}0 = 0{,}045$

  $F_2(26) = 0{,}97 \cdot F_1(26) + 0{,}03 \cdot F_1(26\text{-}26) = 0{,}97 \cdot F_1(26) + 0{,}03 \cdot F_1(0) = 0{,}97 \cdot 0{,}0 + 0{,}03 \cdot 1{,}0 = 0{,}03$

  $F_2(50) = 0{,}97 \cdot F_1(50) + 0{,}03 \cdot F_1(50\text{-}26) = 0{,}97 \cdot F_1(50) + 0{,}03 \cdot F_1(24) = 0{,}97 \cdot 0{,}0 + 0{,}03 \cdot 0{,}02 = 0{,}0006$

- **Krok 3**. Dodanie trzeciej jednostki – zdolność produkcyjna systemu 100 tys. m^3/d

  $F_3(0) = 0{,}96 \cdot F_2(0) + 0{,}04 \cdot F_2(0\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(0) + 0{,}04 \cdot F_2(0) = 0{,}96 \cdot 1{,}0 + 0{,}04 \cdot 1{,}0 = 1{,}0$

  $F_3(24) = 0{,}96 \cdot F_2(24) + 0{,}04 \cdot F_2(24\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(24) + 0{,}04 \cdot F_2(0) = 0{,}96 \cdot 0{,}0494 + 0{,}04 \cdot 1{,}0 = 0{,}087424$

  $F_3(26) = 0{,}96 \cdot F_2(26) + 0{,}04 \cdot F_2(26\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(26) + 0{,}04 \cdot F_2(0) = 0{,}96 \cdot 0{,}03 + 0{,}04 \cdot 1{,}0 = 0{,}0688$

  $F_3(50) = 0{,}96 \cdot F_2(50) + 0{,}04 \cdot F_2(50\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(50) + 0{,}04 \cdot F_2(0) = 0{,}96 \cdot 0{,}0006 + 0{,}04 \cdot 1{,}0 = 0{,}040576$

  $F_3(74) = 0{,}96 \cdot F_2(74) + 0{,}04 \cdot F_2(74\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(74) + 0{,}04 \cdot F_2(24) = 0{,}96 \cdot 0{,}0 + 0{,}04 \cdot 0{,}0494 = 0{,}0001976$

$F_3(76) = 0{,}96 \cdot F_2(76) + 0{,}04 \cdot F_2(76\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(76) + 0{,}04 \cdot F_2(26) =$
$= 0{,}96 \cdot 0{,}0 + 0{,}04 \cdot 0{,}03 = 0{,}0012$

$F_3(100) = 0{,}96 \cdot F_2(100) + 0{,}04 \cdot F_2(100\text{-}50) = 0{,}96 \cdot F_2(100) + 0{,}04 \cdot F_2(50) =$
$= 0{,}96 \cdot 0{,}0 + 0{,}04 \cdot 0{,}0006 = 0{,}000024$

- **Krok 4**. Przejście na dystrybuantę zdolności produkcyjnej F(C-X) = = F'(X)

  $F(0) = F_3(100) = 0{,}000024$

  $F(24) = F_3(76) = 0{,}0012$

  $F(26) = F_3(74) = 0{,}0001976$

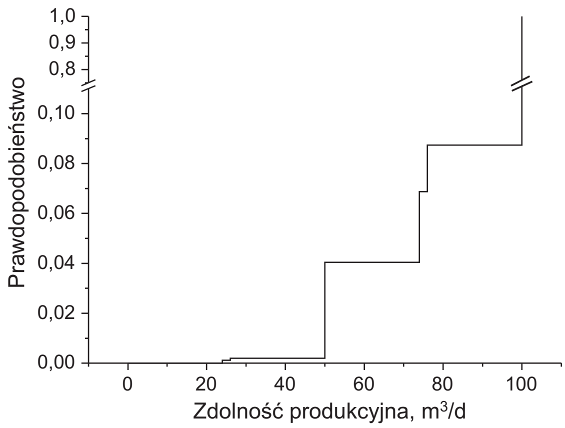
  $F(50) = F_3(50) = 0{,}040576$

  $F(74) = F_3(26) = 0{,}0688$

  $F(76) = F_3(24) = 0{,}087424$

  $F(100) = F_3(0) = 1{,}0$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wykres dystrybuanty zdolności produkcyjnej SZW o zdolności ogólnej 100 tys. m^3/d

6. Podsumowanie

- Systemy techniczne są systemami wykonującymi różne zadania, a ich praca może powodować ujemne skutki. Dlatego, obok konieczności spełnienia odpowiednich warunków oraz kryteriów technicznych i ekonomicznych, coraz częściej podkreśla się konieczność osiągnięcia pewnych wymogów niezawodnościowych [4].
- Ilościowe metody podnoszenia niezawodności nie są jedynymi. Istnieją także inne niewymierne metody, np. metoda lingwistyczna SWOT

(Strengths, Weaknesses, Oportunieties, Threats), polegająca na identyfikacji stron słabych i mocnych, zagrożeń i szans. Inna metoda, tzw. ekspertów, stosowana jest w przypadku trudności z zastosowaniem metod obliczeniowych.
- W pracy [4] przedstawiono metody oszacowania prawdopodobieństwa, że SZW Rzeszowa nie znajdzie się w stanie klęski. Metodę zastosowano także do oceny niezawodności SZW Krosna [3].
- Poprzez zwiększenie niezawodności jednego elementu systemu można zwiększyć niezawodność całego systemu. Zwiększenie niezawodności jednego elementu uzyskuje się np. poprzez przebudowę lub modernizację.
- Należy wybrać taki element, dla którego najniższe koszty modernizacji idą w parze z największym wzrostem niezawodności systemu.
- Dla SZW z dużą ilością PsDoW bardziej efektywną metodą analizy niezawodności jest metoda rekursywna.

Literatura

1. Kwietniewski M., Wójcik R.: *Analiza niesprawności systemu dostawy wody do Szczecina z jeziora Miedwie*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 12, 2000, Wydawn. SIGMA-NOT, s. 493-496.
2. Paska J.: *Niezawodność systemów elektroenergetycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
3. Rak J., Wieczysty A., Tchórzewska-Cieślak B., Kucharski B.: *Analysis of water supply system reliability in the Town of Krosno*. 5-th International Scientific and Technical Conference „Water supply and water quality". Wydawn. PZITS O/Wielkopolski, Gdańsk-Poznań 2002, s. 457-469.
4. Wieczysty A., Rak J.: *Niezawodność zaopatrzenia Rzeszowa w wodę*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2-3, 1988, Wydawn. SIGMA-NOT, s. 56-57.
5. Wieczysty A., Iwanejko R., Lubowiecka T.: *Podnoszenie niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2001.

CONSIDERATIONS ON THE SUBJECT OF INCREASING THE SYSTEM RELIABILITY WITH BASIC RELIABILITY STRUCTURES

Summary

The purpose of the work is to present the possibility to increase system reliability with basic reliability structures. The increase of the availability index of an element of a series structure and a parallel structure, which ensures the required increase of the system reliability, has been determined. Methods for reliability analysis on the example of water supply system (WSS), have been presented. The probabilities of the operational states of the WSS consisting of three identical water supply subsystems (WSS), with the same availability index, as well as for different values of availability index, have been calculated. In the work an example of determination of distribution function of productivity by recurrent (recursive) method for the WSS consisting of three different WSS, with different availability index, has been presented.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w maju 2009 r.