

Stanisław BIEDUGNIS

Marian KWIETNIEWSKI

ALGORYTM OBLICZANIA NIEZAWODNOŚCI WODOCIĄGOWYCH UKŁADÓW TRANZYTOWYCH
NA PODSTAWIE METODY MINIMALNYCH PRZEKROJÓW

Streszczenie. W celu obliczenia niezawodności układów przewodów tranzytowych uwzględniono ich rzeczywistą, złożoną strukturę. Niezawodność układów wyrażono wskaźnikiem gotowości. Przedstawiono funkcje niezawodności układów tranzytowych oraz opracowany na ich podstawie algorytm obliczania niezawodności wraz ze schematem blokowym.

1. Wstęp

Problemy obliczania niezawodności układów technicznych o strukturze złożonej jest rozwiązywany w zasadzie w odniesieniu do układów elektrycznych i energetycznych, elektronicznych czy transportujących ropę naftową lub gaz. Natomiast w odniesieniu do układów wodociągowych przewodów tranzytowych rozważania takie prowadzone są w bardzo ograniczonym zakresie. Można tutaj wymienić jedynie pracę N.N. Abramowa [1], w której analizowane są układy o strukturach: szeregowej, mieszanej (szeregowo-równoległej i równoległo-szeregowej) i mostkowej oraz prace Ju.A. Ilina [3], E.S. Erenburga [2], A. Wiczystego i T. Lubowieckiej [8], w których rozpatruje się pojedyncze rurociągi i układy przewodów łączących równoległe bez przewiązek i z przewiązkami.

We wszystkich wymienionych pracach obliczanie niezawodności układu z przewiązkami odnosi się do modelu układu tranzytowego, który jest zbiorem szeregowo połączonych tzw. sekcji, tj. odcinków przewodów lub zespołów odcinków przewodów połączonych równoległe. Przyjęcie takiego modelu układu tranzytowego wynika z założenia, iż przewody wraz z uzbrojeniem rozpatrywane są jako niepodzielne całości, a przewiązki łączące przewody tranzytowe i zlokalizowane w miejscach połączeń kolejnych sekcji są traktowane jako pewne w działaniu (prawdopodobieństwo pracy bezawaryjnej równe jedności). Analizując wymienione wyżej publikacje należy stwierdzić, iż stosowana metodyka obliczania niezawodności układów tranzytowych nie obejmuje pełnej charakterystyki układów odzwierciedlającej ich rzeczywistą złożoną strukturę. Jak wykazały analizy niezawodności różnych układów tranzytowych, uwzględnienie rzeczywistej struktury układów, a przede wszystkim sposobu połączeń elementów uzbrojenia i przewiązek, a także różnej liczby elementów uzbroje-

nia ma istotny wpływ na dokładność oceny niezawodności tego typu obiektów.

W niniejszej pracy przedstawiono algorytm obliczania niezawodności układów wodociągowych przewodów tranzytowych uwzględniający rzeczywistą złożoną strukturę tych układów. Oznacza to, iż wyjściowy schemat techniczny układów pozostaje nie zmieniony (bez uproszczeń), co pozwala na uwzględnienie wszystkich typów elementów układów takich, jak przewody, przewiazki, węzły połączeniowe oraz uzbrojenie przewodów. Ponadto, w celu zilustrowania praktycznego zastosowania opracowanego algorytmu przedstawiono wyniki obliczeń niezawodności działania jednego z układów tranzytowych działających w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Obliczenia przeprowadzono wariantowo uwzględniając w ten sposób różne etapy rozbudowy układu.

Praca niniejsza stanowi jednocześnie kontynuację modelu projektowania układów wodociągowych przewodów tranzytowych przedstawionego na IV Konferencji pt. "Sterowanie systemem wodno-gospodarczym" [5]. W modelu tym podstawowym kryterium projektowania - obok występującego zwykle kryterium ekonomicznego - jest kryterium niezawodnościowe dotyczące zapewnienia dostawy wody dla odbiorców na odpowiednim poziomie niezawodności.

Celem tej pracy jest zatem pokazanie sposobu wyznaczania kryterialnego poziomu niezawodności działania układów tranzytowych.

2. Obliczanie niezawodności układów wodociągowych przewodów tranzytowych na podstawie metody minimalnych przekrojów

Do oceny niezawodności układów przewodów tranzytowych zastosowano metodę minimalnych przekrojów [4], którą następnie zmodyfikowano na potrzeby badań i oceny niezawodności wodociągowych przewodów tranzytowych [6]. Jako miarę niezawodności działania układów i ich elementów przyjęto wskaźnik gotowości, który opisuje prawdopodobieństwo tego, że dany obiekt będzie w stanie wykonywać zadanie, do jakiego jest przeznaczony w dowolnej chwili czasu eksploatacji z wyjątkiem okresów remontów planowych.

Stacjonarną postać wskaźnika gotowości zgodnie z polską normą [7] można przedstawić ogólnie w sposób następujący:

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = \frac{T_p}{T_p + T_o} \quad (1)$$

gdzie:

K - wskaźnik gotowości,

T_p - średni czas pracy obiektu między uszkodzeniami,

T_o - średni czas odnowy obiektu.

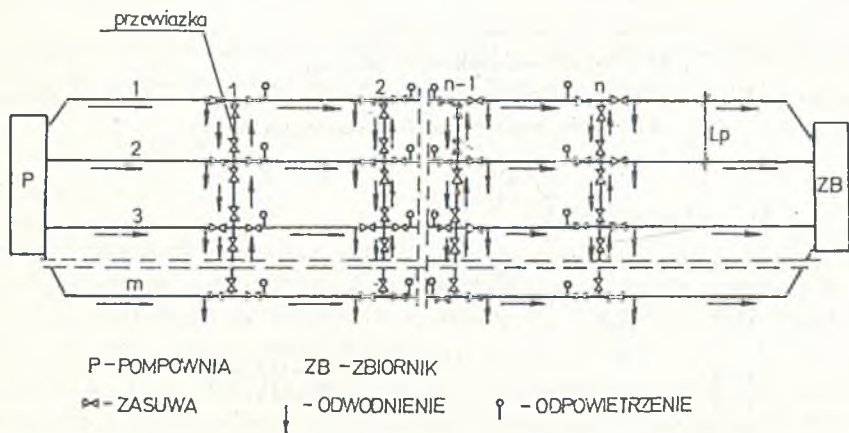
W odniesieniu natomiast do przewodów, wskaźnik gotowości wyrażono w postaci wzoru:

$$K_{pr} = \frac{1}{1 + \omega \cdot T_{op} \cdot l} \quad (2)$$

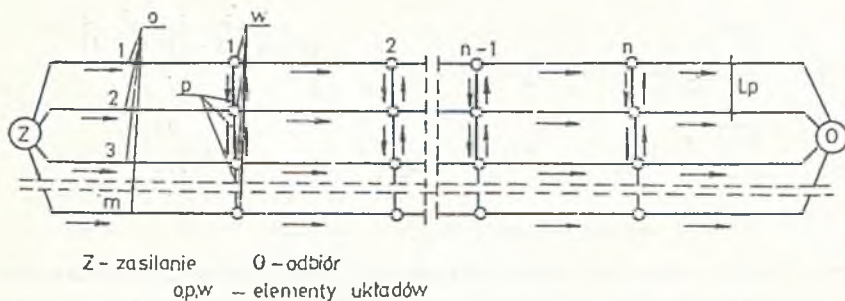
gdzie:

- K_{pr} - wskaźnik gotowości przewodu,
- ω - jednostkowy parametr strumienia uszkodzeń przewodu, $s^{-1} \cdot km^{-1}$,
- l - długość przewodu, km,
- T_{op} - średni czas odnowy przewodu, s.

Schemat układu wieloprzewodowego z przewiązkami, jako uogólnienie rozważanych układów, przedstawiono na rys. 1. Natomiast odpowiadający mu schemat niezawodnościowy pokazano na rys. 2, gdzie element "o" oznacza odcinek przewodu, element "p" przewiązkę i element "w" węzeł połączeniowy. Pod pojęciem przewiązki rozumie się tutaj odcinek poprzecznego przewodu łączący sąsiednie rurociągi. Zakłada się, że w wypadku większej liczby równoległe łączo-



Rys. 1. Schemat tranzytowego układu wieloprzewodowego z przewiązkami
 Fig. 1. Diagram of transit multipipes system with lacings



Rys. 2. Schemat struktury niezawodnościowej tranzytowego układu wieloprzewodowego z przewiązkami
 Fig. 2. Diagram of reliability structure for multipipes system with lacings

nych przewodów przewiazki są rozmieszczone w tych samych przekrojach tworzących ciągi przewiazek. Dwa pozostałe elementy z kolei składają się z podstawowych obiektów połączonych z punktu widzenia niezawodności szeregowo. Element typu "o" składa się z odcinka rury, połączeń i elementów uzbrojenia (odwodnienie i odpowietrzenie), natomiast element "w" składa się z kształtki połączeniowej (trójnik lub czwórnik) i zasuw odcinających związanych z danym węzłem.

W wyniku zastosowania zmodyfikowanej metody minimalnych przekrojów [6] otrzymano następującą postać funkcji niezawodności układów wodociągowych przewodów tranzytowych:

$$K_{11} = K_A \left[(K_{B2})^2 \cdot (K_{C2})^2 \cdot K_{D2} \cdot K_{E2} \cdot K_{F2} \right]^n \quad (3)$$

gdzie:

- K_U - wskaźnik gotowości układu,
- n - liczba przewiazek w układzie,
- $K_A, K_{B2}, \dots, K_{F2}$ - wskaźniki gotowości podzbiorów minimalnych przekrojów określane według wzorów podanych niżej:

$$K_A = \left[1 - (1 - K_O)^{(r+1)} \right]^{\binom{m}{r+1}} \quad (4)$$

$$K_{B2} = \left[1 - (1 - K_W)^{(r+1)} \right]^{\binom{m}{r+1}} \quad (5)$$

$$K_{C2} = \prod_{i=1, r} \left[1 - (1 - K_O)^i (1 - K_W)^{(r+1-i)} \right]^{\binom{r+1}{i} \binom{m}{r+1}} \quad (6)$$

$$K_{D2} = \prod_{i=1, r} \left[1 - (1 - K_P)^i (1 - K_O)^{(r+1)} \right]^{2^{12i}} \quad (7)$$

$$K_{E2} = \prod_{i=1, r-1} \left[1 - (1 - K_W) (1 - K_O)^{(r+1-i)} \right]^{2^{\binom{m}{r+1} \left[\binom{r+1}{i} - (i+1) \right]}} \quad (8)$$

$$K_{F2} = \prod_{i=1, r} \left[1 - (1 - K_W)^{11i} (1 - K_P)^{12i} (1 - K_O)^{13i} \right]^{2^{14i}} \quad (9)$$

gdzie:

- K_O - wskaźnik gotowości odcinka przewodu z uzbrojeniem (odwodnieniem i odpowietrzeniem) zawartego między sąsiednimi przewiazkami, wyznaczony za pomocą wzoru (2),

- K_w - wskaźnik gotowości węzła połączeniowego, wyznaczony jako iloczyn wskaźników gotowości elementów wchodzących w skład W węzła (kształtki połączeniowej i zasuw odcinających umieszczonych na przewodach i przewiazce),
- K_p - wskaźnik gotowości przewiazki wyznaczony wg wzoru (2),
- m - ogólna liczba przewodów tranzytowych w układzie,
- r - liczba przewodów tzw. "rezerwowych" stanowiących rezerwę obciążoną,
- $l_{11}, l_{21}, l_{31}, l_{41}$ - współczynniki liczbowe zapisane i stosowane do obliczeń niezawodności układów w postaci odpowiednich macierzy. W tabelicy 1 podano je dla układów składających się z 2-5 przewodów tranzytowych

$$\binom{m}{r+1} = \frac{m!}{(r+1)!(m-r-1)!}$$

W wypadku układu jedнопроводового ($m=1$) algorytm obliczania niezawodności opisany wzorem (3) upraszcza się do postaci wzoru:

$$K_1 = (K_0)^{(r'+1)} \cdot K_2 \quad (10)$$

gdzie:

- K_1 - wskaźnik gotowości układu jedнопроводового,
- K_0, K_2 - wskaźnik gotowości odpowiednio odcinka przewodu zawartego między sąsiednimi przewiazkami i zasuwą,
- r' - liczba zasuw przedziałowych.

Natomiast, w wypadku układów wielопроводовых ($m \geq 2$), algorytm obliczeń powinien uwzględniać - w zależności od liczby przewodów " m " i " r " - następujące wskaźniki gotowości:

- przy $m \geq 2$ i $r = 0$

$$K_A \text{ i } K_{B2}$$

- przy $m \geq 2$ i $r = 1$

$$K_A, K_{B2}, K_{C2} \text{ i } K_{D2}$$

a przy $m \geq 3$ i $r \geq 2$ wszystkie występujące we wzorze (3).

Funkcja niezawodności układów (wzór (3)) przedstawia z jednej strony zależność wskaźnika gotowości układu od wskaźników gotowości jego elementów, a z drugiej strony zależność wskaźnika gotowości układu od jego podstawowych parametrów technicznych, takich jak: liczba przewodów tranzytowych i liczba przewiazek. Poz. tym, wprowadzając rezerwę obciążoną (liczbę przewo-

Tablica 1

Zestawienie współczynników liczbowych do obliczeń niezawodności układów z przewiązkami $2 \leq m \leq 5$

m:	2		3			4						5											
r:	1	1	2		1	2		3			1	2		3			4						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Współczynniki liczbowe dla składnika K_{D2}																							
l_{1i} :	1	1	1	2	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	2	3	4			
l_{2i} :	1	4	2	1	10	11	6	3	3	1	22	30	21	18	21	8	4	6	4	1			
Współczynniki liczbowe dla składników K_{F2}																							
l_{1i} :			1			1	1	1	2			1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	3	
l_{2i} :			1			1	1	2	1			1	2	1	2	1	1	2	3	1	2	1	
l_{3i} :			2			2	3	3	2			2	2	3	3	2	4	4	4	3	3	2	
l_{4i} :			2			10	6	2	2			46	2	36	14	11	12	9	2	12	4	4	
f:			1			1	3	3	3			2	2	3	3	3	6	6	6	6	6	6	

dów rezerwowych "r") możliwe jest uwzględnienie związku niezawodności układu z hydraulicznymi parametrami jego pracy (wydajność układu i straty hydrauliczne przepływu), co ma istotne znaczenie w procesie projektowania układów.

W celu ułatwienia obliczeń niezawodności układów przewodów tranzytowych sporządzono schemat blokowy algorytmu przedstawiony na rys. 3. Zgodnie z zamierzeniami, algorytm pozwala na obliczenie niezawodności układów jedno-przewodowych, wieloprzewodowych bez przewiązek oraz wieloprzewodowych z przewiązkami.

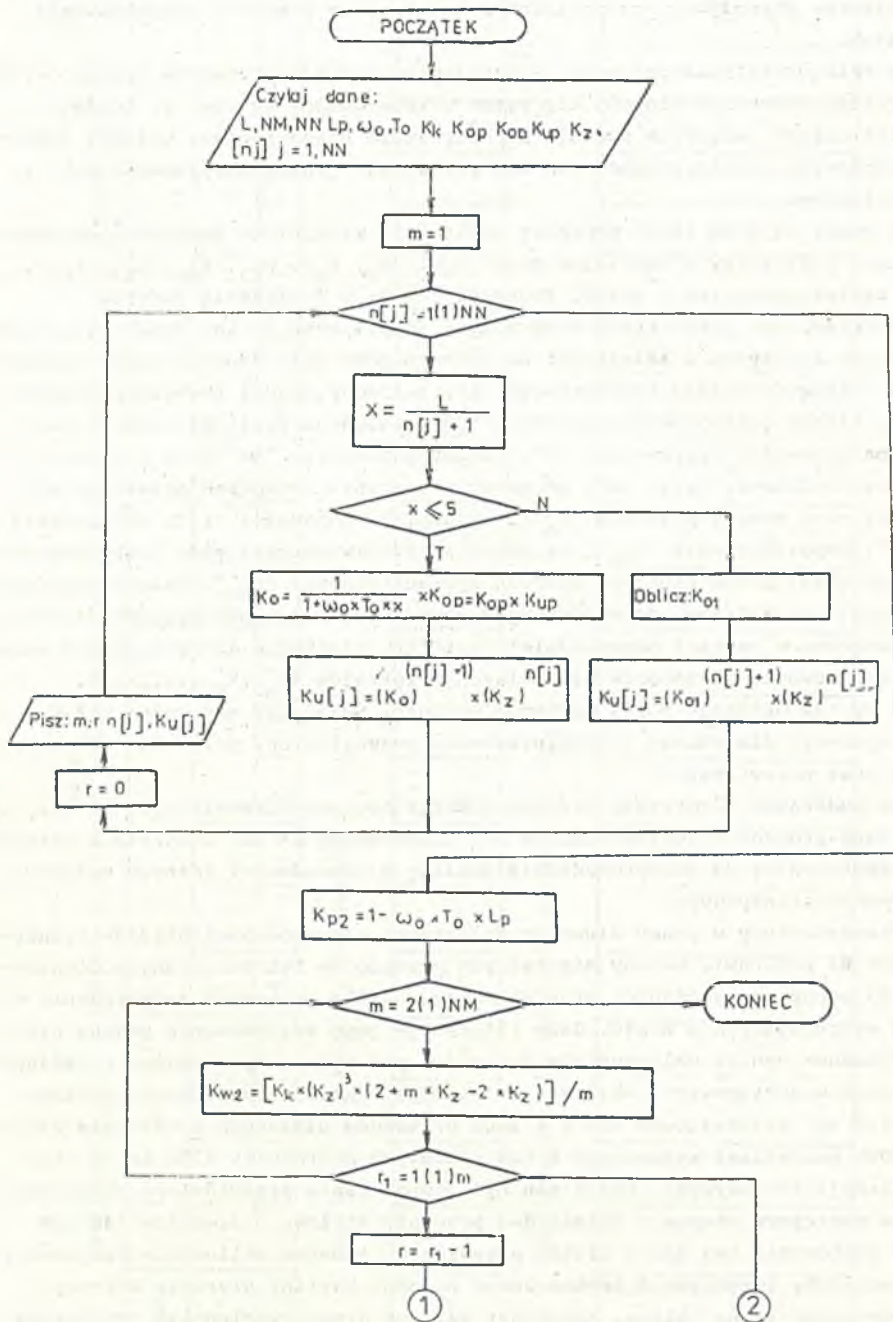
Z uwagi na dużą ilość procedur obliczania wskaźników gotowości poszczególnych podzbiorów minimalnych przekrojów ($K_A, K_{B2}, K_{C2}, K_{D2}, K_{E2}, K_{F2}$), nie zamieszczono ich w pracy. Procedury te są w posiadaniu autorów.

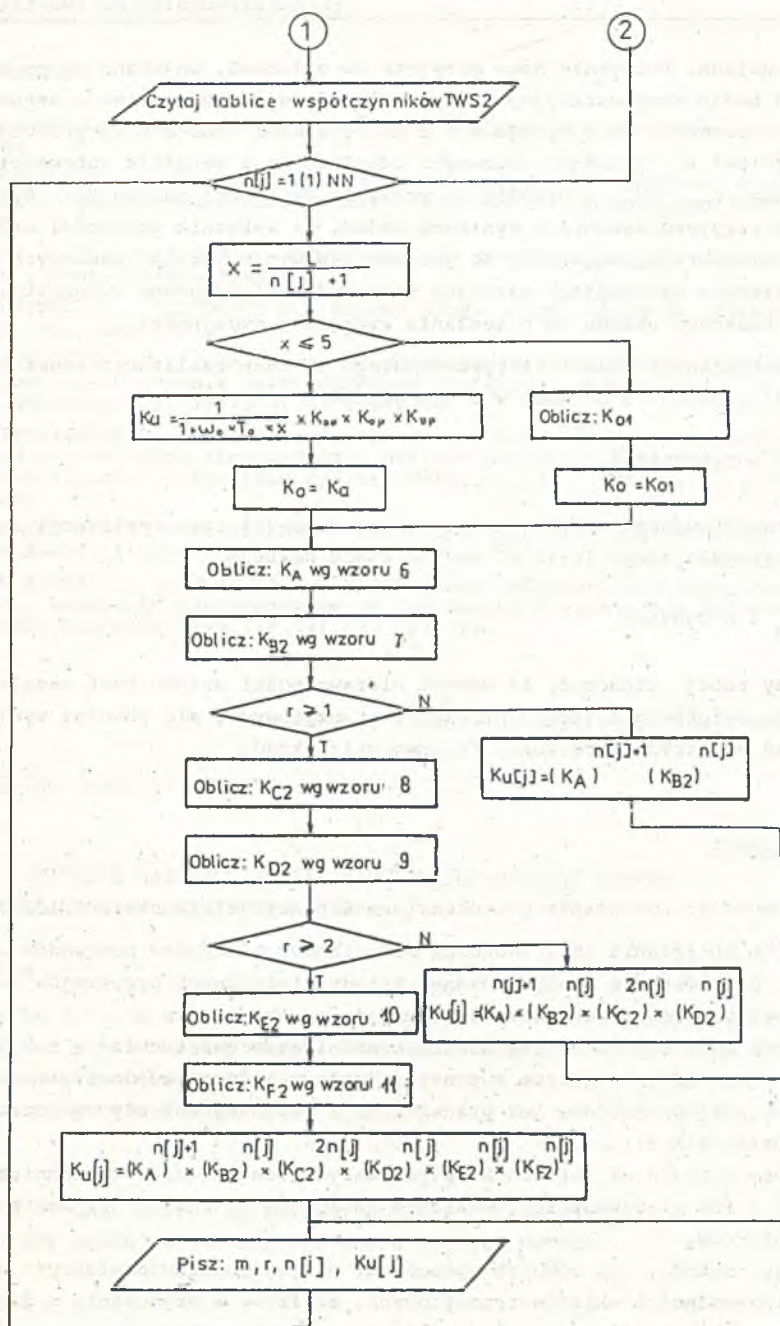
Podstawowymi parametrami wejściowymi do obliczeń niezawodności wg zastosowanego algorytmu w zależności od potrzeb mogą być: długość trasy przesyłu wody - długość układu tranzytowego "L", założony średni rozstaw przewodów " L_p ", liczba przewodów tranzytowych "NM", założona wielkość rezerwy jako liczba przewodów rezerwowych "r", liczba przewiązek "NN" oraz parametry niezawodnościowe, takie jak: parametr strumienia uszkodzeń przewodu " ω ", średni czas odnowy przewodu " T_o " i wskaźniki: gotowości " K_z ", odwodnienia " K_{OD} ", odpowietrzenia " K_{OP} ", urządzenia przeciwuderzeniowego (zabezpieczającego układ przed skutkami uderzeń hydraulicznych) " K_{UD} ". Poza wymienionymi wyżej parametrami, do wyjściowych danych wchodzi współczynnik liczbowe wprowadzone w postaci odpowiedniej macierzy, niezbędne do wyznaczenia wskaźników gotowości podzbiorów minimalnych przekrojów ($K_{A2}, K_{B2}, \dots, K_{F2}$).

W wyniku obliczeń można otrzymać wartości wskaźnika gotowości układu tranzytowego dla różnej liczby przewodów przesyłowych, przewodów rezerwowych oraz przewiązek.

Na podstawie algorytmu, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3, napisano program w języku FORTRAN IV, uruchomiony na emc CYBER-73 i następnie zastosowany do przeprowadzania analizy niezawodności różnych układów przewodów tranzytowych.

Przedstawiony w pracy algorytm obliczania niezawodności układów tranzytowych na podstawie metody minimalnych przekrojów był stosowany wielokrotnie do oceny niezawodności przesyłu wody w kilku systemach zaopatrzenia w wodę występujących w kraju. Jako ilustrację jego zastosowania podano niżej przykładowo wyniki obliczeń niezawodności przesyłu wody w jednym z badanych systemów wodociągowych. Obliczenia dotyczyły układu tranzytowego o długości 5,5 km, składającego się z trzech przewodów ułożonych w odstępach 2-5 m i dwóch przewiązek wykonanych z rur stalowych o średnicy 1200 mm (I etap realizacji inwestycji). Układ ten był jednocześnie przewidziany do rozbudowy na następnym etapie o dalsze dwa przewody stalowe o średnicy 1400 mm przy zachowaniu tej samej liczby przewiązek. A zatem obliczenia obejmowały dwa warianty rozwiązania technicznego układu. Wariant pierwszy dotyczył istniejącego stanu układu, natomiast wariant drugi uwzględniał projektowa-





Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu obliczania niezawodności układów przewodów tranzytowych

Fig. 3. Block schema of computational reliability algorithm for transit pipeline system

ny stan układu. Pozostałe dane przyjęte do obliczeń, uzyskane na podstawie własnych badań eksploatacyjnych, wynosiły odpowiednio: parametr strumienia uszkodzeń przewodu $\omega = 0,0323 \text{ s}^{-1} \times \text{km}^{-1}$; średni czas odnowy przewodu $T_O = 0,001849 \text{ s}$; wskaźnik gotowości odwodnienia i wskaźnik gotowości odpowietrzenia $K_{OD} = K_{OP} = 0,99950$ i wskaźnik gotowości zasowy $K_Z = 0,99500$. Poza tym przyjęto zgodnie z wynikami badań, iż wskaźnik gotowości urządzenia przeciwuderzeniowego dąży do jedności. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano następujące wartości niezawodności wyrażone wskaźnikiem gotowości badanego układu do przesłania wymaganej wydajności:

- dla istniejącego układu trzyprzewodowego (I etap realizacji inwestycji) przesyłającego 4-5 m³ wody w ciągu sekundy

$$K_u = 0,9972575$$

- dla projektowanego układu pięcioprzewodowego (II etap realizacji inwestycji) przesyłającego 10-12 m³ wody w ciągu sekundy

$$K_u = 0,9997952$$

Należy tutaj zaznaczyć, iż wzrost niezawodności układu jest rezultatem nie tylko zwiększenia liczby przewodów tranzytowych, ale również wynikających stąd większych możliwości rezerwowania układu.

3. Wnioski

Podsumowując rozważania przedstawione w pracy należy stwierdzić, że:

- algorytm obliczania niezawodności wodociągowych układów przewodów tranzytowych na podstawie zmodyfikowanej metody minimalnych przekrojów uwzględnia rzeczywistą złożoną strukturę układu,
- algorytm może być stosowany do obliczeń niezawodności układów tranzytowych o dowolnej strukturze - prostej (układy jednoprzewodowe), mieszanej (układy wieloprzewodowe bez przewiązek) i złożonej (układy wieloprzewodowe z przewiązkami),
- algorytm pozwala na ustalenie wpływu wszystkich parametrów technicznych układu i ich niezawodności działania na poziom niezawodności dostaw wody do odbiorców,
- przyjęta metoda, jak również opracowany na jej podstawie algorytm obliczania niezawodności układów tranzytowych, są łatwe w stosowaniu i dają możliwości ich praktycznego wykorzystania w odniesieniu zarówno do układów istniejących, jak i projektowanych.

LITERATURA

- [1] ABRAMOW N.N.: Nadiożnost' sistem wodosnabżenija. Strojizdat. Moskwa 1984.
- [2] ERENBURG E.S.: Pokazateli nadiożnosti wodowodow z pieremyczkami. Sb. trudow "Woprosy nadiożnosti sistem wodosnabżenija", Moskwa 1978, s. 45-48.
- [3] ILIN Ju.A.: Nadiożnost wodoprowodnych sooruzenij i oborudowanija. Strojizdat, Moskwa 1985.
- [4] KARPIŃSKI J., FIRKOWICZ S.: Zasady profilaktyki obiektów technicznych. PWN, Warszawa 1981.
- [5] KWIETNIEWSKI M.: Model zadania projektowego układów wodociągowych przewodów tranzytowych z uwzględnieniem kryterium niezawodności. ZN Pol. Śl., S. Automatyka z. 79/1985, s. 219-226.
- [6] KWIETNIEWSKI M., ROMAN M.: Możliwości zastosowania metod analizy strukturalnej do oceny niezawodności układów przewodów tranzytowych o strukturze złożonej". Archiwum Hydrotechniki, t. 32, 1985 r., z. 3/4 s. 407-430.
- [7] PN-77/N-04005. Niezawodność w technice. Wskaźniki niezawodności. Nazwy, określenia i symbole.
- [8] WIECZYSTY A., LUBOWIECKA T.: Niezawodność wieloprzewodowego przesyłu wody. Materiały konferencyjne na Seminarium Projektantów Wodociągów. PZITS, Zakopane 1983, nr 441, s. 223-224.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Janusz Piotrowski

Wpłynęło do Redakcji 1.08.87

АЛГОРИТМ РАСЧЁТА НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИТНЫХ ВОДСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ

Р е з ю м е

С целью расчёта надёжности проводной транзитной системы учтена их действительная и сложная структура. Надёжность выражена показателем готовности. Представлена функция надёжности транзитных систем и разработан алгоритм расчёта надёжности совместно со структурой.

ALGORITHM OF CALCULATION OF WATER TRANSIT PIPELINE SYSTEMS
RELIABILITY BASED ON THE MINIMAL CROSS-SECTION METHOD

S u m m a r y

The transit pipeline systems with a real and compound structure are considered in order to calculate their reliability. The reliability of transit pipeline systems is given by availability factor. The reliability function of transit pipeline systems and algorithm of their reliability calculation with block scheme elaborated on the base of this function are presented.