

Marian KWIETNIEWSKI

Instytut Zaopatrzenia w Wodę  
i Budownictwa Wodnego  
Politechnika Warszawska

MODEL ZADANIA PROJEKTOWEGO UKŁADÓW WODOCIĄGOWYCH PRZEWODÓW TRANZYTOWYCH  
Z UWZGLĘDNIENIEM KRYTERIUM NIEZAWODNOŚCI

Streszczenie . Dokonano przeglądu dostępnych prac dotyczących tego zagadnienia. Sformułowano model zadania projektowego z uwzględnieniem kryterium niezawodności wraz z założeniami i przygotowaniem danych. Omówiono kryterium niezawodności oraz przedstawiono ogólną postać funkcji celu .

## 1. WSTĘP

Układ przewodów tranzytowych współpracujący w strukturze szeregowej z innymi elementami systemu przesyłu wody jest najbardziej podatny na uszkodzenia, a jednocześnie wpływa w najbardziej istotny sposób na pewność dostawy wody. W praktyce występują najczęściej układy jedнопrzewodowe lub układy dwuprzewodowe. W układach dwuprzewodowych mogą być stosowane oddzielne nie połączone ze sobą równoległe rurociągi lub też przewody połączone poprzecznymi przewiązkami. W planach projektowych związanych z rozbudową systemu zaopatrzenia w wodę rozważa się również układy trójprzewodowe, a niekiedy nawet cztero- i pięcioprzewodowe.

Zadania związane z projektowaniem układów przewodów tranzytowych formułowane były w różnym zakresie i różnych postaciach już od dawna. Dominują w nich zadania zmierzające do doboru ekonomicznych średnic przewodów. Można wymienić wiele prac z tego zakresu, spośród których na szczególną uwagę zasługują jedne z wcześniejszych [9,8] oraz późniejsze prace naukowo-badawcze [24,20,7,21,10], w których podaje się ponadto formuły określające ekonomiczne natężenia przepływu. Również ostatnie prace [11,5], zasługują na uwagę pod tym względem. Z tym że praca [5] dotyczy optymalizacji sieci wodociągowej i jej elementów. Można jednak, sposób przeprowadzonych tam rozważań przenieść także na przewody tranzytowe. We wszystkich wymienionych opracowaniach punktem wyjścia do wyznaczenia ekonomicznych średnic lub przepływów była funkcja kosztów /nakłady inwestycyjne wraz z kosztami eksploatacji / lub też funkcja wyrażona za pomocą wskaźnika ekonomicznej

efektywności. W wyniku minimalizacji tych funkcji otrzymano ogólne wzory na określenie poszukiwanych wielkości.

Inny typ zadania, jakim się zajmowano w ostatnich latach, dotyczy wyznaczenia optymalnych pod względem ekonomicznym wielkości: średnicy i liczby przewodów [6, 18]. Zastosowana w tym celu analiza funkcji kosztów wykazała jednak, iż niemożliwe jest wyznaczenie na bazie tej funkcji dwóch optymalnych parametrów /liczby przewodów i ich średnicy/ jednocześnie. Wniosek ten potwierdzają również wyniki analizy techniczno-ekonomicznej różnych układów przewodów tranzytowych przedstawione w pracach [14, 13], w których uwzględniono również wpływ przewiązek na koszty układów.

Określenie rozstawu przewiązek w układach o znanej liczbie przewodów tranzytowych stanowi treść kolejnego rodzaju zadania projektowego przedstawionego w pracach [1, 3, 17]. W celu doboru rozstawu przewiązek stosuje się obliczenia hydrauliczne ukierunkowane na zapewnienie odpowiednich, przepustowości i wysokości ciśnienia końcowego układu przy wyłączeniu z pracy jednego odcinka przewodu.

Można mówić również o niezawodnościowych obliczeniach układów przewodów tranzytowych [2, 23], które jednakże zmierzają do określenia funkcyjnych zależności niezawodności układu od liczby i niezawodności jego elementów. Nie uwzględnia się jednak przy tym powiązania analizy niezawodności z wyznaczeniem optymalnych parametrów układu.

Przedstawione wyżej w skrócie zadania projektowe charakteryzują się ograniczonym zakresem stosowania, gdyż każde z nich pozwala na wyznaczenie jednego parametru układu. Wynika to przede wszystkim stąd, iż kryteria stosowane przy ich rozwiązywaniu są jednostronne. Jak wynika natomiast z prac [6, 18, 14, 13], w celu optymalnego wyznaczenia kilku parametrów układu niezbędne jest uwzględnienie nie tylko minimalizacji funkcji kosztów, ale również kryterium niezawodności.

Przedmiotem pracy jest zatem model zadania projektowego uwzględniającego oprócz występujących dotychczas kryteriów ekonomicznych i technicznych również kryterium niezawodności.

Zakres pracy obejmuje sformułowanie modelu wraz z założeniami i przygotowaniem danych oraz przedstawienie kryterium niezawodności i ogólnych zasad rozwiązania zadania projektowego.

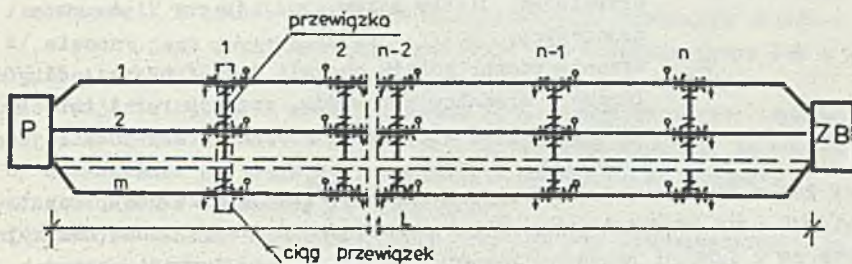
## 2. MODEL ZADANIA PROJEKTOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM KRYTERIUM NIEZAWODNOŚCI

Model dotyczy następujących rodzajów układów:

- a/ jednoprzewodowych,
- b/ wieloprzewodowych, w których przewody nie są ze sobą połączone,
- c/ wieloprzewodowych, w których przewody połączone są przewiązkami.

Przyjmuje się, że we wszystkich tych rodzajach układów każdy odcinek przewodu zawarty między przewiązkami lub zasuwami przedziałowymi zaopatrzonej jest w odwodnienie i odpowietrzenie. Ogólnie biorąc, w układach występują następujące elementy: odcinek przewodu zawarty między zasuwami

przedziałowymi lub przewiązkami, przewiązka, zasawa odcinająca, kształtka połączeniowa, odwodnienie i odpowietrzenie. Schemat układu wieloprzewodowego z przewiązkami, jako uogólnienie rozważanych układów przedstawiono na rys.1 .



Rys.1. Schemat układu przewodów tranzytowych z przewiązkami;  
P-pompownia, ZB-zbiornik,  $\Delta$  zasawa,  $\downarrow$  odwodnienie  
 $\uparrow$  odpowietrzenie .

Pod pojęciem przewiązek rozumie się tutaj odcinek poprzecznego przewodu łączący sąsiednie dwa równoległe rurociągi. Zakłada się, że w wypadku większej liczby równoległych przewodów przewiązki rozmieszczone są w tych samych przekrojach tworzących ciąg przewiązek .

Przed sformułowaniem modelu zadania projektowego należy określić cel działania układu. Dla analizowanych układów celem tym jest przesłanie żądanej ilości wody  $/Q/$  z punktu zasilania do punktu odbioru i zapewnienie w tym punkcie wymaganej wysokości ciśnienia  $/H_k/$ . Jednocześnie, cel ten ma być osiągnięty z niezawodnością nie mniejszą niż zadany poziom niezawodności  $/R_z/$  .

Model zadania projektowego można sformułować w następujący sposób :

"Wyznaczyć optymalne pod względem ekonomicznym wielkości : liczbę przewodów i ich średnice, rozstaw przewiązek i ich średnice oraz wysokość ciśnienia w punkcie zasilania dla zadanego poziomu niezawodności dostawy wody i wymaganego ciśnienia w punkcie odbioru przy zadanych : długości i rozstawie przewodów tranzytowych" .

Zadanie to jest zadaniem optymalizacyjnym, w którym do określenia funkcji celu zastosowano wskaźnik ekonomicznej efektywności [19]. Przy założeniu, iż wielkość efektu użytkowego jest wartością stałą z punktu widzenia prowadzonej analizy i uwzględnieniu w ramach kosztów eksploatacji rocznych kosztów energii elektrycznej zużywanej na tłoczenie wody, funkcja ta będzie mieć następującą ogólną postać :

$$F_c = I \cdot z \cdot /r+s/ + K_e \longrightarrow \min.$$

- gdzie :  $F_c$  - globalne nakłady i koszty układu,  
 $Z$  - współczynnik zamrożenia,  
 $r$  - stopa dyskontowa,  
 $s$  - stawka amortyzacyjna,  
 $I$  - nakłady inwestycyjne jako funkcja : długości, liczby i średnicy przewodów, rozstawu, długości i średnicy przewiązek, liczby zasuw, rodzaju rur i warunków gruntowych,  
 $K_e$  - średnie roczne koszty energii jako funkcja : długości, liczby i średnicy przewodów, rodzaju rur i ich chropowatości, wydajności układu, czasu pracy pomp i jednostkowej ceny energii .

Jak łatwo zauważyć, poszukiwane parametry /liczba przewodów, rozstaw przewiązek oraz średnice przewodów i przewiązek / jako zmienne decyzyjne zawarte są w funkcji nakładów inwestycyjnych  $I$  i w funkcji rocznych kosztów energii  $K_e$  /.

Przy rozwiązywaniu zadania projektowego uwzględniono następujące ograniczenia :

### 1. Ograniczenie dotyczące niezawodności

$$R_u \geq R_z \quad \text{lub} \quad R_u - R_z \geq 0$$

gdzie :  $R_u$  - niezawodność projektowanego układu,  
 $R_z$  - zadany poziom niezawodności,

jako kryterium niezawodności.

Funkcja określająca niezawodność projektowanego układu  $R_u$  zostanie omówiona w dalszej części pracy.

### 2. Ograniczenie dotyczące ciśnienia w punkcie zasilania

$$H_p \leq H_{pmax}.$$

gdzie :  $H_p$  - wysokość ciśnienia w punkcie zasilania układu,  
 $H_{pmax}$  - maksymalna dyspozycyjna wysokość ciśnienia w punkcie zasilania układu .

Ograniczenie to wynika z maksymalnie dopuszczalnego ciśnienia w przewodach lub też z określonych warunków pracy pomp. Na wysokość ciśnienia w punkcie zasilania  $H_p$  składają się : wymagana wysokość ciśnienia w punkcie odbioru  $H_k$ , różnica rzędnych punktów, końca i początku układu  $\Delta Z$  oraz wysokość liniowych strat ciśnienia  $\Delta h$ , tj.

$$H_p = H_k + \Delta Z + \Delta h$$

Miejscowe straty ciśnienia pominięto jako bardzo małe w porównaniu ze stratami liniowymi.

### 3. Ograniczenie dotyczące zakresu średnic produkowanych rur.

Do rozwiązywania zadania optymalizacyjnego zastosowano metodę przeglądu

### Model zadania projektowego ...

wszystkich wariantów układu różniących się liczbą przewodów, rozstawem przewiązek oraz średnicą przewodów i przewiązek, którą dokładnie omówiono w pracy [16].

Niezawodność projektowanego układu  $/R_u/$  jest funkcją niezawodności jego elementów i parametrów technicznych opisujących strukturę układu. W celu jej określenia przyjęto następujące założenia odnoszące się do stanów pracy /sprawności/ i stanów uszkodzeń /niesprawności/ elementów układu :

- a/ element jest dwustanowy, tzn. znajduje się w stanie pracy lub w stanie uszkodzenia,
- b/ przejście ze stanu pracy do stanu uszkodzenia następuje skokowo,
- c/ uszkodzenia elementów są trwałe i uszkodzone elementy są odnawialne,
- d/ uszkodzenia są jawne, tzn. powstają w czasie pracy elementu,
- e/ uszkodzenia elementów są niezależne,
- f/ kolejne odcinki czasu poprawnej pracy między uszkodzeniami mają jednakowe rozkłady prawdopodobieństwa ,
- g/ czasy trwania kolejnych napraw mają jednakowe rozkłady prawdopodobieństwa,
- h/ zmienne losowe czasów poprawnej pracy między uszkodzeniami oraz zmienne losowe czasów napraw są zmiennymi niezależnymi .

Uwzględniając powyższe założenia oraz wykorzystując informacje zawarte w normie [22] i w pracy [12], przyjęto jako miarę niezawodności układów i ich elementów współczynnik gotowości zdefiniowany jako prawdopodobieństwo tego, że obiekt będzie w stanie sprawności w dowolnej chwili czasu. Przy czym stanem sprawności układu przyjęto określać stan, w którym układ będzie mógł przesłać żądany wydatek.

Sposób wyznaczenia wraz z dokładnym opisem funkcji niezawodności układów przedstawiono w pracach [15,4]. Z uwagi na rozbudowaną postać tej funkcji poniżej podano jej ogólny zapis wraz z opisem zmiennych :

$$K_{gu} = f(K_{g1}, K_{g2}, \dots, K_{gs}, L, L_p, m, n, w, r_z)$$

- gdzie :
- $K_{gu}$  - współczynnik gotowości układu,
  - $K_{g1}, K_{g2}, \dots, K_{gs}$  - współczynniki gotowości poszczególnych elementów układu ,
  - $s$  - liczba elementów układu,
  - $L$  - długość układu,
  - $L_p$  - rozstaw przewodów lub długość przewiązki,
  - $m$  - ogólna liczba przewodów w układzie ,
  - $n$  - liczba przewiązek /ciągów przewiązek/ lub liczba zasuw umieszczonych na jednym przewodzie w układach bez przewiązek,
  - $w$  - liczba przewodów tzw. roboczych gwarantujących przepływ żądanej ilości wody,
  - $r_z$  - liczba przewodów tzw. rezerwowych.

W rozważanych układach przyjęto, iż każdy przewód może mieć rezerwę przepustowości wynikającą z możliwości zwiększenia strat przepływu. Stąd

właśnie wywodzą się parametry  $w$  i  $r_z$ , których suma składa się na ogólną liczbę przewodów tranzytowych w układzie  $/m/$ .

W celu obliczenia funkcji niezawodności dla różnych modeli układów sporządzono odpowiednie algorytmy i opracowano programy w języku FORTRAN IV, które uruchomiono na komputerze CDC 3170.

Istotnym zagadnieniem w modelu zadania projektowego jest przygotowanie odpowiednich danych.

Podstawową grupę stanowią dane technologiczne, do których zalicza się:

- zadaną długość trasy przesyłu wody /długość układu/,  $L$ ,
- średni rozstaw przewodów  $L_p$ ,
- wymagany wydatek układu  $Q$ ,
- wymaganą wysokość ciśnienia w punkcie odbioru  $H_k$ ,
- maksymalną dyspozycyjną wysokość ciśnienia w punkcie zasilania  $H_{pmax}$ ,
- zbiór średnic produkowanych rur  $\{d_i\} \quad i = \overline{1, ND}$ ,
- sprawność zespołów pompowych  $\eta$ .

Następny rodzaj danych to dane niezawodnościowe, takie jak:

- zadany poziom współczynnika gotowości układu  $K_{gz}$ ,
- współczynniki gotowości elementów układu.

Przy czym współczynniki gotowości takich elementów, jak: zasuw, odwodnienie, odpowietrzenie i kształtka połączeniowa, należy traktować jako wielkości stałe, niezmiennie w czasie projektowania. Natomiast współczynnik gotowości odcinka przewodu jako elementu zmiennego o długości uzależnionej od liczby przewiązek w układzie jest określany w trakcie realizacji zadania wg wzoru:

$$K_{go}(l) = \frac{1}{1 + \omega_o \cdot T_o \cdot l} \quad (1)$$

gdzie:  $K_{go}(l)$  - współczynnik gotowości odcinka przewodu w funkcji jego długości,

$\omega_o$  - parametr natrumienia uszkodzeń,  $s^{-1} \cdot km^{-1}$ ,

$T_o$  - średni czas odnowy przewodu,

$l$  - długość odcinka przewodu wyrażona w km i określona ze wzoru:

$$l = \frac{L}{n + 1} \quad (2)$$

W związku z tym, jako dane wejściowe należy również uwzględnić parametry  $\omega_o$  i  $T_o$ .

Wzór /1/ wykorzystano także do określenia współczynnika gotowości przewiązki przyjmując w miejsce  $l$  jej długość  $L_p$ .

Poza tym, należy uwzględnić jeszcze dane związane z ekonomiczną oceną układów, jak na przykład: stawka amortyzacji, stopa dyskontowa, jednostkowa cena energii, jednostkowe koszty przewodów i zasuw itp.

Dla przedstawionego tutaj modelu zadania projektowego sporządzono

algorytm rozwiązania w postaci schematu blokowego, który posłużył do opracowania programu w języku FORTRAN IV uruchomionego na komputerze CDC 3170.

### 3. WNIOSKI

Uwzględnienie kryterium niezawodności w projektowaniu układów przewodów tranzytowych stwarza szersze podstawy do wyznaczenia poszukiwanych parametrów technologicznych oraz doboru struktury układu. Kryterium niezawodności może być wyrażone w różny sposób. W pracy, do jego określenia zastosowano jeden z kompleksowych wskaźników niezawodności, tj. współczynnik gotowości.

Przedstawiony model zadania projektowego układów przewodów tranzytowych z uwzględnieniem kryterium niezawodności nie jest jeszcze pełny i wymaga uzupełnień oraz dodatkowych badań i analiz, np. w zakresie sposobu wyrażenia niezawodności układów.

### LITERATURA

- [1] ABRAMOW H.H. : Wodosnabżeniye . Strojizdat. Moskwa 1974 .
- [2] ABRAMOW H.H. : Nadiożnost sistem wodosnabżeniya . Strojizdat. Moskwa 1979 .
- [3] ARONOW C.H. : Transportirovaniye i chranieniye wody . Izd. Lit. po Stroitelstvu. Moskwa 1964 .
- [4] BIEDUGNIS S., KWIETNIEWSKI M., ROMAN M. : Model matematyczny niezawodności układów pompowych do tranzytu wody dla celów projektowania. PR-7.01.02.04. II etap. Maszynopis. Politechnika Warszawska. W-wa 1982 .
- [5] BYLKA H. : Dekompozycja i koordynacja w projektowaniu optymalnych układów rozprzodających wodę. Materiały konferencji pt. "Problemy optymalizacji systemów wodn.-kanaliz." Łódź 1980 .
- [6] CHORUŻIJ P.D. : Techniko-ekonomičeskoj razsčot magistralnych wodowodow. Stroitelstwo i Architektura. JWUZ 1/1973 .
- [7] CHOUR V. : Hospodarny navrh svetlosti zavlakoweho potrubí. Voda 10/1962 .
- [8] DOHLAUS D. : Die Berechnung des wirtschaftlichen Rohrdurchmesser für Druckrohrleitungen von Wasserpumpwerken. Das Gas- und Wasserfach 7/1931 .
- [9] FORCHEIMER P. : Die Verjüngung der Rohrweite bei Hochdruckleitungen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 12/1936 .
- [10] HEIDRICH Z., KLOSS H., ROMAN M. : Podstawy ekonomiczne obliczeń tranzytowych przewodów wodociągowych. Materiały konferencyjne pt. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi. Poznań 1967 .
- [11] HOFFMAN H. : Dobór optymalnych średnic przewodów tłocznych doprowadzających wodę w oparciu o zasady badań ekonomicznej efektywności inwestycji. Materiały konf. pt. „Zagadnienia zaopatrzenia w wodę miast i wsi. Poznań 1960 .

- [12] KŁOSS H., ROMAN M. : Zagadnienie wyboru wskaźników niezawodności systemów wodociagowych i kanalizacyjnych. GWTS 10/1977 i 11/1977 .
- [13] KWIECINIEWSKI M. : Zagadnienie ekonomicznej oceny efektywności układów tranzytowych przewodów tłocznych. Materiały konferencyjne pt. „Intensyfikacja zaopatrzenia w wodę miast i wsi”. Katowice 1981 .
- [14] KWIECINIEWSKI M., ROMAN M. : Ekonomiczna efektywność różnych układów wodociagowych tranzytowych przewodów tłocznych. Materiały konferencyjne pt. „Problemy inżynierii środowiska na tle potrzeb Łódzkiego Województwa Miejskiego”. Łódź 1979 .
- [15] KWIECINIEWSKI M., ROMAN M. : Model matematyczny niezawodności układu pompowego do tranzytu wody dla potrzeb istniejących obiektów. PR-7.01.02.04. I etap. Maszynopis. Politechnika Warszawska, W-wa 1981 .
- [16] KWIECINIEWSKI M., ROMAN M. : Model matematyczny układu pompowego tranzytu wody do projektowania z uwzględnieniem kryteriów, ekonomicznego i niezawodnościowego. PR-7.01.02.04. IV etap. Maszynopis. Warszawa 1984 .
- [17] MIELCARZEWICZ E.W. : Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę „Arkady”, Warszawa 1977 .
- [18] NIEBOLSIN G.P. : Ob optimalnom czisle nitok w wodowodach. Stroitel'stvo i Architektura. JWUZ 1/1976.
- [19] OCENA ekonomicznej efektywności inwestycji i innych zamierzeń rozwojowych. Zbiór przepisów. P.W.E. Warszawa 1975 .
- [20] PETROZOLIN W. : Projektowanie sieci wodociagowych „Arkady”, Warszawa 1973.
- [21] ROGANY A. : Determinareu diametrului economic al conductelor. Hidrotehnica Gospodariea Apelor Meteorologia 4/1965 .
- [22] PN-77/N-04005 Niezawodność w technice. Nazwy, określenia i symbole.
- [23] WIECZYSTY A., LUBOWIECKA T. : Niezawodność wieloprzewodowego przesyłu wody. Materiały XII Seminarium Szkoleniowego Projektantów Wodociagów. Zakopane 1983 .

A DESIGN MODEL OF WATER TRANSIT PIPELINE SYSTEMS  
USING CRITERION OF RELIABILITY

S u m m a r y

Review of accesible elaborations relevent to this problem has been given. A design model using criterion of reliability together with principles and preparation of data have been determined. The criterion of reliability has been discussed and a general from of an objective function has been presented.

МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТРАНЗИТНЫХ ПРОВОДОВ С УЧЕТОМ  
КРИТЕРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Р е з ю м е

В статье дан обзор имеющихся работ , относящихся к этой теме. Представлена модель задачи проектирования с учётом надёжности. Описаны критерии надёжности и представлена в общем виде функция цели.