

dr inż. Robert Pilch, prof. AGH Jan Szybka

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: pilch@agh.edu.pl, szybja@agh.edu.pl

mgr inż. Anna Tuszyńska,

Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska
Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska
Ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Zastosowanie metod faktoryzacji oraz symulacji czasowo-przestrzennej do oceny niezawodności sieci wodociągowych

Słowa kluczowe: niezawodność układów sieciowych, sieć wodociągowa, algorytm faktoryzacji, symulacja czasowo-przestrzenna

Streszczenie: W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia niezawodności sieci wodociągowych przy wykorzystaniu algorytmu faktoryzacji. Jest to metoda oparta na teorii grafów i ich redukcji, umożliwiającą obliczenie niezawodności układu o określonej strukturze połączeń między elementami ale bez wyznaczania jego struktury niezawodnościowej. Dla wybranej sieci wyznaczono wpływ uszkodzenia poszczególnych odcinków rurociągów na jej niezawodność. W sieciach wodociągowych szczególnie ważne jest zapewnienie odpowiednich parametrów dostarczanej wody. Za pomocą symulacji czasowo-przestrzennej określono wartości wskaźnika warunków poboru wody WWPW w całej analizowanej sieci oraz jego zmiany, w efekcie uszkodzenia wytypowanych odcinków rurociągów. Przedstawione metody faktoryzacji i symulacja czasowo-przestrzenna, do wyznaczenia wartości wskaźnika WWPW, wzajemnie się uzupełniają w ocenie niezawodności. Pozwalają zwiększyć wiarygodność oceny niezawodności i mogą być wykorzystywane w prowadzeniu racjonalnej eksploatacji sieci wodociągowych.

1. Wstęp

Niezawodność w sensie opisowym można określić jako miarę zaufania, którą obdarzamy interesującą nas osobę lub obiekt techniczny. Rozwój teorii niezawodności w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat doprowadził do opracowania wielu metod oceny niezawodności, znajdujących zastosowanie w rozwiązywaniu szerokiej gamy problemów [1,6,7,11]. Przedstawiane rozwiązania dotyczą zarówno oceny niezawodności i ryzyka eksploatacji sieci wodociągowych jak i sposobów poszukiwania optymalnych rozwiązań w zakresie wprowadzania ekonomicznie uzasadnionej

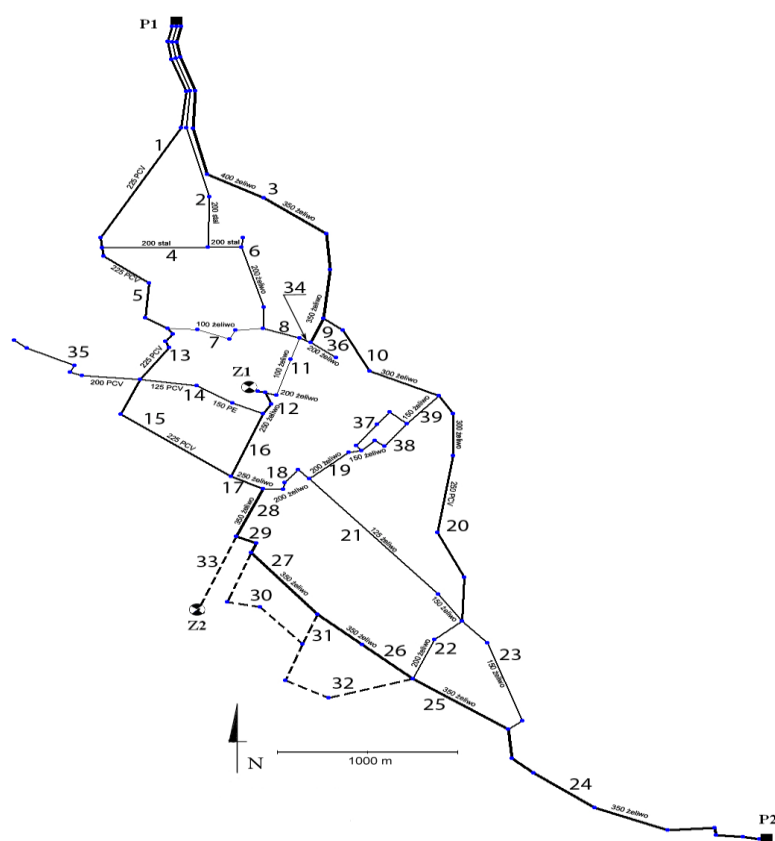
nadmiarowości w strukturach sieci [1,7,11,14,18]. Istotnym aspektem jest również zapewnienie odbiorcom dostaw odpowiedniej ilości wody, spełniającej wymagania jakościowe [6,13]. Od lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia w Polsce problematykę niezawodności wodociągów i kanalizacji rozwiązywano równolegle w Politechnice Krakowskiej i Warszawskiej [15]. Uzyskano szereg ciekawych rozwiązań, które z powodzeniem zostały wprowadzone do praktycznej kontroli dostaw wody do odbiorców [2,3].

W artykule przedstawiono zastosowanie metody faktoryzacji do szacowania niezawodności wodociągów jako infrastruktur krytycznych, w celu wytypowania miejsc w sieci, których uszkodzenie stanowi zagrożenie dla zaopatrzenia odbiorców w wodę. Dla tych punktów wyznaczano wskaźnik warunków poboru wody WPPW [3], istotny w ocenie zaopatrzenia w wodę i przeprowadzono analizę uzyskanych wyników pod kątem wytypowania tych odcinków, których uszkodzenie w sposób istotny wpływa na niezawodność sieci.

Analizę przeprowadzono na wybranym fragmencie sieci wodociągowej eksploatowanej w warunkach rzeczywistych.

2. Charakterystyka wybranej sieci wodociągowej

Analizowana sieć jest układem rurociągów tranzytowych, magistralnych i rozdzielczych w zakresie średnic 100 [mm] – 400 [mm]. W opracowaniu pominięto przyłącza i rurociągi o średnicach mniejszych niż 100 [mm]. Nie wpływają one bowiem w sposób znaczący na funkcjonowanie i niezawodność całego systemu.



Rys. 1. Struktura połączeń sieci wodociągowej

Większość rurociągów tworzy zamknięte pierścienie, lecz obecność rozgałęzionych końcówek sprawia, iż sieć można określić jako pierścieniowo-rozgałęzioną. Znaczna liczba zamkniętych pierścieni dobrze wpływa na niezawodność działania tej sieci, gdyż w przypadku awarii jednego z rurociągów, woda do odbiorcy może zostać dostarczona inną drogą. Elementy mające największy wpływ na funkcjonowanie całego systemu to pompownie wraz z rurociągami tłocznymi oraz zbiorniki. Układ źródeł zasilania, jakimi są pompownie, jest tutaj korzystny – usytuowanie ich po przeciwległych stronach tej wydłużonej sieci, powoduje lepsze funkcjonowanie systemu, wyrównanie ciśnień i wysoki poziom niezawodności.

Sieć zaopatruje w wodę około 40 000 mieszkańców o średnim zapotrzebowaniu na wodę wynoszącym około 10000 [m³/d]. Odbiorcy zlokalizowani są na wysokościach wahających się w granicach 283,5 [m n.p.m.] – 320 [m n.p.m.]. Najwyżej położone są tereny w centrum, wokół istniejącego zbiornika Z1 oraz w południowo-zachodniej części miasta w okolicy zbiornika Z2.

Pompownia na północy (P1) usytuowana jest na wysokości 293 [m n.p.m.], pracuje w zakresie ciśnienia 4,2 [MPa] – 6,1 [MPa]. Woda do miasta dostarczana jest 3 równolegle biegnącymi rurociągami tranzytowymi o średnicach: 200 [mm], 225 [mm] i 400 [mm]. W przypadku awarii któregoś z rurociągów 2 pozostałe przejmują ciężar dostawy wody do miasta. Natomiast pompownia na południu (P2) położona jest 6 [m] wyżej, stąd jej parametry tłoczenia są niższe: 3,5 [MPa] – 5,1 [MPa]. Z pompowni P2 woda dostarczana jest do miasta tylko jednym rurociągiem tranzytowym. Istnieje więc niebezpieczeństwo, iż w przypadku awarii tego rurociągu, pompownia P2 zostanie całkowicie wyłączona z eksploatacji, co może spowodować niedostateczną wartość ciśnienia w sieci i spadek komfortu poboru wody dla użytkowników. Oznacza to, iż odbiorcy zlokalizowani najwyżej mogą być pozbawieni możliwości poboru wody z sieci. Lokalizacja zbiornika Z1 w centrum miasta również jest bardzo korzystna, gdyż zaopatruje on dodatkowo tereny o większej gęstości zaludnienia i większym zapotrzebowaniu, położone dalej od pompowni, a więc również stabilizuje ciśnienie. Niestety jego funkcja gromadzenia wody na wypadek awarii jest mocno ograniczona przez niewielką pojemność (550 [m³]).

Sieć ta powstała w latach 70-tych XX w. i wykonana jest głównie z żeliwa, polichlorku winylu i kilku odcinków stalowych. Z tego względu głównymi przyczynami awarii są nieszczelności połączeń na rurociągach żeliwnych oraz wady materiałowe na rurociągach z tworzywa.

3. Zastosowane metody analizy niezawodnościowej sieci wodociągowej

Przedstawiona na rys. 1 sieć wodociągowa posiada złożoną z punktu widzenia niezawodności strukturę połączeń. Do wyznaczenia niezawodności przedstawionej sieci wykorzystany został algorytm faktoryzacji. Jest to metoda oparta na teorii grafów i ich redukcji, umożliwiająca określenie niezawodności sieci przy następujących podstawowych założeniach [4,9,10,16,17]:

- analizowaną sieć reprezentuje graf nieskierowany:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

gdzie:

V – zbiór wierzchołków grafu – węzły w sieci (połączenie więcej niż 2 rurociągów lub punkt przyłączenia odbiorcy): $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$,

E – zbiór krawędzi grafu – połączenia (rurociągi) w sieci: $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$,

- przyjmuje się, że wierzchołki grafu czyli węzły w sieci są zawsze w stanie zdatności,
- prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia poszczególnych połączeń w sieci należy założyć lub wyznaczyć wykorzystując np. metody statystyczne i dane o awariach gromadzone dla danej sieci lub sieci eksploatowanych w zbliżonych warunkach,
- występujące uszkodzenia są niezależne.

Niezawodność sieci jest definiowana jako prawdopodobieństwo istnienia przynajmniej jednego zdatnego połączenia między wszystkimi węzłami zbioru K w sieci ($2 \leq |K| \leq |V|$). Fakt ten umożliwia, w zależności od liczby węzłów uwzględnionych w zbiorze K , wyznaczanie różnych miar niezawodności sieci. Gdy $K=2$ niezawodność jest prawdopodobieństwem istnienia połączenia między dwoma węzłami np.: źródło – punkt odbioru lub wejście – wyjście. Gdy $K=V$ niezawodność jest prawdopodobieństwem istnienia połączenia między wszystkimi węzłami zbioru V . W sieci wodociągowej można to zinterpretować jako prawdopodobieństwo, że do wszystkich węzłów ze zbioru K , a więc do wszystkich odbiorców, istnieje możliwość przesyłu wody.

Wyznaczenie zależności pozwalającej obliczyć niezawodność odbywa się na drodze odpowiedniej redukcji sieci reprezentowanej przez graf nieskierowany, zgodnie z poniższym zapisem [4,8,9,17]:

$$R(G_K) = R_{e_i} \cdot R(G_K | e_i \text{ zdatne}) + (1 - R_{e_i}) \cdot R(G_K | e_i \text{ niezdatne}) \quad (2)$$

$$R(G_K) = R_{e_i} \cdot R(G_{K'} * e_i) + (1 - R_{e_i}) \cdot R(G_K - e_i) \quad (3)$$

gdzie:

$G_{K'} * e_i = (V - u - v + w, E - e_i)$ - redukcja grafu gdy połączenie e_i jest zdatne – ze zbioru wierzchołków (V) odejmowane są wierzchołki na końcach połączenia e_i (u, v) a w ich miejsce dodawany jest wierzchołek wynikający z ich połączenia (w), natomiast ze zbioru połączeń (E) usuwane jest redukowane połączenie e_i ,

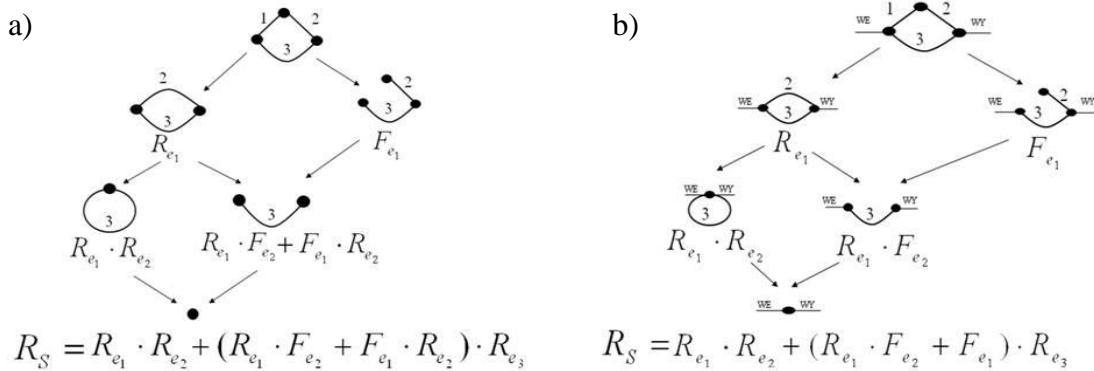
$$K' = \begin{cases} K & \text{jeżeli } u, v \notin K \\ K - u - v + w & \text{jeżeli } u \in K \text{ lub } v \in K, \end{cases}$$

$G_K - e_i = (V, E - e_i)$ - redukcja grafu gdy połączenie e_i jest niezdatne – zbiór wierzchołków (V) nie zmienia się a ze zbioru połączeń usuwane jest połączenie e_i .

Na rysunku 2 przedstawiono sposób redukcji i uzyskania zależności do obliczenia szukanej miary niezawodności sieci.

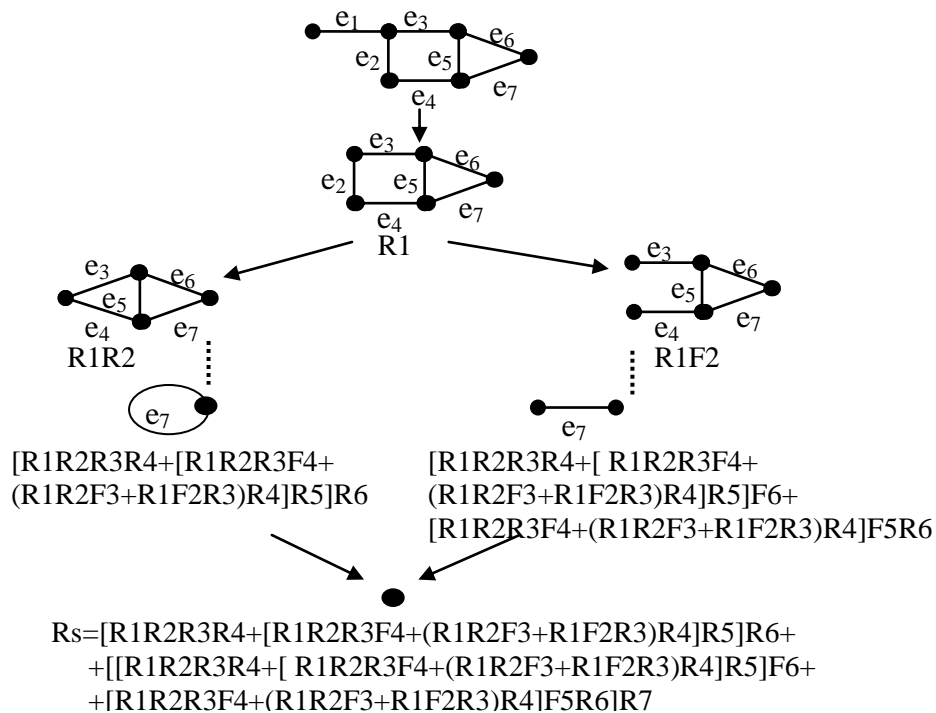
W zależności od liczby węzłów w zbiorze K redukcję układu przeprowadza się wg sposobu przedstawionego na rysunku 2. Sposób z rys. 2 a) stosuje się tylko wtedy gdy

do zbioru K zaliczy się wszystkie węzły. Sposób z rys. 2 b), przedstawiony tu dla $K=2$, jest analogiczny dla wszystkich przypadków gdy $K < V$.



Rys. 2. Sposób redukcji układu według algorytmu faktoryzacji: a) $K=V$, b) $K=2$

Stosowanie prezentowanej metody pozwala na redukcję i wyznaczenie niezawodności dowolnie złożonego układu sieciowego. Problem jednak znacznie się komplikuje ze wzrostem liczby połączeń w sieci, gdyż procedura redukcji staje się bardzo czasochłonna a postać zależności końcowej jest bardzo rozbudowana [4,10,16,18]. Na rysunku 3 przedstawiono fragment redukcji dla prostego układu gdzie przy 7 połączeniach zależność końcowa jest już rozbudowana [10]. Dla bardziej złożonych układów takich jak analizowana tu sieć wodociągowa konieczne jest wykorzystywanie programów komputerowych.



Rys. 3. Fragment redukcji układu z 7 połączeniami dla przypadku $K=V$ [9]

Oprócz zapewnienia możliwości przesyłu wody do odbiorców, przez nieuszkodzone rurociągi, w sieci wodociągowej niezwykle ważne jest zapewnienie wymaganego poziomu parametrów przesyłanej wody. Dotyczy to zarówno parametrów

hydraulicznych jak i składu chemicznego. W niniejszym opracowaniu aspekty związane ze składem chemicznym wody nie będą uwzględniane. W zakresie parametrów hydraulicznych najważniejsze jest zapewnienie wymaganych wartości ciśnienia u wszystkich odbiorców oraz możliwości poboru przez nich potrzebnej ilości wody w dowolnej chwili [2,3,13].

Ponieważ algorytm faktoryzacji nie uwzględnia w analizie ww. aspektów, do obliczeń parametrów hydraulicznych dostawy wody do odbiorców wykorzystany został program „ISYDW” opracowany na Politechnice Krakowskiej [2,3]. Zastosowany w tym programie model obliczeniowy uwzględnia między innymi:

- strukturę połączeń w sieci,
- średnice i długości wszystkich rurociągów,
- opory przepływu i wynikające z tego straty ciśnienia,
- wysokości posadowienia odbiorców w sieci i wymagane dla nich ciśnienia,
- zmienne wydajności źródeł zasilania sieci,
- pojemności zbiorników współpracujących z siecią,
- wartości zapotrzebowania na wodę odbiorców w sieci.

Program wykonuje symulację funkcjonowania sieci a wykonanie obliczeń umożliwia obserwację zmian parametrów hydraulicznych w poszczególnych punktach sieci w wybranym przedziale czasu. Pozwala również zaobserwować sposób funkcjonowania sieci i zmiany tych parametrów w sytuacji wystąpienia awarii rurociągów, zbiorników lub źródeł zasilania sieci. Wyznaczone wartości parametrów hydraulicznych w sieci są następnie porównywane z wartościami wymaganymi. Wygodnym sposobem oceny stopnia zapewnienia wymaganych wartości parametrów jest obserwacja wyznaczonego przez program Wskaźnika Warunków Poboru Wody (WWPW). Wskaźnik ten określa stopień obniżenia możliwości zaopatrzenia odbiorców w wodę. Definiuje się go jako iloraz wartości zużycia i zapotrzebowania na wodę. Pełen komfort użytkowników określany jest przy WWPW równym 1, gdy spada poniżej 1 odbiorca nie dostaje wody o odpowiednich parametrach (ciśnienie w sieci jest niższe od wymaganego i odbiorca nie może pobrać wymaganej ilości wody). Dla pojedynczego węzła w sieci wyznaczany jest wg zależności [2,3]:

$$WWPW = \frac{ZU}{ZP} \leq 1 \quad (4)$$

gdzie:

ZP – wartość zapotrzebowania na wodę, która jest znana,

ZU – wartość zużycia wody.

Wartość ZU jest wyznaczana wg zależności:

$$ZU = ZP \cdot \left(\frac{h}{h_{min}} \right)^{0,5} \quad (5)$$

gdzie:

h – ciśnienie w węźle w danej chwili,

h_{min} – minimalne ciśnienie w danym węźle zapewniające pełny komfort użytkownika wody.

W zależności od wartości ciśnienia h w węźle możliwe są następujące sytuacje:

- jeśli $h = h_{min}$ to $ZU = ZP$ i wtedy $WWPW = 1$,
- jeśli $h = 0$ to $ZU = 0$ i wtedy $WWPW = 0$,
- jeśli $0 < h < h_{min}$ to $0 < ZU < ZP$ i wtedy $0 < WWPW < 1$.

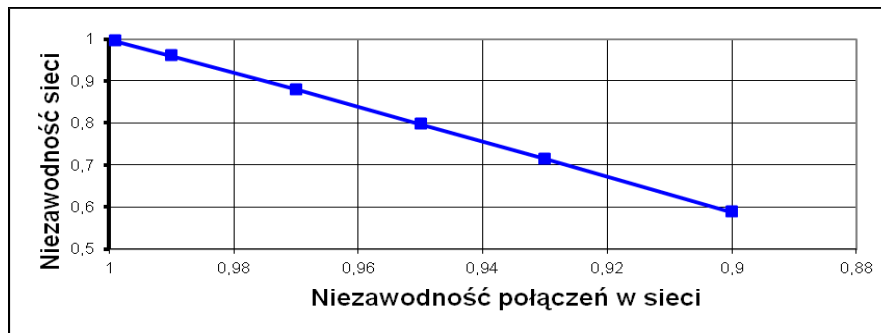
Wartość wskaźnika dla całej sieci jest ilorazem sumy wartości zużycia dla wszystkich węzłów i sumy wartości zapotrzebowania dla wszystkich węzłów w danej chwili.

4. Wyniki obliczeń

Ze względu na pracochłonność związaną z redukcją grafu reprezentującego analizowaną tu sieć obliczenia niezawodności wykonano w programie komputerowym opracowanym w Akademii Górniczo-Hutniczej [12].

Węzłami w sieci są wszystkie rozgałęzienia, punkty połączeń sieci ze źródłami zasilania i punkty przyłączeń odbiorców. Dla przedstawionej sieci wodociągowej do zbioru K zaliczono wszystkie 28 węzłów. Stanem zdatności sieci jest tu każdy przypadek, w którym możliwy jest przesył wody do każdego węzła w sieci a obliczana niezawodność jest prawdopodobieństwem tego zdarzenia.

Wyznaczoną niezawodność sieci jako prawdopodobieństwo istnienia połączenia między wszystkimi węzłami i jej zmianę w zależności od prawdopodobieństwa przebywania połączeń w stanie zdatności przedstawia rys. 4.



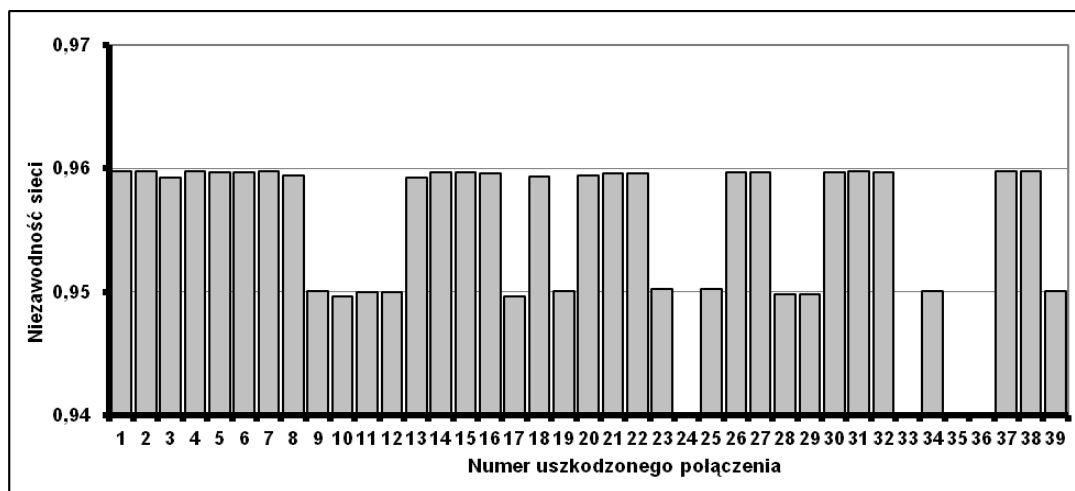
Rys. 4. Niezawodność sieci w zależności od prawdopodobieństwa zdatności jej połączeń

Głównym celem analizy jest określenie wpływu uszkodzenia poszczególnych połączeń w sieci na jej niezawodność. Aby uprościć prezentowane dalej obliczenia, jako punkt odniesienia, przyjęto tylko jedną wartość z rysunku 4. Jest to przypadek, w którym wartości prawdopodobieństwa przebywania połączeń w stanie zdatności $R_p = 0,99$. Przyjęto je wg danych literaturowych opracowanych na podstawie wieloletnich badań sieci wodociągowych [5,15]. Wyznaczona niezawodność sieci jako prawdopodobieństwo istnienia połączenia między wszystkimi węzłami wynosi wtedy $R_s = 0,95997$.

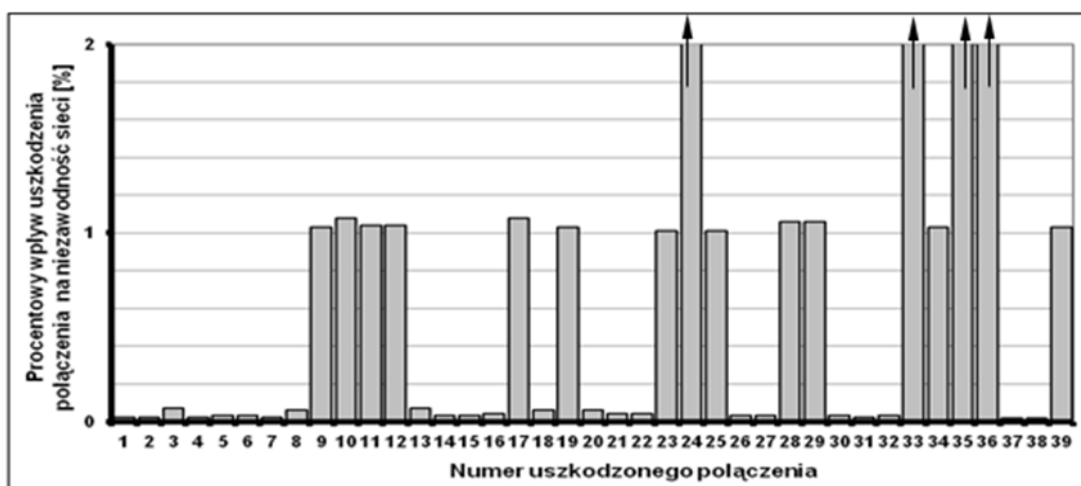
Wyznaczone wartości niezawodności sieci przy uszkodzeniu danego połączenia oraz procentowy wpływ uszkodzenia połączeń na niezawodność sieci przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Zerowa wartość niezawodności na rys. 5 oznacza, że uszkodzenie danego połączenia powoduje, z punktu widzenia przyjętych założeń, stan niezdatności sieci. Do węzła na końcu tego połączenia nie ma możliwości przesyłu wody. W przypadku gdy na końcu uszkodzonego połączenia jest źródło zasilania to nie może ono zasilać sieci. Połączenia

te (24, 33, 35, 36) można określić jako krytyczne z punktu widzenia niezawodności analizowanej sieci.



Rys. 5. Niezawodność sieci przy uszkodzeniu połączenia



Rys. 6. Procentowy wpływ uszkodzenia połączenia na niezawodność sieci

Zauważyć można również, że uszkodzenie niektórych połączeń w strukturach pierścieniowych nie powoduje stanu niezdatności sieci ale ma zdecydowanie większy od innych wpływ na niezawodność całej sieci. Takie połączenia niewralgiczne to: 9, 10, 11, 12, 17, 19, 23, 25, 28, 29, 34, 39. Wynika stąd, że z punktu widzenia zachowania spójności struktury sieci i możliwości dostarczania wody do wszystkich węzłów w sieci zdatność tych połączeń również ma istotne znaczenie.

Następnie przy założeniu, że wystąpiły uszkodzenia połączeń w sieci, wykonano symulację funkcjonowania sieci w programie ISYDYW i wyznaczono wartości wskaźnika WPPW. Symulację czasowo-przestrzenną wykonano każdorazowo dla całej doby. Na podstawie informacji z eksploatacji rzeczywistych sieci przyjęto, że czas naprawy uszkodzonego połączenia nie przekroczy 1 doby [2,3].

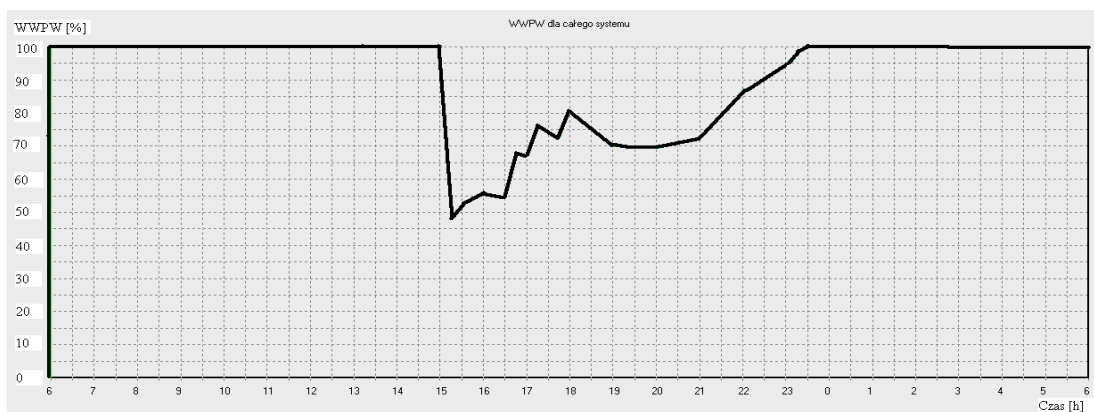
Przy prawidłowej pracy zbiorników i pompowni wskaźnik WPPW w całej sieci jest równy 1. Chwilowe wyłączenie zbiornika również nie powoduje zmniejszenia komfortu poboru wody. Całkowite, zaplanowane zamknięcie zbiornika powoduje w

godzinach szczytu w kilku węzłach obniżenie wartości WWPW do 0,9. Oznacza to, iż niewielka liczba odbiorców zaopatrywana z tych węzłów i mieszkających na najwyższych kondygnacjach może odczuwać niedobór ciśnienia. Jeżeli wyłączenie zbiornika jest nieprzewidziane, wtedy cała zachodnia część miasta odczuwa niewielki dyskomfort (WWPW = 0,9), a w okolicy kilku węzłów ten dyskomfort jest znacznie większy (w godzinach szczytu WWPW = 0,3 – 0,4).

Awaria rurociągu tranzytowego 200 [mm] lub 225 [mm] (połączenie 1, 2) z pompowni P1 nie wpływa znacząco na WWPW. Natomiast awaria rurociągu 400 [mm] (połączenie 3), powoduje w godzinach szczytu spadek wartości WWPW w kilku węzłach po zachodniej części miasta do wartości 0,9, w najniekorzystniejszym punkcie do 0,7. Można jednak zminimalizować skutki wyłączenia tego rurociągu poprzez zwiększenie wydajności pompowni P2.

W przypadku całkowitego wyłączenia pompowni P1 w najniekorzystniejszym momencie dnia wskaźnik WWPW we wschodniej części sieci osiąga wartości ok. 0,85, a w zachodniej 0,15 – 0,55.

Najtrudniejsza sytuacja występuje wtedy gdy pompownia P2 zostanie wyłączona z eksploatacji (uszkodzenie połączenia 24). Wówczas ciśnienie spada w całym mieście, we wschodniej części najwyższe wartości wskaźnika WWPW są w granicach 0,8 – 0,9 a w godzinach szczytu spadają nawet do 0,5. Natomiast w zachodniej części WWPW waha się w granicach 0,15 – 0,55. Oznacza, to że tylko u około 50 [%] odbiorców zaspokajane są potrzeby związane z poborem wody. Przebieg zmian średniego wskaźnika WWPW wyznaczonego dla całej sieci w ciągu doby przedstawia rysunek 7. Widać tu wyraźnie, że w godzinach od 15 do ok. 23 w całej sieci wystąpi znaczne pogorszenie warunków poboru wody.



Rys. 7. Zmiana średniego wskaźnika WWPW przy uszkodzeniu połączenia 24

Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że najbardziej istotnymi połączeniami w analizowanej sieci są oznaczone nr: 17, 24, 25, 28, 33. Ich uszkodzenie znacznie pogarsza warunki poboru wody w niektórych punktach sieci jak i w znacznych jej obszarach.

Zestawienie najistotniejszych połączeń wytypowanych w analizie niezawodnościowej oraz w symulacji czasowo-przestrzennej przedstawiono w tabeli 1. Połączenia o największym znaczeniu oznaczono symbolem „X”.

Tab. 1. Najważniejsze połączenia w sieci wytypowane w obu metodach obliczeniowych

| Nr uszkodzonego połączenia | Wpływ na niezawodność strukturalną | Wpływ na warunki zasilania odbiorców (WWPW) | Minimalna średnia wartość WWPW w ciągu doby obliczona dla całej sieci | Minimalna wartość WWPW w ciągu doby dla najgorszego punktu w sieci |
|----------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| 9 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 10 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 11 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 12 | x | | ≅1 | 0,96 |
| 17 | x | X | 0,97 | 0,37 |
| 19 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 23 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 24 | X | X | 0,48 | 0,13 |
| 25 | x | X | 0,86 | 0,13 |
| 28 | x | X | 0,91 | 0,13 |
| 29 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 33 | X | X | 0,56 | 0,13 |
| 34 | x | | ≅1 | 0,98 |
| 35 | X | | ≅1 | 0,98 |
| 36 | X | | ≅1 | 0,98 |
| 39 | x | | ≅1 | 0,98 |

Uzyskane w obu metodach wyniki wykazują pewną zbieżność. Widać jednak, że nie wszystkie wytypowane w analizie niezawodnościowej połączenia są istotne z punktu widzenia symulacji czasowo-przestrzennej i słabiej wpływają na wyznaczaną wartość współczynnika WWPW.

Różnice wynikają głównie z odmiennego podejścia do problemu w obydwu metodach. W analizie niezawodnościowej określa się czy istnieje możliwość przesyłu wody do wszystkich punktów w sieci przez uszkodzające się z określonym prawdopodobieństwem połączenia. Najważniejsze połączenia określa się w aspekcie spełnienia tego warunku.

W analizie czasowo-przestrzennej uwzględniane są wielkości, które nie są uwzględniane w analizie niezawodnościowej. Zaliczyć do nich można średnice i długości poszczególnych rurociągów jak i straty przepływu, czy też zmienne wydajności źródeł zasilania. Uzyskiwane wyniki obliczeń pozwalają określić czy zapewnione będą i na jakim poziomie wartości wymaganych parametrów hydraulicznych dostarczanej do odbiorców wody.

Można więc powiedzieć, że metody się uzupełniają i w ocenie końcowej niezawodności sieci należy brać pod uwagę połączenia wyznaczone w obydwu jako istotne. Wytypowane w obu metodach newralgiczne połączenia (17, 24, 25, 28, 33, 35, 36) są najważniejsze z punktu widzenia niezawodności strukturalnej jak i możliwości zapewnienia wymaganych warunków zasilania odbiorców w sieci. Fakt ten stanowi bezpośrednią wskazówkę do podejmowania koniecznych działań kontrolno-technicznych w celu zapewnienia ich poprawnego funkcjonowania.

W rozpatrywanym przypadku można zalecić:

- objęcie ścisłą kontrolą prac budowlanych, a zwłaszcza wykonywania wykopów i innych prac z użyciem maszyn ciężkich, przeprowadzanych w rejonie newralgicznych odcinków rurociągów,
- w przypadku rurociągów magistralnych (24, 25) można rozważyć budowę odcinka rezerwowego (jak ma to miejsce w przypadku pompowni P1), szczególnie jeśli planowana byłaby dalsza rozbudowa istniejącej sieci oraz z uwagi na fakt, że odcinek 24 jest jedynym łączącym pompownię P2 z siecią.

5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda faktoryzacji i czasowo-przestrzenna do wyznaczenia wartości wskaźnika WWPW wzajemnie się uzupełniają w ocenie niezawodności i mogą być wykorzystywane w prowadzeniu racjonalnej eksploatacji sieci wodociągowych.

Przeprowadzenie symulacji czasowo-przestrzennej w celu wyznaczenia wartości wskaźnika WWPW i ocena niezawodności strukturalnej sieci wodociągowej prowadzi do wytypowania newralgicznych odcinków rurociągów, których uszkodzenia mogą być szczególnie dotkliwe dla odbiorców wody. Zapewnienie właściwego nadzoru i kontroli technicznej nad tymi fragmentami sieci jest istotnym elementem strategii eksploatacyjnej, gdyż systemy zaopatrzenia w wodę są jednymi z najważniejszych infrastruktur krytycznych, o szczególnym znaczeniu dla funkcjonowania państwa i obywateli. W związku z tym zapewnienie ich bezpiecznego i niezawodnego funkcjonowania jest szczególnie ważnym zagadnieniem.

Literatura

1. Agrawal M L, Gupta R, Bhave P R. Reliability – based strengthening and expansion of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2007; 133(6): 531-541.
2. Knapik K. Czasowo-przestrzenna symulacja działania systemu dystrybucji wody. Monografia. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1989.
3. Knapik K. Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych. Monografia. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2000.
4. Koide T, Shinmori S, Ishii H. Efficient computation of network reliability importance on K-terminal reliability. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 2005; 12(3): 213–226.
5. Kwietniewski M, Roman M, Kłoss-Trębaczkiwicz H. Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Warszawa: Arkady, 1993.
6. Levallois P, Grondin J, Gingras S. Evaluation of consumer attitudes on taste and tap water alternatives in Quebec. *Water Science and Technology* 1999; 40: 135–139.
7. Lukas A, Mayr E, Ruhri M, Katmair H. Failure Experience Improvement System (FEIS) for water supply systems. *Journal of Hydroinformatics* 2012; 14.3: 646-658.

8. Madeyski L, Mazur Z. Pesymistyczna złożoność obliczeniowa algorytmu faktoryzacji Fact. ZEM 1998; 33(3): 391-404.
9. Page L B, Perry J E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability. IEEE Trans. Reliability 1988; 37: 259-267.
10. Pilch R. Factorisation algorithm-based on method used for the calculation of network system's reliability. Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance 2011; 4(168): 45-57.
11. Pilch R, Szybka J, Broniec Z. Determining of hot water-pipe exploitation time on the basis of limiting states. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2012; 14(3): 203-207.
12. Sułek P. Ocena niezawodności układów sieciowych metodą faktoryzacji. Praca dyplomowa. Kraków: WIMiR, AGH, 2011.
13. Suribabu C R, Neelakantan T R. Balancing reservoir based approach for solution to pressure deficient water distribution networks. International Journal of Civil and Structural Engineering 2011; 2(2): 639-647.
14. Torii A J, Lopez R H. Reliability analysis of water distribution networks using the adaptive response surface approach. Journal of Hydraulic Engineering 2012; 138(3): 227-236.
15. Wieczysty A. Niezawodność miejskich systemów zaopatrzenia w wodę. Monografia. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1993.
16. Won J-M, Karray F. A greedy algorithm for faster feasibility evaluation of all-terminal-reliable networks. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics 2011; 41(6): 1600-1611.
17. Wood R K. Factoring algorithms for computing K-terminal network reliability. IEEE Trans. Reliability 1986; (R-35): 269-278.
18. Yazdani A, Jeffrey P. Applying network theory to quantify the redundancy and structural robustness of water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management 2012; 138(2): 153-161.