

Miroslaw Sudoł

Metoda wyboru miejsc pomiarów zmian jakości wody w systemie monitoringu sieci wodociągowej

Problematyka wyboru lokalizacji punktów pomiarowych w systemie monitoringu jakości wody przesyłanej siecią wodociągową jest przedmiotem wielu badań. Autorzy pracy [1] opracowali metodę, która polega na wyszukaniu wśród węzłów sieci takich punktów, w których wykonanie analizy wody reprezentowałoby jakość jak największej ilości wody przepływającej przez dany węzeł, co można określić jako „pokrycie” badaniami jak największej ilości wody. Na podstawie tej metody autorzy pracy [2] opracowali algorytm lokalizacji sieciowych stacji dezynfekcji wody. Ponieważ do lokalizacji sieciowej stacji dezynfekcji potrzebna jest kontrola węzłów poniżej tej stacji, dlatego zmodyfikowano pojęcie „pokrycia” w następujący sposób: węzeł j pokrywa węzeł i , jeśli węzeł i otrzymuje wystarczającą ilość wody z węzła j , przy czym jakość wody (zawartość środka dezynfekcyjnego) w węźle i jest określana na podstawie badań wody w węźle j . W algorytmie poszukiwania miejsc lokalizacji stacji dezynfekcji wody uwzględnia się zjawisko zmniejszania ilości środka dezynfekcyjnego (wolnego chloru) w funkcji czasu retencji wody w sieci. Powyższe metody ograniczają rozważania do tych węzłów sieci, w których pobór jest większy od zera. Zastosowano w nich zasadę maksymalizacji ilości badanej wody, przy czym ilość oznacza pobór w danym węźle.

W późniejszych latach inni badacze [3–12] również podejmowali próby określenia najbardziej korzystnej lokalizacji punktów pomiarowych na sieci, jednak pomimo licznych badań w tej dziedzinie nie wyczerpują one tematu, który będzie miał różne rozwiązania w zależności od wymagań, jakie stawia się przy lokalizowaniu punktów pomiarowych jakości wody. W rezultacie tych badań opracowano różne narzędzia do wyboru lokalizacji punktów pomiarowych, na przykład Teva Spot [13] i Splace-toolkit [10], czy też z wykorzystaniem geometrii fraktalnej [14, 15]. Trzeba mieć jednak na uwadze fakt, że pomiarami ciągłymi można obecnie objąć niewielką część wskaźników jakości wody [16]. Dotychczas w trakcie licznych badań nie wyłoniono dominującej metody lokalizacji punktów pomiarowych, ponieważ każda z tych metod ma zalety i wady [6].

W niniejszym artykule przedstawiono metodę wyboru lokalizacji punktów pomiarowych wykorzystującą podstawowy element sieci wodociągowej, jakim jest odcinek, co różni ją od dotychczasowych, w których podstawowy element pomiarowy sieci wodociągowej stanowią węzły.

Charakterystyka metody

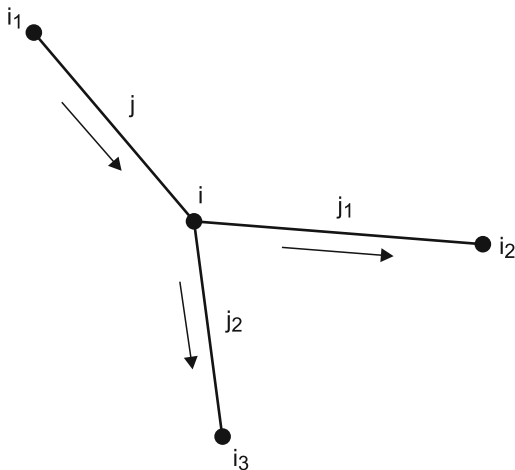
Proponowana metoda lokalizacji stałych punktów pomiaru jakości wody w podsystemie dystrybucji za podstawowy element przyjmuje odcinek przewodu [17], który jest rozumiany jako element o jednakowej charakterystyce technicznej (średnica, materiał) i niezawodnościowej (intensywność uszkodzeń). Podstawowym narzędziem wykorzystywanym w tej metodzie jest model numeryczny sieci wodociągowej, z użyciem którego wyznaczane są dwie macierze danego typu zanieczyszczenia (z_t), niezbędne do sformułowania zadania optymalizacyjnego, przy czym węzły sieci są wykorzystywane jako miejsca potencjalnego wprowadzania zanieczyszczeń do układu przewodów. W modelu sieci wodociągowej, zbudowanej z $i=1, \dots, k$ węzłów oraz $j=1, \dots, m$ odcinków, wprowadza się w danym węźle i i parametry określające:

- typ zanieczyszczenia z_t , $t=a, \dots, z$
- początkową oraz maksymalną wartość danego zanieczyszczenia,
- maksymalny czas, jaki może upłynąć od wprowadzenia zanieczyszczenia do jego wykrycia.

W przypadku tak określonego modelu przeprowadza się symulacje czasoprzestrzenne parametrów hydraulicznych i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w sieci, w wyniku których na każdym odcinku sieci wyznacza się maksymalną wartość zanieczyszczenia. Wynikiem jednokrotnej symulacji jest wektor określający oddziaływanie zanieczyszczenia z_t wprowadzanego w węzeł i na $j=1, \dots, m$ odcinków sieci. Przeprowadzając kolejno symulacje węzłów $i=1, \dots, k$, jako źródeł zanieczyszczenia, otrzymuje się macierz zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Zz_t}(i, j)$ z k węzłów na m odcinków. Następnie tworzy się macierz tempa wykrycia zanieczyszczenia $M_{Tz_t}(i, j)$, po wykonaniu tych samych symulacji, jednak w tym przypadku w odniesieniu do poszczególnych elementów macierzy określa się, w którym kroku czasowym symulacji została osiągnięta maksymalna wartość zanieczyszczenia z_t w j -tym odcinku przy źródle zanieczyszczenia w i -tym węźle.

Ze względu na to, że odcinek j jest połączony z dwoma węzłami – i oraz $i+1$, konieczne było ustalenie, który z nich oddziałuje na odcinek j . Przyjęto, że jeżeli rozpatrywany węzeł, który jest jednym z końców odcinka j , wywołuje w tym odcinku zanieczyszczenie, to temu węzłowi przypisuje się takie oznaczenie, jak rozpatrywanego odcinka. W przypadku, kiedy dany węzeł wywołuje zanieczyszczenie w kilku odcinkach, powielane są na tych odcinkach wartości wektora oddziaływania oraz tempa oddziaływania wyznaczone w rozpatrywanym węźle. Nadanie węzłowi

symbolu odcinka umownie oznacza wprowadzenie zanieczyszczenia na tym odcinku (zanieczyszczenie wprowadzono w jednym z węzłów połączonych z tym odcinkiem). Na rysunku 1 podano przykład wpływu zanieczyszczenia wprowadzanego w węzle na odcinki, których ten węzeł jest początkiem lub końcem. W tym przypadku zanieczyszczenie wprowadzone w węzle i wpływa według przyjętych zasad na odcinki j_1 oraz j_2 , natomiast nie ma wpływu na odcinek j . W związku z tym wektor oddziaływania w przypadku węzła i , jako źródła zanieczyszczenia, przypisany jest zarówno do odcinka j_1 , jak i do odcinka j_2 , które umownie stały się miejscami wprowadzania zanieczyszczenia.



Rys. 1. Schemat wpływu zanieczyszczenia wprowadzonego w węzle i na połączone z nim odcinki j , j_1 oraz j_2
Fig. 1. Schematic diagram of an impact of pollutants entering the system at the i node on the j , j_1 , j_2 links

Zgodnie z tymi zasadami, macierz zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Zt}(i,j)$ przyjmuje postać $M_{Zt}(j,j)$ i odpowiednio macierz tempa wykrycia zanieczyszczenia $M_{Tt}(i,j)$ przyjmuje postać $M_{Tt}(j,j)$. Obie przekształcone macierze są macierzami kwadratowymi o wymiarach $m \times m$, ponieważ liczba umownych odcinków j , w których wprowadzane jest zanieczyszczenie oraz liczba odcinków j , na które wprowadzane zanieczyszczenie oddziałuje, są równe sobie, a ich liczba wynosi m w rozpatrywanym podsystemie dystrybucji wody. W ten sposób eliminowane są z ograniczeń takie elementy, których wszystkie elementy macierzy oddziaływania lub tempa oddziaływania są równe zero oraz jednocześnie uzyskiwane są macierze kwadratowe, na podstawie których zapisywane są warunki ograniczające maksymalizowaną funkcję celu. Do procesu standaryzacji niezbędne jest określenie dwóch kryteriów – c_{jzt} oraz c_{tzt} , które oznaczają odpowiednio minimalną wartość zanieczyszczenia, przyjętą jako zdarzenie wykrycia, oraz maksymalny czas do wystąpienia takiego zdarzenia. W dalszym etapie obie macierze zostają poddane procesowi standaryzacji, przy czym macierz zasięgu oddziaływania zostaje przekształcona w standaryzowaną macierz zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Zt}^S(j,j)$ w następujący sposób: każdy element macierzy jest porównywany z przyjętą wartością c_{jzt} , oznaczającą minimalną zawartość zanieczyszczenia, przy czym w przypadku wartości mniejszej od c_{jzt} element macierzy przyjmuje wartość 0, zaś w przeciwnym wypadku – 1. Macierz tempa oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Tt}(j,j)$ zostaje przekształcona na podstawie następującego algorytmu: każdy element macierzy jest porównywany z przyjętą wartością c_{tzt} , oznaczającą maksymalny czas potrzebny do wykrycia zanieczyszczenia, przy

czym w przypadku wartości mniejszej od c_{tzt} element macierzy przyjmuje wartość 1, zaś w przeciwnym wypadku – 0. W ten sposób powstaje standaryzowana macierz tempa wykrycia zanieczyszczenia $M_{Tt}^S(j,j)$ przy kryterium c_{tzt} .

Wagi wpływu ograniczeń na maksymalizowaną funkcję celu tworzoną na podstawie obu macierzy danego typu zanieczyszczeń określa się za pomocą współczynników ψ_{Zt} oraz ψ_{Tt} , co realizuje się przez wymnożenie elementów macierzy zasięgu lub tempa oddziaływania odpowiednio przez te współczynniki. Standardowo współczynniki ψ_{Zt} oraz ψ_{Tt} powinny przyjmować wartość 1, co oznacza, że wpływ obu ograniczeń (macierze oddziaływania i tempa) danego typu zanieczyszczenia nie podlega modyfikacji. W przypadku łagodzenia wpływu danego typu ograniczeń, współczynniki te powinny przyjmować wartości >1 (ze zbioru liczb całkowitych), co wiąże się z wykorzystywaniem do rozwiązania zadania optymalizacyjnego programowania całkowitoliczbowego. Różnicowania wpływu poszczególnych grup ograniczeń można również dokonywać między różnymi typami zanieczyszczeń. Przyjęcie wartości ψ_{Zt} oraz ψ_{Tt} , pozwala na zmianę wpływu poszczególnych ograniczeń i jednocześnie odgrywa dużą rolę przy wyznaczaniu zbioru rozwiązań.

Funkcja celu w prezentowanej metodzie jest zależnością uwzględniającą zarówno wagę odcinka, ze względu na jego obciążenie hydrauliczne (Q_j), jak również podatność tego odcinka na obniżanie jakości wody (czas T_j i średnica D_j) oraz możliwość wystąpienia na tym odcinku awarii (intensywność uszkodzeń λ_j , długość L_j). W funkcji celu posłużono się ich względnymi udziałami, a nie wartościami rzeczywistymi. Takie podejście pozwala bowiem na analizę wpływu poszczególnych parametrów (Q_j , T_j , D_j , λ_j , L_j) na wartość współczynnika dla j -ego odcinka. W związku z tym funkcja celu przyjmuje postać:

$$F = \sum_{j=1}^m (\alpha Q_{jw} + \beta T_{jw} + \gamma D_{jw} + \delta \lambda_{jw}) y_j \quad (1)$$

Zadanie optymalizacyjne polegało na maksymalizacji funkcji celu (1), przy następujących ograniczeniach:

$$\sum_{j=1}^m r_j \leq R \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m \psi_{Zt} M_{Zt}^T(j,j) r_j - y_j \geq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m \psi_{Tt} M_{Tt}^T(j,j) r_j - y_j \geq 0 \quad (4)$$

w których:

Q_{jw} – względne średnie natężenie przepływu w j -tym odcinku

T_{jw} – względny średni czas retencji w j -tym odcinku w rozpatrywanym czasie pracy sieci

D_{jw} – względna odwrotność średnicy przewodu j -tego odcinka

λ_{jw} – względna intensywność uszkodzeń j -tego odcinka w rozpatrywanym czasie pracy sieci,

α , β , γ , δ – wagi określające wpływ poszczególnych cech odcinka, przy czym ich suma wynosi 1

r_j – j -ty odcinek, na którym lokalizowana jest stacja pomiarowa ($r=1$, gdy jest on wybrany na stację monitorującą lub $r=0$ w przeciwnym przypadku)

$M_{Zt}^T(j,j)$ – transformata macierzy $M_{Zt}(j,j)$

$M_{Tt}^T(j,j)$ – transformata macierzy $M_{Tt}(j,j)$

ψ_{Zz_i} – współczynnik określający wpływ macierzy zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia typu z_i na funkcję celu
 ψ_{Tz_i} – współczynnik określający wpływ macierzy tempa oddziaływania zanieczyszczenia typu z_i na funkcję celu
 y_j – wykrywalność zanieczyszczenia ($y_j=0$ – zanieczyszczenie niewykryte lub $y_j=1$ – zanieczyszczenie wykryte)
 m – liczba odcinków
 R – liczba odcinków pomiarowych

Względne średnie natężenie przepływu w j -tym odcinku w rozpatrywanym czasie pracy sieci wyznacza się z zależności:

$$Q_{jw} = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^m Q_j} \quad (5)$$

w której:

Q_j – średnie natężenie przepływu w j -tym odcinku w rozpatrywanym czasie pracy sieci, dm^3/s
 m – liczba odcinków sieci

Względny średni czas retencji w j -tym odcinku w rozpatrywanym czasie pracy sieci wyznaczany jest z zależności:

$$T_{jw} = \frac{T_j}{\sum_{j=1}^m T_j} \quad (6)$$

w której:

T_j – średni czas retencji w j -tym odcinku w rozpatrywanym czasie pracy sieci, h

Względny udział odwrotności średnicy przewodu j -tego odcinka wyznacza się z zależności:

$$D_{jw} = \frac{\frac{1}{D_j}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{D_j}} \quad (7)$$

w której:

D_j – średnica j -tego odcinka przewodu, mm

Względną intensywność uszkodzeń j -tego odcinka w rozpatrywanym czasie pracy sieci wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda_{jw} = \frac{L_j \lambda_j}{\sum_{j=1}^m L_j \lambda_j} \quad (8)$$

w którym:

L_j – długość j -tego odcinka, m

λ_j – jednostkowa intensywność uszkodzeń j -tego odcinka, 1/d

Dalszy etap działań dotyczy ustalenia liczby odcinków pomiarowych, na których byłyby wykrywane zanieczyszczenia powyżej zadanego poziomu wykrywalności. Metoda ustalania optymalnej liczby odcinków pomiarowych wykorzystuje przedstawiony powyżej sposób wyboru odcinków pomiarowych. Algorytm opracowany w tym celu polega na wyznaczaniu prawdopodobieństwa wykrycia zanieczyszczeń w odcinkach podsystemu dystrybucji wody (P_{yR}) w przypadku kolejnej liczby odcinków pomiarowych R ($R=1, \dots, m$, m – liczba odcinków). W przypadku osiągnięcia przez P_{yR} wartości większej od wartości kryterialnej prawdopodobieństwa wykrycia zanieczyszczenia P_{yRkr} , wyznaczona liczba miejsc jest wystarczająca do wykrywania zanieczyszczeń w danej sieci przy zadanym kryterium. Obliczenia wartości P_{yR} dokonuje się na podstawie następujących założeń: zakładając liczbę rozpatrywanych odcinków pomiarowych wyznacza się rozwiązanie przedstawionego wyżej zadania optymalizacyjnego, w wyniku czego uzyskuje się wartości wykrywalności y_j , przy czym

przyjęto, że zdarzeniem wykrycia jest zdarzenie, w którym $y_j=1$. Prawdopodobieństwo wykrycia zanieczyszczenia w odcinkach podsystemu dystrybucji wody wyznacza się ze wzoru:

$$P_{yR} = \frac{\sum_{j=1}^m y_j = 1}{\sum_{j=1}^m y_j} \quad (9)$$

w którym:

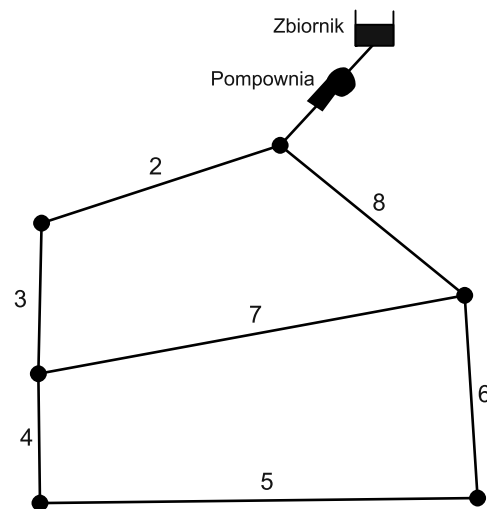
y_j – wykrywalność zanieczyszczenia w odcinkach j

m – liczba odcinków sieci

Obliczenia prowadzi się do momentu uzyskania przez P_{yR} wartości większej od P_{yRkr} .

Przykład obliczeniowy

Na rysunku 2 przedstawiono schemat sieci wodociągowej, a w tabeli 1 dane obliczeniowe do ilustracji przykładu.



Rys. 2. Schemat sieci wodociągowej (2, ..., 8 – odcinki)
 Fig. 2. Schematic diagram of water network (2, ..., 8 – links)

Tabela 1. Dane do przykładu obliczeniowego
 Table 1. Data for the calculation example

Odcinek j	L_j , m	D_j , mm	Q_j , dm^3/s	T_j , h	λ_j , 1/d
2	1000	300	68,20	0,70	0,00002
3	700	300	44,20	1,95	0,00002
4	700	300	30,84	4,05	0,00002
5	1700	200	9,16	5,20	0,00003
6	1000	300	41,16	2,24	0,00002
7	1800	300	34,64	3,03	0,00002
8	1000	300	91,80	0,71	0,00001

Każdy z punktów węzłowych posłużył jako miejsce wprowadzenia zanieczyszczenia (z_i), charakteryzującego się stałą ilością w czasie przesyłu wody. Przyjęto, że zawartość wprowadzanego zanieczyszczenia wynosi $1,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Poszczególne symulacje dynamiczne prowadzono przez 24 h, podczas których wprowadzane było zanieczyszczenie. W wyniku symulacji otrzymano dwie macierze – zasięgu i tempa oddziaływania wprowadzanego zanieczyszczenia (tab. 2 i 3).

Tabela 2. Macierz zasięgu oddziaływania
Table 2. Impact range matrix

Odcinek j	Zanieczyszczenie wykryte na odcinku j, mg/dm ³						
	2	3	4	5	6	7	8
2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
3	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
4	0,90	0,90	1,00	0,00	0,00	0,00	0,90
5	0,61	0,00	0,00	1,00	0,96	0,96	0,61
6	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
7	0,74	0,00	0,00	0,00	0,89	0,89	0,74
8	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabela 3. Macierz tempa oddziaływania
Table 3. Detection rate matrix

Odcinek j	Czas wykrycia zanieczyszczenia na odcinku j, h						
	2	3	4	5	6	7	8
2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0
3	6,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0
4	10,0	6,0	4,0	0,0	0,0	0,0	10,0
5	24,0	0,0	0,0	17,0	24,0	24,0	24,0
6	13,0	0,0	0,0	0,0	7,0	7,0	13,0
7	24,0	0,0	0,0	0,0	24,0	24,0	24,0
8	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0

Tabela 4. Standaryzowana macierz zasięgu oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Zt}^{S(j,j)}$ przy kryterium $c_{jzt}=0,75\text{ mg/dm}^3$
Table 4. Standardized impact range matrix $M_{Zt}^{S(j,j)}$ with criterion $c_{jzt}=0,75\text{ mg/L}$

Odcinek j	Odcinek j						
	2	3	4	5	6	7	8
2	1	0	0	0	0	0	1
3	1	1	0	0	0	0	1
4	1	1	1	0	0	0	1
5	0	0	0	1	1	1	0
6	1	0	0	0	1	1	1
7	0	0	0	0	1	1	0
8	1	0	0	0	0	0	1

Tabela 5. Standaryzowana macierz tempa oddziaływania zanieczyszczenia $M_{Tt}^{S(j,j)}$ przy kryterium $c_{tzt}=12\text{ h}$
Table 5. Standardized detection rate matrix $M_{Tt}^{S(j,j)}$ with criterion $c_{tzt}=12\text{ h}$

Odcinek j	Odcinek j						
	2	3	4	5	6	7	8
2	1	0	0	0	0	0	1
3	1	1	0	0	0	0	1
4	1	1	1	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	1

Przyjęto, że wykrycie zanieczyszczenia będzie miało miejsce wówczas, gdy jego zawartość w wodzie wyniesie nie mniej niż 75% ilości wprowadzonej ($c_{jzt}=0,75 \text{ mg/dm}^3$) oraz nastąpi to w czasie krótszym niż 12 h ($c_{tzt}=12 \text{ h}$). Pozwoliło to na utworzenie standaryzowanych macierzy zasięgu i tempa oddziaływania spełniających wcześniejsze założenia (tab. 4 i 5).

Zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2 wyznaczono współczynniki funkcji celu na podstawie danych zawartych w tabeli 1. Współczynniki wpływu poszczególnych parametrów charakteryzujących dany odcinek przyjęto na tym samym poziomie ($\alpha=\beta=\gamma=\delta=0,25$). Zatem funkcja celu (1) przyjęła postać: $F=0,13y_2+0,12y_3+0,14y_4+0,21y_5+0,13y_6+0,16y_7+0,13y_8$. Przy obu współczynnikach ψ równych jedności, zadanie optymalizacyjne polegało na maksymalizacji tej funkcji, przy następujących ograniczeniach:

– zgodnie ze wzorem (2):

$$r_2+r_3+r_4+r_5+r_6+r_7+r_8 \leq R$$

– zgodnie ze wzorem (3):

$$\begin{aligned} 1r_2+1r_3+1r_4+0r_5+1r_6+0r_7+1r_8-y_2 &\geq 0 \\ 0r_2+1r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_3 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_4 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+1r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_5 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+1r_5+1r_6+1r_7+0r_8-y_6 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+1r_5+1r_6+1r_7+0r_8-y_7 &\geq 0 \\ 1r_2+1r_3+1r_4+0r_5+1r_6+0r_7+1r_8-y_8 &\geq 0 \end{aligned}$$

– zgodnie ze wzorem (4):

$$\begin{aligned} 1r_2+1r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+1r_8-y_2 &\geq 0 \\ 0r_2+1r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_3 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_4 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+0r_5+0r_6+0r_7+0r_8-y_5 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+0r_5+1r_6+0r_7+0r_8-y_6 &\geq 0 \\ 0r_2+0r_3+0r_4+1r_5+1r_6+0r_7+0r_8-y_7 &\geq 0 \\ 1r_2+1r_3+1r_4+0r_5+0r_6+0r_7+1r_8-y_8 &\geq 0 \end{aligned}$$

Obliczenia wykonano przy $R=1$ oraz $R=2$. W pierwszym przypadku pozwoliło to na osiągnięcie prawdopodobieństwa wykrycia zanieczyszczenia $P_{yR=1}=57,1\%$, gdy odcinkiem pomiarowym był r_4 , natomiast w drugim przypadku uzyskano $P_{yR=2}=85,7\%$, gdy odcinkami pomiarowymi były r_4 i r_6 .

Rozwiązania otrzymano wykorzystując do tego celu oprogramowanie LP, nieodpłatnie udostępnione przez Markusa Weidenauera. Do symulacji pracy sieci wykorzystano oprogramowanie do modelowania sieci wodociągowej Epanet 2.0 [18].

Podsumowanie

Przedstawiona metoda umożliwia wybór optymalnej liczby odcinków pomiarowych w odniesieniu do rozpatrywanych zanieczyszczeń oraz ich lokalizację z uwzględnieniem ograniczeń funkcji celu. Wprowadzone dwie grupy ograniczeń uwzględniają zarówno możliwość, jak i szybkość wykrycia zanieczyszczenia danego typu w rozpatrywanym odcinku pomiarowym. Ograniczenia te można wyznaczać stosownie do różnego typu zanieczyszczeń, co pozwala optymalnie wykrywać różnego rodzaju zanieczyszczenia mogące pojawić się w wodzie transportowanej w podsystemie dystrybucji. Uzupełnieniem odcinków pomiarowych na sieci, wybranych na podstawie przedstawionej metody, powinny być tak zwane punkty obiektowe, wśród których można wyróżnić:

- punkty zasilające podsystem dystrybucji wody (pompy lub zbiorniki zasilające sieć wodociągową,
- punkty obiektowe zlokalizowane w podsystemie dystrybucji wody (pompy sieciowe, zbiorniki sieciowe).

Punkty początkowe reprezentują jakość wody, która zasilą podsystem dystrybucji. Prowadzenie monitoringu w tych punktach umożliwia kontrolę pracy innych elementów systemu, a w szczególności stacji oczyszczania wody, co pozwala również na ustalenie, jakie wskaźniki jakości wody i w jakim stopniu ulegają zmianom podczas jej transportu.

Opracowana metoda wyboru miejsc pomiaru jakości wody w podsystemie dystrybucji wyróżnia się w stosunku do znanych dotychczas metod lokalizacji punktów monitorowania jakości wody tym, że punkty pomiarowe są lokalizowane na odcinkach sieci wodociągowej, a nie w węzłach, jak również tym, że wprowadza dodatkowe kryterium określające podatność odcinków sieci na awarie.

LITERATURA

1. B. H. LEE, R. A. DEININGER: Optimal locations of monitoring stations in water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering* 1992, Vol. 118, No. 1, pp. 5–16.
2. P. HARMANT, A. NACE, L. KIENE: An algorithm to optimize booster chlorination in water distribution network. In: Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, pp. 1–10.
3. H.-M. WOO, J.-E. YOON, D.-Y. CHOI: Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems. In: World Water and Environmental Resources Congress, Reston 2001, pp. 1–9.
4. A. OSTFELD, E. SALOMONS: Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2004, Vol. 130, No. 5, pp. 377–385.
5. A. OSTFELD, J. G. UBER, E. SALOMONS, J. W. BERRY, W. E. HART, C. A. PHILLIPS, J.-P. WATSON, G. DORINI, P. JONKERGOUW, Z. KAPELAN, F. DI PIERRO, S.-T. KHU, D. SAVIC, D. ELIADES, M. POLYCARPOU, S. R. GHIMIRE, B. D. BARKDOLL, R. GUELI, J. J. HUANG, E. A. McBEAN, W. JAMES, A. KRAUSE, J. LESKOVEC, S. ISOVITSCH, J. XU, C. GUESTIN, J. VANBRIESEN, M. SMALL, P. FISCHBECK, A. PREIS, M. PROPATO, O. PILLER, G. B. TRACHTMAN, Z. Y. WU, T. WALSKI: The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2008, Vol. 134, pp. 556–568.
6. W. E. HART, R. MURRAY: Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2010, Vol. 136, pp. 611–619.
7. G. DORINI, P. JONKERGOUW, Z. KAPELAN, D. SAVIC: SLOTS: Effective algorithm for sensor placement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2010, Vol. 136, pp. 620–628.
8. S. RATHI, R. GUPTA: Sensor placement methods for contamination detection in water distribution networks: A review. *Procedia Engineering* 2014, Vol. 89, pp. 181–188.
9. D. ELIADES, T. LAMBROU, C. PANAYIOTOU, M. POLYCARPOU: Contamination event detection in water distribution systems using a model-based approach. *Procedia Engineering* 2014, Vol. 89, pp. 1089–1096.
10. D. ELIADES, M. KYRIAKOU, M. POLYCARPOU: Sensor placement in water distribution systems using the S-PLACE Toolkit. *Procedia Engineering* 2014, Vol. 70, pp. 602–611.
11. A. AGRESTA, G. FATTORUSO, B. LANZA, M. FABBRICINO, M. TRIFUOGGI, S. de VITO, G. di FRANCIA: Applying numerical models and optimized sensor networks for drinking water quality control. *Procedia Engineering* 2015, Vol. 119, pp. 918–926.

12. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI: Metoda lokalizacji punktów pomiaru jakości wody w systemie monitoringu sieci wodociągowej (Localization method for water quality measuring points in water network monitoring system). *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 3, ss. 45–48.
13. R. MURRAY, T. HAXTON, R. JANKE, W.E. HART, J.W. BERRY, C.A. PHILLIPS: Sensor Network Design for Contamination Warning Systems: A Compendium of Research Results and Case Studies Using the TEVA-SPOT Software. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2010, EPA/600/R-09/141.
14. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI: Monitoring of water distribution system effectiveness using fractal geometry. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 2015, Vol. 63, No. 1, pp. 155–161.
15. D. KOWALSKI, B. KOWALSKA, M. KWIETNIEWSKI: Propozycja metodyki oceny prawidłowości lokalizacji punktów monitorowania jakości wody w sieciach wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 5, ss. 212–217.
16. J. HALL, J. SZABO, S. PANGULURI, G. MEINERS: Distribution System Water Quality Monitoring: Sensor Technology Evaluation Methodology and Results. A Guide for Sensor Manufacturers and Water Utilities. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2009, EPA/600/R-09/076.
17. M. SUDOL: Monitoring sieci wodociągowej dla potrzeb oceny niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.
18. L.A. ROSSMAN: Epanet 2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2000, EPA/600/R-00/057.

Sudol, M. Selection Method of Measurement Points for Changes in Water Quality in the Water Supply Network Monitoring System. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 3, pp. 41–46.

Abstract: Location of measurement points in the water quality monitoring system for water supply networks has been subject to extensive research. The aim was to develop methods for such a selection of points within the water distribution system, for which the conducted water analyses would represent quality of possibly the largest amount of water flowing through the selected network part. Many researchers select the network nodes to serve this purpose, associated with the pollutant entry in applications for water quality modelling. It should also be noted that continuous online measurements are limited to part of the water quality parameters. Only substances detectable with the installed detector are determined at a measurement point. Considering

these limitations, the paper presents the method for selection of measurement points based on links as basic elements of the water supply network. The model takes account of feasibility as well as detection rate of certain pollutant types in the measurement links. Besides, it allows for detection of various pollutant types in the distribution system. Apart from the measurement links within the network, object points such as pumps or network reservoirs should also be acknowledged. The method developed differs from other conventional methods for localization of water quality measurement points in the distribution system in that the points are located on the network links and not in the network nodes. Also, the method provides an additional determination criterion for failure susceptibility of the network sections.

Keywords: Water supply network, water quality, water pollution, measurement points, modelling, water supply networks management.