

Katarzyna Miszta-Kruk

Wykorzystanie krótkotrwałych stanów przejściowych w sieciach wodociągowych do wykrywania wycieków wody

Straty wody z sieci dystrybucyjnej są bez wątpienia znaczącym problemem wielu przedsiębiorstw wodociągowych. Fakt ten znajduje odzwierciedlenie w działaniach podejmowanych w celu wykrywania i zmniejszania wycieków wody, co jest o tyle trudne, że zjawisko to jest przeważnie skutkiem uszkodzeń występujących losowo. Wycieki z sieci wodociągowej mogą być określane różnymi metodami, zależnie od dostępnych narzędzi, materiałów użytych do budowy przewodów czy sposobu i lokalizacji pomiarów. W wielu publikacjach podejmuje się próby klasyfikacji metod służących wykrywaniu wycieków wody, jednak w zależności od sposobu podejścia, różni autorzy charakteryzują je w różny sposób [1–9]. W praktyce stosuje się wiele różnych metod i strategii mających na celu ograniczenie strat wody.

Według raportu ogłoszonego w 2011 r. przez Najwyższą Izbę Kontroli, straty wody w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych w Polsce wynoszą od 11% do prawie 70% [10]. Jako główne przyczyny podaje się awarie wodociągów, niekontrolowane wycieki wody, niedokładność urządzeń pomiarowych oraz tzw. nierejestrowane zużycie wody. W porównaniu z danymi NIK, w 31 przebadanych przedsiębiorstwach wodociągowych w Wielkiej Brytanii zanotowano ponad 23% strat wody wywołanych pęknięciami przewodów [11].

Wśród powszechnie znanych metod służących do wykrywania wycieków wody z sieci dystrybucyjnej, jak metody bilansowe czy akustyczne, uważane za najbardziej skuteczne, są również różne metody będące połączeniem monitoringu sieci z wiedzą ekspercką. Inna grupa rozwiązań to bardzo dobrze rozbudowana diagnostyka osłuchowa, obecnie najbardziej popularna i najszerzej stosowana. Polega ona na lokalizacji wycieku w terenie poprzez stwierdzenie anomalii w falach dźwiękowych towarzyszących przepływowi wody. Metoda ta ma jednak ograniczenia, wynikające z rodzaju osłuchiwanego materiału. Grupą metod, która obecnie bardzo intensywnie się rozwija, są techniki najbardziej złożone i zaawansowane technologicznie, bazujące między innymi na modelu symulacyjnym sieci wodociągowej, systemie GIS, algorytmach genetycznych, bardzo dokładnych pomiarach wartości parametrów hydraulicznych pracy sieci czy szeregu towarzyszących algorytmów. Przy tak szerokim podejściu, symulacja bieżącej pracy sieci wodociągowej z użyciem niepełnych danych

(prognozowanie) polega na wykorzystywaniu i łączeniu różnych metod i narzędzi, które się wzajemnie uzupełniają [6, 7], przy czym wiele rozwiązań z tej grupy ma wiele wad.

Niniejszy artykuł przedstawia możliwości i ograniczenia nowych rozwiązań, będących połączeniem zaawansowanych narzędzi i technologii wykrywania wycieków wody, których głównym elementem jest wykorzystanie krótkotrwałych stanów przejściowych w postaci metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych.

Krótkotrwałe stany przejściowe

Istotą omawianej metody jest analiza kontrolowanego uderzenia hydraulicznego lub inaczej stanów krótkotrwałych, wytwarzanych w sieci wodociągowej. Polega ona na badaniu i modelowaniu zachowania się wody w sieci podczas krótkotrwałych zmian – zazwyczaj ciśnienia i/lub przepływu – w dopuszczalnych granicach oraz ich opomiarowaniu w odpowiednich miejscach sieci wodociągowej. Kolejnym etapem jest modelowanie tych stanów za pomocą symulacji numerycznych oraz ocena symulowanych i zmierzonych wartości badanych parametrów sieci wodociągowej. Powstałe zdarzenia są skutkiem dużych lub małych zmian w sieci wywołanych naturalnie lub sztucznie, przy czym stany te wywołują względnie duże zmiany w systemie wodociągowym – w obrębie ciśnienia – w bardzo krótkim czasie (sekundy, minuty), tak więc przekazują dobrą informację o stanie systemu. Jednakże podstawowa trudność polega na skutecznym i wystarczającym wykorzystaniu wyników analizy zjawiska, jakim jest uderzenie hydrauliczne w połączeniu z pomiarami ciśnienia i przepływu wody, które często są maskowane przez różnego rodzaju szumy. Zakres metod opartych na wykorzystaniu krótkotrwałych stanów przejściowych pokazuje, że mogą one być stosowane zarówno do wykrywania powolnych wycieków wody do gruntu, wynikających np. z rozszczerzeń, jak i nagłych pęknięć przewodów [12].

Metody

Metoda polegająca na wywołaniu krótkotrwałych zmian jednego z badanych parametrów jest względnie nowa. W latach 90. XX w. R. S. Pudar i J. A. Liggett [3] opracowali jej teoretyczne podstawy z uwzględnieniem stanu równowagi w sieci wodociągowej. Niestety jednak rzeczywiste warunki pracy sieci wodociągowej są dalekie od stanu równowagi, co sprawiło, że analiza ta była niewystarczająca do

ciągłego monitorowania systemu wodociągowego. Dalsze badania powstałe na tej podstawie pozwoliły na użycie danych z pomiarów zasymulowanego zjawiska do zastosowania w algorytmie obliczeniowym [4, 5]. Metoda ta została określona jako Inverse Transient Analysis (ITA), czyli technika wykorzystująca krótkotrwałe stany przejściowe lub kontrolowane uderzenia hydrauliczne. Procedura wykrywania wycieków wody z zastosowaniem tego rozwiązania przebiega według trzech głównych etapów [1, 13]:

- wywołuje się sztucznie powstałe zdarzenie w sieci przez zmianę wartości przepływu lub wysokości ciśnienia w niektórych miejscach sieci (np. w dowolnym przekroju, jeżeli to możliwe blisko przekroju – zaworu, hydrantu, pompy); wywołane zdarzenie musi jednak pozostać w założonych granicach ciśnienia lub przepływu,

- mierzy się charakterystyki, najlepiej ciśnienia (lub przepływu – jeśli to możliwe) dla powstałego impulsu chwilowej sytuacji za pomocą wysokiej klasy przetworników ciśnienia,

- w wielu lokalizacjach na sieci (punkty pomiarowe) na podstawie zebranych charakterystyk modeluje się dalszy przebieg zjawiska numerycznie; w klasycznym podejściu do prawidłowej symulacji numerycznej w metodzie charakterystyk niezbędne jest podanie możliwie dokładnie i szczegółowo warunków początkowych i brzegowych, co wiąże się z tym, że wymagania te wprowadzają możliwość popełnienia licznych błędów mających wymierny wpływ na wynik symulacji.

Proces kalibracji ułatwia technika optymalizacji funkcji celu (E), którą jest minimalizacja sumy kwadratów różnic między zmierzonymi i obliczonymi wartościami ciśnienia wody w sieci, według równania:

$$E = \sum_{i=1}^M (h_i^m - h_i)^2 \quad (1)$$

w którym:

h_i^m – zmierzona wysokość ciśnienia, mH₂O

h_i – wysokość ciśnienia obliczona numerycznie, mH₂O

M – liczba pomiarów

Model ten oparty jest na założeniu, że symulacja dobrze odzwierciedla działanie systemu. W przeciwieństwie do stabilnego modelowania hydraulicznego sieci, kontrolowane uderzenia hydrauliczne mogą dostarczyć dużą liczbę danych wymaganą do pomyślnej kalibracji. Autorzy pracy [14] użyli standardowej techniki optymalizacji L-M (Levenberga-Marquardta) w celu dopasowania danych pomiarowych do wyników liczbowych modelu. Problemem metody L-M jest to, że jeśli model jest źle dobrany albo dane zawierają wartości odstające, to rozwiązanie algorytmu może prowadzić do braku zbieżności.

Należy podkreślić, że ciśnienie jest funkcją nieznaną przestrzeni/obszaru wycieku i potencjalnie innych parametrów kalibracyjnych, takich jak nieznaną rzeczywistą chropowatość przewodu czy prędkość fali. Jednak jest oczywiste, że we wzorze (1) mogą być zastosowane inne funkcje celu, wyrażone np. metodą najmniejszych kwadratów (najmniejszych błędów bezwzględnych) [5]. Symulacja krótkotrwałych stanów przejściowych może być kalibrowana na podstawie przepływów, a także ciśnień [15]. Stosowana funkcja celu jest uzależniona od dwóch zbiorów ograniczających:

- zbiór równań przepływów nieustalonych zawierający wyniki otrzymane z modelu,

- zbiór prostych warunków brzegowych (minimum i maksimum) zawierający dane z pomiarów.

W metodzie wykorzystującej krótkotrwałe stany przejściowe analizę przeprowadza się na całej długości przewodu, prowadząc obliczenia od dolnego do górnego końca przewodu z uwzględnieniem tylko jednego okresu teoretycznej fali ciśnienia lub przepływu. W tym celu wykorzystuje się podstawowe równania ciągłości i zasady pędu:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + J = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

w których:

$H(x, t)$ – ciśnienie piezometryczne (suma ciśnienia i rzędnej węzła), mH₂O

$V(x, t)$ – prędkość wody, m/s

c – prędkość fali, m/s

g – przyspieszenie grawitacyjne, m/s²

J – współczynnik straty, który może być określony w stanie ustalonym, *quasi*-liniowym oraz nieustalonym

l – długość przewodu, m

x – odległość wzdłuż przewodu (krok między węzłami), m

t – czas, s

Równania (2) i (3) są prawdziwe w przypadku przepływu w przewodach elastycznych przy ustalonych właściwościach przewodu i cieczy (średnica, prędkość fali, temperatura itp.). Wzory te są podstawą do określenia wstępnych i brzegowych warunków opisujących wejściowe warunki przepływu i odpowiednio warunków przepływu w każdej końcówce przewodu w systemie. Z uwagi na duży wpływ sposobu określania strat na wyniki wykrywania i określania wielkości wycieków, najczęściej współczynniki strat w zjawiskach szybkozmiennych określane są z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Jest to szczególnie ważne w modelach, w których występują straty niestabilne, np. kiedy ma miejsce reologiczny przebieg zjawiska (zmiana naprężeń w czasie przy stałych odkształceniach wskutek płynięcia materiału) i inne efekty dynamiczne.

Występują różne modyfikacje metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych, jedną z metod, różniącą się od przedstawionego podejścia, jest pomijanie w rozważaniach pierwszego efektu występowania zjawiska uderzenia hydraulicznego, a mianowicie np. czasu i sposobu zamykania zaworu. W metodzie tej analiza rozpoczyna się w przekroju końcowym przewodu, ale już po całkowitym zamknięciu zaworu. Zakłada się, że sposób i czas zamykania zaworu jest już uwzględniony w pomierzonych chwilowych wartościach ciśnienia i przepływu w danym przekroju. Dlatego też na potrzeby tej metody zmodyfikowano równania charakterystyk do postaci [16]:

$$Q_{i,j} - Q_{i+1,j+1} + \frac{gA}{a} (H_{i,j} - H_{i+1,j+1}) - + RQ_{i,j} |Q_{i+1,j+1}| \Delta t = 0 \quad (4)$$

$$Q_{i,j} - Q_{i+1,j-1} + \frac{gA}{a} (H_{i,j} - H_{i+1,j-1}) + + RQ_{i,j} |Q_{i+1,j-1}| \Delta t = 0 \quad (5)$$

w których $Q_{i,j}$ oraz $H_{i,j}$ są chwilowymi wartościami przepływu oraz wysokości ciśnienia piezometrycznego w i -tym węźle w j -tym kroku czasowym. Za pomocą zaproponowanego układu równań charakterystyk określa się chwilowe warunki przepływu w każdym węźle w kroku czasowym 't', a następnie we wszystkich węzłach 'x' wstecznie, od

końca przewodu do jego początku. W wyniku takiego postępowania możliwe jest przenoszenie znanych warunków z przekroju do przekroju. Wielkość wycieku zależy wówczas między innymi od wielkości otworu, jego kształtu i nierówności powierzchni wylotowej, ale również od jego lokalizacji i poziomu wód gruntowych w stosunku do rzędnej posadowienia rurociągu.

Przy innych rozwiązaniach tej metody autorzy pracy [17] wykorzystali modyfikację równań (4) i (5) w celu uwzględnienia lepkościowych mechanizmów ścianek przewodów z PVC. Aby można było modelować wyciek o kształcie otworopodobnym, wyciek węzłowy opisano następującym modelem:

$$Q_1 = C_1 A_1 \sqrt{2g(H_1 - z)} \quad (6)$$

w którym:

Q_1 – wyciek węzłowy wody w przekroju '1', m³/s

H_1 – całkowita wysokość ciśnienia w miejscu wycieku, mH₂O

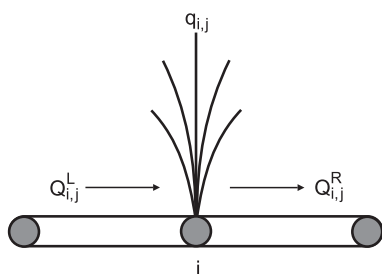
$C_1 A_1$ – rzeczywista przestrzeń wycieku (efektywna powierzchnia wycieku), m²

z – rzędna wycieku/węzła, m

g – przyspieszenie grawitacyjne, m/s²

W przypadku niustalonych warunków przepływu bardzo ważne jest prawidłowe uwzględnienie strat energii wynikających z lepkości wody. W szybkozmiennych warunkach przepływu naprężenia ścinające przy ścianie przewodu nie podlegają zmianom *quasi*-liniowym. Dlatego w tych warunkach należy dopasować lepszy model określenia strat. Wpływ wody w *i*-tym węźle jest związany z przepływem przed *i*-tym węźlem i z przepływem po *i*-tym węźle zależnością [16] (rys. 1):

$$Q_{i,j}^L = q_{i,j} + Q_{i,j}^R \quad (7)$$



Rys. 1. Schemat wycieku węzłowego wraz z przyjętymi oznaczeniami [16]

Fig. 1. Schematic diagram of a node leakage along with designations adopted [16]

W modyfikacjach metod kontrolowanych uderzeń hydraulicznych zakłada się, że każdy rozpatrywany węzeł jest potencjalnym miejscem wycieku wody z założeniem, że na całej długości analizowanego przewodu wartość $C_1 A_1$ jest w przekroju stała. Przy założonej wartości $C_1 A_1$ w pierwszym węźle wylicza się wysokość ciśnienia piezometrycznego i porównuje z wartościami obserwowanymi. Tak obliczone wyniki przenosi się na kolejne węzły, zachowując schemat postępowania według zależności:

$$H_{n-1, j+1} = \varphi(C_1 A_1) \quad (8)$$

$$H_{n-2, j+2} = \varphi(C_1 A_1, C_{1-1} A_{1-1}) \quad (9)$$

$$H_{1, j+n-1} = \varphi(C_1 A_1, C_{1-1} A_{1-1}, \dots) \quad (10)$$

w których:

φ – specjalna funkcja, zawierająca w sobie między innymi niustalone straty wody [16]

W tej postaci metoda ta jest metodą kolejnych przybliżeń – prób i błędów, w której wykorzystuje się narzędzia optymalizacji do minimalizowania różnic pomiędzy wielkościami założonymi i otrzymanymi w wyniku obliczeń. Identyfikacja parametru wycieku w tej metodzie jest problemem optymalizacyjnym, w którym zachowania systemu są symulowane przez impuls przemieszczający się od wlotu do wylotu. Podstawą tej analizy jest schemat oparty na równaniach charakterystyk, jak w analizie uderzenia hydraulicznego. Do symulacji zjawiska wykorzystuje się moduł optymalizacyjny – różnica pomiędzy obserwowaną i wyliczoną zmienną jest minimalizowana z użyciem algorytmu optymalizacyjnego. Minimalizowanie średnich reszt kwadratowych między wartościami obserwowanymi i obliczonymi następuje według wzoru (1). Obserwowane dane są najczęściej pomiarami ciśnienia, natomiast nieznanne mogą być wartości straty (szorstkości) i współczynnika tarcia, a także zmiana odkształcenia elementu w czasie pod wpływem stałego naprężenia (obciążenia) w stałej temperaturze (pełzanie), objętość powietrza podczas kawitacji itp. Do rozwiązania tego problemu stosowane są dwie funkcje celu – zwykła i średnia ważona sum reszt kwadratowych.

Metody optymalizacji

Wykorzystanie krótkotrwałych stanów przejściowych wymaga zastosowania odpowiedniej metody optymalizacji, ponieważ analizowany problem dotyczy dużej skali – rozległa sieć wodociągowa. W tym celu najlepiej sprawdzały się algorytmy genetyczne (AG), funkcje optymalizacji Levenberga-Maguardta (L-M) i inne metody, jak na przykład SCE-UA [18]. Metoda L-M jest algorytmem iteracyjnym optymalizacji nieliniowej, łączącym w sobie cechy metody największego spadku i metody Gaussa-Newtona. Pozwala na znalezienie jednego rozwiązania wychodząc z początkowej iteracji. Jest stosunkowo szybka i efektywna w pokonywaniu wielu trudności, jednak wymaga (przy każdej iteracji) wyznaczenia na nowo wrażliwości (pochodnych cząstkowych), oprócz wyznaczenia funkcji celu. Główną wadą tej metody jest natomiast wyznaczanie macierzy odwrotnej, który to proces w praktyce jest przeprowadzany w sposób przybliżony. Algorytm radzi sobie z zadaniami obejmującymi powyżej tysiąca parametrów, jednakże w przypadku zadań o umiarkowanej liczbie parametrów (rzędu kilkuset) metoda L-M jest dużo szybsza.

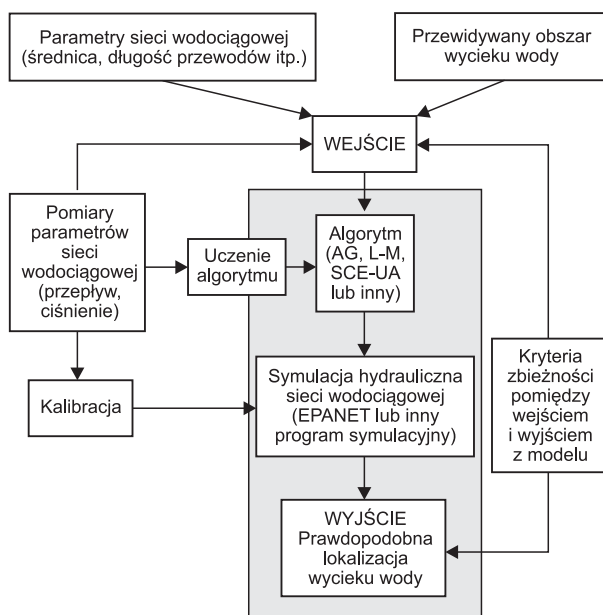
Przeciwieństwem metody L-M jest stosowanie algorytmów genetycznych, które są rodzajem algorytmu przeszukującego przestrzeń alternatywnych rozwiązań problemu w celu wyszukania najlepszego rozwiązania. Sposób działania algorytmów genetycznych nieprzypadkowo przypomina zjawisko ewolucji biologicznej, ponieważ ich twórca John Henry Holland w swoich pracach czerpał inspiracje z biologii. Metodę AG zalicza się do grupy algorytmów ewolucyjnych. Używając takich narzędzi, jak selekcja, krzyżowanie i mutacja można rozwiązywać różne problemy optymalizacyjne. Algorytmy genetyczne zawierają skuteczne mechanizmy przeszukiwania dużych przestrzeni rozwiązań. Są one bardziej niezależne od wstępnej inicjalizacji oraz mniej skłonne do znajdowania lokalnych rozwiązań w miejsce optymalnych. Przykładem może być zagadnienie grupowania, w którym w miejsce klasycznych algorytmów z powodzeniem stosuje się algorytmy genetyczne [19].

W latach 90. XX wieku z powodzeniem wykorzystano obie metody (L-M i AG) do rozwiązywania problemów związanych z zastosowaniem krótkotrwałych stanów

przejściowych. Funkcja celu została określona jako minimalizacja różnicy bezwzględnej pomiędzy pomierzoną i obliczoną (przewidywaną) wartością ciśnienia wody w węzłach sieci. Parametrami do kalibracji były (wg wzoru Darcy-Weisbacha) współczynnik chropowatości przewodów i efektywny obszar wypływu węzłowego. Po sukcesie zastosowania tego podejścia i przeanalizowaniu zalet i wad obu algorytmów do optymalizacji metody krótkotrwałych stanów przejściowych zastosowano algorytm hybrydowy powstały z połączenia metod L-M i AG [15]. W ten sposób powstał algorytm lepiej dostosowany do specyfiki rozwiązywanego problemu – hybrydowy algorytm genetyczny. To połączenie pozwoliło na stworzenie uniwersalnego programu zarządzającego dużą liczbą obliczeń oraz wykorzystanie możliwości obliczeń równoległych (algorytmów genetycznych i symulowanego wydarzenia), co było bardzo ważne w przypadku symulacji pracy sieci wodociągowej.

Procedura zastosowania

Przedstawiona metoda wykrywania wycieków wody została przetestowana zarówno numerycznie, jak i laboratoryjnie. Obecnie są sygnały w literaturze świadczące o próbach kompleksowego zastosowania przedstawionego rozwiązania w konkretnych przedsiębiorstwach wodociągowych w Wielkiej Brytanii [20]. Procedura zastosowania omawianego narzędzia jest związana z zastosowaniem wielu metod, programów i narzędzi. Schematyczne podejście do wykrywania wycieków wody z sieci przedstawiono na rysunku 2, na którym podano podstawowe etapy postępowania z wykorzystaniem metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych.



Rys. 2. Schemat zależności poszczególnych elementów metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych

Fig. 2. Schematic diagram of correlations between the individual elements of water hammer analysis

Dokładność metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych zależy od liczby i jakości pomiarów (np. planu pobierania próbek), na równi z optymalną lokalizacją punktów pomiarowych na sieci wodociągowej [21, 22]. Metody wykonywania pomiarów są nadal postrzegane jako narzędzia pozwalające na uzyskiwanie danych, jednak niewystarczająco rozpoznane szczególnie w aspekcie wyznaczania punktów pomiarowych na sieci wodociągowej.

Niestety są to główne źródła błędów, które mają ogromny wpływ na wynik, tak więc użytkownicy tej metody powinni być świadomi błędów wynikających z jej ograniczeń. Ma to wpływ przede wszystkim na powstawanie szumów w zmiennych pomiarowych i dokładności kalibracji oraz danych wejściowych do modelu i błędów strukturalnych [23]. Ostatnie badania eksperymentalne w zakresie kontrolowanych uderzeń hydraulicznych wykazały, że możliwe jest wykrywanie i lokalizowanie wycieków z przewodów wykonanych z PVC z dokładnością w zakresie od 4% do 15% całkowitej długości przewodów wodociągowych [24]. Świadczy to o dobrym wykorzystaniu metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych w przestrzeni, gdzie inne metody wykazują dużo większe błędy. Związane jest to z wykrywalnością wycieków na sieci wodociągowej w zależności od materiału, z jakiego dana sieć została wykonana.

Podsumowanie

Do zalet metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych należy zaliczyć niewielkie koszty, nieinwazyjny charakter wykrywania wycieków wody na dużych odległościach w stosunku do metod wykorzystujących urządzenia akustyczne i mniejszą wrażliwość na chropowatość przewodów. Metoda ta może być stosowana we wszystkich konfiguracjach sieciowych, jednak w praktyce jej zastosowanie w rzeczywistym systemie dystrybucji wody jest nadal ograniczone ze względu na wiele realnych trudności, takich jak:

- sieci z dużą liczbą pierścieni, z różnymi przyłączami, które mogą szybko tłumić wszelkie indukowane stany przejściowe,
- trudności w różnicowaniu przejściowych fal odbicia ze względu na nieszczelności i inne zdarzenia operacyjne, takie jak zmiana poboru wody, przełączanie pomp, zamknięcia i otwarcia zasuw,
- ryzyko indukowanych stanów przejściowych powodujących wycieki i zanieczyszczenia wody, a powstające w wyniku włamania do sieci wodociągowej,
- problemy z kalibracją prędkości i odbicia fal ciśnienia w węzłach (hałas) w złożonych systemach dystrybucji wody,

Uzyskanie wymiernych informacji o wyciekach wody dokonuje się dzięki połączeniu kilku narzędzi do identyfikacji nieszczelności w sieciach wodociągowych. Podstawowym czynnikiem wpływającym na sprawność wykrywania nieszczelności jest dokładna kalibracja zdarzeń niustalonych i warunków brzegowych. Przez odpowiednie wykorzystanie wyników pomiarów – najczęściej ciśnienia wody – można wyraźnie zaobserwować występowanie krótkotrwałych zdarzeń i zminimalizować różnice pomiędzy pomierzonymi i obliczonymi wartościami parametrów [9].

Przykładowo, metoda kontrolowanych uderzeń hydraulicznych może służyć jako dodatek do analiz prowadzonych z wykorzystaniem badań akustycznych, pomagając tym samym zawęzić lokalizację nieszczelności w dużych sieciach wodociągowych. Ważne jest, aby badania systemów wodociągowych były wykonywane w ściśle kontrolowanych warunkach, w celu zminimalizowania wpływu niewiadomych, które mogą pojawić się w warunkach rzeczywistych. Systematyczna realizacja pomiarów terenowych z użyciem metody kontrolowanych uderzeń hydraulicznych może być podstawą do jej praktycznego wykorzystania w eksploatacji systemów wodociągowych.

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach zrealizowanego w latach 2013–2015 projektu nr PBS1/B9/15/2012 pt. „Wodnik – innowacyjny system do wykrywania wycieków oraz optymalnego sterowania w sieciach wodociągowych, oparty na zdalnie przesyłanych danych pomiarowych”.

Partnerzy projektu: Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej oraz firma Telium J. Klimkowski, D. Warowny s.c.

LITERATURA

1. Z. Y. WU, M. FARLEY: Water Loss Reduction. Bentley Institute Press, Exton (PA, USA) 2013
2. H. E. MUTIKANGA, S. K. SHARMA, K. VAIRAVAMOORTHY: Methods and tools for managing losses In Water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2013, Vol. 139, No. 2, pp. 166–174.
3. R. S. PUDAR, J. A. LIGGETT: Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 1992, Vol. 118, No. 7, pp. 1031–1046.
4. G. A. NASH, B. KARNEY: Efficient inverse transient analysis in series pipe systems. *Journal of Hydraulic Engineering* 1999, Vol. 125, No. 7, pp. 761–764.
5. J. VITKOVSKY, A. SIMPSON, M. LAMBERT: Leak detection and calibration issues using transient and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2000, Vol. 126, No. 4, pp. 262–265.
6. S. SPERUDA, R. RADECKI: Ekonomiczny poziom wycieków – modelowanie strat w sieciach wodociągowych. Translator s.c., Warszawa 2003.
7. R. PUUST, Z. KAPELAN, D. SAVIC, T. KOPPEL: A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal* 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 25–45.
8. R. PUUST, Z. KAPELAN, D. SAVIC, T. KOPPEL: Probabilistic leak detection in pipe using the SCEM-UA algorithm. Proc. of 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati (Ohio, USA) 2006, pp. 1–12.
9. B. KARNEY, D. KHANI, M. R. HALFAWY, O. HUNAIDI: A simulation study on using in verse transient analysis for leak detection in water distribution networks. Proc. of the International Stormwater and Urban Water Systems Modeling Conference, Toronto (Ontario) 2008, pp. 1–21.
10. Prowadzenie przez gminy zbiorowego zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków. Informacja o wynikach kontroli. Najwyższa Izba Kontroli, raport nr 128/2011/P/10/140/LKI, Warszawa 2011.
11. WRc. Water Industry: Managing Leakage 2011 (10/WM/08/42) Water Services Association, Water Companies Association, UKWIR, UK 1994, 2011.
12. A. F. COLOMBO, P. LEE, B. W. KARNEY: A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research* 2009, Vol. 2, pp. 212–227.
13. J. THORTON, R. STURM, G. KUNKEL: Water Loss Control. McGraw Hill, 2008.
14. J. A. LIGGETT, L. C. CHEN: Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 1994, Vol. 120, No. 8, pp. 934–955.
15. Z. S. KAPELAN, D. SAVIC, G. WALTER: A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research* 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 481–492.
16. A. HAGHIGHI, D. COVAS, H. RAMOS: Direct backward transient analysis for leak detection in pressurized pipelines: from theory to real application. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 2012, Vol. 61, No. 3, pp. 189–200.
17. A. K. SOARES, D. I. C. COVAS, L. F. R. REIS: Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering* 2008, Vol. 134, No. 9, pp. 1389–1394.
18. J. P. VITKOVSKY, A. R. SIMPSON, M. F. LAMBERT: Leak detection and calibration issues using transient and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2000, Vol. 126, No. 4, pp. 262–265.
19. D. E. GOLDBERG: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. WNT, Warszawa 1998.
20. Z. Y. WU, P. SAGE, D. TURTLE: Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2010, Vol. 136, No. 1, pp. 116–128.
21. Z. S. KAPELAN, D. SAVIC, G. WALTER: Optimal sampling design methodologies for WDS model calibration. *Journal of Hydraulic Engineering* 2005, Vol. 131, No. 1, pp. 190–200.
22. P. J. LEE, J. P. VITKOVSKY, M. F. LAMBERT, A. R. SIMPSON, J. A. LIGGETT: Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks. *Journal of Hydraulic Engineering* 2005, Vol. 131, No. 7, pp. 596–604.
23. J. P. VITKOVSKY, M. F. LAMBERT, A. R. SIMPSON, J. A. LIGGETT: Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2007, Vol. 133, No. 6, pp. 519–530.
24. A. K. SOARES, D. I. C. COVAS, L. F. R. REIS: Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system. *Journal of Hydroinformatics* 2011, Vol. 13, No. 2, pp. 153–166.

Miszta-Kruk, K. Employment of the Inverse Transient Analysis to Leakage Detection in Water Distribution Networks. *Ochrona Środowiska* 2016, Vol. 38, No. 1, pp. 39–43.

Abstract: Leakage from water pipe networks is a significant problem for water distribution companies. An analysis of those events is quite difficult because leakages result mostly from randomly occurring damages. In this paper, methods of leakage detection in water pipes are presented on the basis of analysis of short-lived transient states in water pipe networks. This analysis belongs to the family of Inverse Transient Analysis (ITA) methods and requires generation of short-lived states of acceptable values, mainly of pressure and/or flow, and their measurement at suitable points of the network. An important

feature of methods aimed at short-lived events is provocation of significant changes in pressure measurements within a short period of time. A key factor in leak detection is precise calibration of transient events and determination of adequate boundary conditions. By using the collected pressure data it is possible to observe the occurrences of transient events and to minimize the difference between the observed and the calculated parameters. The ITA methods were tested and verified mainly in laboratory conditions. Major practical issues and difficulties in applying those methods in the actual water supply systems are discussed on the basis of the presented analysis.

Keywords: Water distribution network, water losses, modeling, simulation.