

INTELIĞENTNA SIEĆ WODOCIĄGOWA – PRÓBA OKREŚLENIA POTRZEB I MOŻLIWOŚCI

Ryszard WYCZÓŁKOWSKI

Streszczenie: W artykule przedstawiono próbę przedstawienia kierunków rozwoju „inteligencji” w sieciach wodociągowych oraz określenia potrzeb i możliwości w zakresie wdrażania nowoczesnych technologii i związanych z nimi metod w zarządzaniu rozdzielczymi sieciami wodociągowymi. Zwrócono uwagę na problem wykrywania wycieków z sieci, jako istotny element procesów zarządzania siecią wodociągową. Przedstawiono typowe, tradycyjne metody wykrywania i lokalizacji wycieków wskazując ich największe bolączki i pokazując w jaki sposób nowoczesne, „inteligentne” systemy monitorowania sieci te bolączki zmniejszają, wskazując jednocześnie na problemy z wdrożeniem takich systemów.

Słowa kluczowe: system wodociągowy, diagnozowanie i monitorowanie, SmartGrid

1. Wprowadzenie

W kontekście wdrażania nowoczesnych technologii (w tym ICT – Information and Communication Technology) przymiotnik „Smart” pojawia się coraz częściej. Mamy *SmartCity*, *SmartHome*, *SmartGrid*, *SmartMaintenance* [7]. Kiedy słyszy się o „inteligentnych sieciach” najczęściej mowa jest o sieciach energetycznych ale termin ten coraz częściej pojawia się w odniesieniu do innych sieci przemysłowych – wodociągowych kanalizacyjnych, czy ciepłowniczych.

Rozdzielcze sieci wodociągowe są największym i najdroższym elementem systemu zaopatrywania w wodę, a ich eksploatacja jest trudnym zadaniem, stawiającym przed przedsiębiorstwami wodociągowymi specyficzne wyzwania techniczne, organizacyjne i ekonomiczne. Nakłada się na nie obowiązek racjonalnego gospodarowania olbrzymim majątkiem, jednocześnie wymagając działań ekonomicznie nieracjonalnych, np. przyłączenie do sieci wodociągowej niewielkich grup odległych odbiorców. Ze względu na specyfikę działania przedsiębiorstwa wodociągowe:

- są tzw. monopolistami lokalnymi, jednak nie mogą one swobodnie kształtować cen wody, gdyż cena ta podlega (w pewnym stopniu) kontroli społecznej,
- muszą mierzyć się zarówno z wyzwaniami przyszłości, wiążącymi się z niekorzystnymi zjawiskami takimi jak suburbanizacja (rozlewanie się) miast i zmniejszanie się zasobów wody pitnej),
- uwzględniać pozostałości przeszłości, w postaci starych i wyeksploatowanych sieci wodociągowych wykonanych z różnych materiałów – żeliwa, stali, azbestocementu, PCV, PE.

Opublikowany w roku 2002 raport Najwyższej Izby Kontroli „Informacja o wynikach kontroli zaopatrzenia w wodę ludności aglomeracji miejskich” określał straty spowodowane wyciekami, w obrębie aglomeracji miejskich powyżej 200 tysięcy mieszkańców, na średnim poziomie 19.9%, przy rozpiętości strat w badanych miastach od

5.5% do 25.5%.

Opublikowany w 2011r. kolejny raport NIK, „Prowadzenie przez gminy zbiorowego zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków” obejmujący 10 przedsiębiorstw wodociągowych z terenu województw małopolskiego, mazowieckiego, podkarpackiego, śląskiego i świętokrzyskiego wykazał straty wody od ok. 10% do ok. 69%.

Wśród głównych przyczyn tych strat wymieniane są awarie sieci wodociągowej, niekontrolowane wycieki, niedokładność urządzeń pomiarowych oraz tzw. nierejestrowane zużycie. W objętym tym raportem okresie w skontrolowanych podmiotach stwierdzono 3863 awarii sieci wodociągowych, w tym 1996 w sieci rozdzielczej a 1710 na przyłączach do odbiorców.

Z powyższych wyników widać że, jedną z największych barier dla efektywnego funkcjonowania sieci wodociągowych jest problem strat wody wywołanych awariami sieci. Należy zaznaczyć, że na awaryjność sieci i związane z nią straty wody mają przede wszystkim wpływ czynniki o charakterze lokalnym, co utrudnia jednoznaczną wzajemną ocenę porównawczą wysokości strat w różnych miejscach w Polsce.

Np. na Śląsku główne problemy to: zaawansowany wiek eksploatowanych sieci wodociągowych i szkody górnicze. W utworach gruboziarnistych i skalistych woda z wycieku wnika w grunt [20] – przez co awaria nie manifestuje się w sposób typowy, wpływem wody na powierzchnię, nawet dla dużych wycieków. Taki problem występuje np. w Bielsku-Białej.

Na poziom strat wpływa również sposób i zakres sterowania ciśnieniem w rozdzielczej sieci wodociągowej. Wysokość ciśnienia w sieci przekłada się bowiem na ilość wody przesączającej się przez połączenia i uciekającej w sytuacjach awaryjnych. Stąd oczywiste zalecenie, że ciśnienie w sieci powinno być możliwe niskie, ale zapewniające skuteczną dostawę wody do użytkowników. Najczęściej problem sterowania jest rozwiązywany poprzez montaż czujnika pomiarowego w „krytycznym” miejscu sieci, czyli w miejscu o najniższym ciśnieniu. Jednakże, przy zmieniających się w czasie rozbiórach wody (chwilowym zużyciu wody), punkt „krytyczny” charakteryzuje się zmienną lokalizacją, co powoduje, że taki sposób sterowania siecią wodociągową nie zawsze jest w pełni skuteczny. Problem staje się jeszcze bardziej złożony w sieciach, które mają więcej niż jeden punkt zasilania.

W kontekście powyższych argumentów staje się oczywiste, że jednym z kierunków wykorzystania zaawansowanych technologii ICT jest zwiększenie skuteczności wykrywania i lokalizacji awarii oraz optymalizowanie sterowania ciśnieniem w sieci wodociągowej. Prowadzone w tym zakresie prace badawcze, jak również opracowywane i wdrażane w praktyce rozwiązania narzędziowe, łączy obecnie wspólne miano „sieci inteligentnej”. Pojęcie to ma jednak w odniesieniu do poszczególnych rozwiązań różny zakres znaczeniowy wynikający z dużej różnorodności sieci eksploatowanych przez około 2500 przedsiębiorstw wodociągowych o różnej wielkości, zasobności, kwalifikacjach kadr, zapleczu naukowo-badawczym i technologicznym.

W związku z tym, w dalszej części artykułu podjęto próbę przeanalizowania potrzeb w zakresie sterowania oraz monitorowania i diagnostyki rozdzielczych sieci wodociągowych, a także możliwości ich zaspokojenia poprzez wdrażanie nowoczesnych technologii.

Artykuł jest wynikiem badań statutowych, realizowanych w Instytucie Inżynierii Produkcji na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej, w ramach pracy BK-223/ROZ3/2015.

2. Przegląd i analiza istniejących sposobów wykrywania i lokalizacji awarii sieci wodociągowych

Metody poszukiwania wycieków można podzielić na trzy zasadnicze grupy: wykrywanie wycieków, wstępna lokalizacja i lokalizacja dokładna (z dokładnością do szerokości wykopu potrzebnego do odsłonięcia przewodu wodociągowego i usunięcia awarii) [2].

Zdaniem autora, do metod najbardziej reprezentatywnych należą:

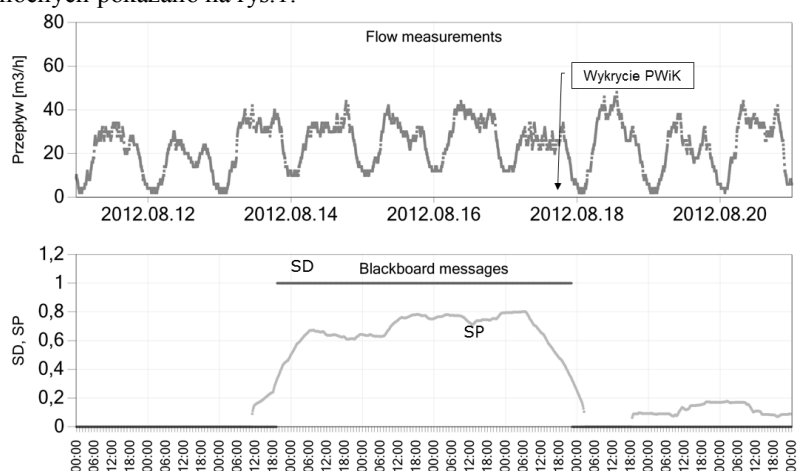
- obserwacja przepływów nocnych,
- bilansowanie strat wody,
- badanie natężenia szumów rozchodzących się w sieci,
- osłuchiwanie sieci.

Powyższe metody zostaną w dalszej części krótko scharakteryzowane.

2.1. Obserwacja przepływów nocnych

Metoda ta polega na obserwacji tzw. minimalnego przepływu nocnego, tj. przepływu w sieci w godzinach od około 01:00 do 04:00. W takich warunkach najłatwiej dostrzec zmiany w poborze wody. Przy minimalnym zużyciu wody przez użytkowników sieci, wzrost przepływu spowodowany wyciekami jest najlepiej widoczny.

Przykładowy zapis przepływu wody z widocznym zmniejszeniem się jego wartości w porach nocnych pokazano na rys.1.



Rys. 1. Przykładowy zapis przepływu wody w wybranej sieci wodociągowej [20]

Na rys. 1 (góra) widać wyraźne zwiększenie się przepływu nocnego spowodowane wyciekami. Utrzymujące się zwiększenie przepływu nocnego zwiększa prawdopodobieństwo, że przyczyną anomalii jest wyciek a nie inne zjawisko o incydentalnym charakterze.

2.2. Bilansowanie strat wody

Jednym z najprostszych sposobów detekcji i zgrubej lokalizacji wycieków jest bilansowanie wody sprzedanej i wtłoczonej do sieci. Metoda ta polega na podziale sieci na

strefy i ich podobszary (tzw. DMA – District Metered Area), dla których mierzona jest ilość wody włączanej, ilość wody odprowadzanej (dla obszarów mających charakter tranzytowy) oraz zużycie wody przez odbiorców. Różnica między objętością wody włączonej do sieci, a wody sprzedanej odbiorcom jest miarą wielkości wycieku/wycieków [2][4].

Bilans taki jest obciążony błędami wynikającymi m.in. z błędów pomiarowych wodomierzy, brakiem pomiaru poboru wody w sieci (np. potrzebnej do płukania sieci lub celów przeciwpożarowych), czy też faktem rozkładu w czasie odczytów zużycia wody u odbiorców. Niemniej jednak, regularne bilansowanie poszczególnych DMA i porównywanie wyników zarówno dla poszczególnych okresów rozliczeniowych, jak i pomiędzy strefami, pozwala wykryć pojawiające się anomalie i zgrubnie oszacować wielkość wycieku (lokalizując równocześnie wyciek z dokładnością do wielkości strefy).

2.3. Osluchiwanie sieci

Metoda ta polega na obchodzeniu trasy wodociągu i osłuchiwaniu, w celu wykrycia charakterystycznych szmerów wycieku. Pozwala to na wstępną, jak i dokładną lokalizację miejsca wystąpienia awarii.

Urządzeniem wykorzystywanym w osłuchiwaniu wodociągu jest nasłuchowy lokalizator nieszczelności, tzw. stetofon. Sygnał dźwiękowy jest odbierany przez mikrofon prętowy lub geofon, a następnie filtrowany, wzmacniany i przekazywany do słuchawek operatora. Dla zwiększenia obiektywności pomiaru stetofony są wyposażane w mierniki natężenia dźwięku, również z pamięcią pomiaru. Sposób posługiwania się stetofonem wyposażonym w geofon pokazano na rys.2.



Rys.2. Sposób posługiwania się stetofonem [<http://www.sebakmt.com>]

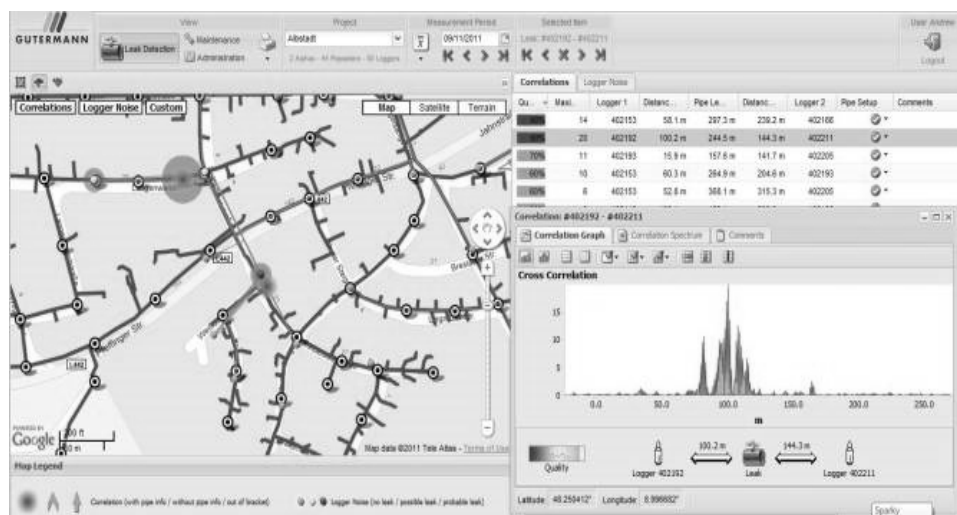
2.3. Badanie natężenia szumów rozchodzących się w sieci

Badanie takie polega na synchronicznym pomiarze wybranych parametrów akustycznych w różnych miejscach sieci wodociągowej przez określony czas. Jeżeli w sieci jest wyciek, to przy stałym ciśnieniu generuje on charakterystyczne szmery o stałym natężeniu. Jeżeli wyciek znajduje się dostatecznie blisko czujnika, to wartości natężenia poszczególnych próbek są bliskie stałemu natężeniu szumu wycieku [2].

Pomiaru dokonuje się za pomocą rejestratorów szumu, tzw. loggerów, mierzących

natężenie dźwięku z zadaniem interwałem przez określony czas i zapamiętujących wyniki pomiarów. Aby zlokalizować wyciek, w pobliżu podejrzanego miejsca umieszcza się loggery w grupach po 6 lub więcej sztuk, na jednym odcinku rury lub na jednym pierścieniu, montując je najczęściej na hydrantach podziemnych. Odległość pomiędzy loggerami wynosi od 200 do 400 m dla loggerów wyposażonych w mikrofony stacjonarne lub od 400 do 1000 m dla urządzeń z hydrofonami [2]. Czas pomiaru wynosi przeciętnie 2 h, z odstępem 1 s pomiędzy kolejnymi pomiarami. Przecieki będą zlokalizowane w pobliżu czujnika, który rejestrował najwyższą wartość natężenia szmeru.

Pozyskane w ten sposób dane poddaje się analizie korelacji pomiędzy sąsiednim loggerami, co pozwala na precyzyjne wskazanie miejsca wystąpienia awarii. Dokonując korelacji sygnału mierzonego w obu punktach, można określić przesunięcie w czasie obu sygnałów, i dalej, znając prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w danej rurze wypełnionej wodą, można określić dokładne miejsce wystąpienia przecieku. Na dokładność lokalizacji mają wpływ zakłócenia pochodzące z innych źródeł, takich jak ruch uliczny i inne instalacje podziemne.



Rys. 3. Przykładowy system stacjonarnego systemu monitorowania sieci wodociągowej [3]

Na rys.3 pokazano ekran stacjonarnego systemu monitorowania sieci wodociągowej opartego na korelatorach szmeru. Z lewej strony widoczny jest schemat sieci z rozmieszczeniem korelatorów, z prawej wynik funkcji korelacji szmerów i wyliczenie prawdopodobnej lokalizacji wycieku w odniesieniu do położenia wybranych korelatorów.

2.5. Dyskusja i ocena stosowanych sposobów wykrywania i lokalizacji awarii sieci wodociągowych

W przedstawionych sposobach wyraźnie widać podział na:

- metody pasywne, które polegają na obserwacji przepływu/ów w sieci wodociągowej (metoda obserwacji przepływów, metoda bilansowania wody),
- metody aktywne, które pozwalają na wykrycie i zlokalizowanie wycieku (metoda osłuchania sieci, badanie natężenia szmerów rozchodzących się w sieci).

Metoda bilansowania wody właściwie nie wymagają dodatkowych inwestycji. Obecnie opomiarowanie wody włączanej i sprzedawanej jest na tyle powszechne, że koszt dodatkowego sprzętu można uznać za zerowy. Osobnym zagadnieniem jest sam proces zliczania kosztów i dokonywania bilansu. Skuteczna jego realizacja wymaga wdrożenia systemu księgowego, co również jest już normą w większości przedsiębiorstw wodociągowych. Potrzebne jest jedynie właściwe przypisanie odbiorców wody do poszczególnych DMA.

Również metoda obserwacji przepływów nie wymaga obecnie wysokich nakładów początkowych. Do jej realizacji potrzebne są:

- dane z pomiaru przepływu wody na wejściu wydzielonej sieci, które pozyskuje się także dla celów rozliczeniowych,
- system przesyłania i rejestracji sygnału, obecnie najczęściej wykorzystujący standard GPRS, i stanowiący część systemu klasy SCADA.

Biorąc pod uwagę, że narzędzia te są coraz bardziej popularne, a raz wdrożony system SCADA może również służyć nadzorowi innych obiektów, koszty wdrożenia takiej metody nie są wysokie.

Zasadniczymi wadami systemów pasywnych są: bardzo zgrubna lokalizacja wycieku, jak również udział „czynnika ludzkiego” w analizie. Konieczność czasochłonnej rutynowej analizy danych przez personel pionu technicznego przedsiębiorstwa wodociągowego jest największym zagrożeniem dla skuteczności wykorzystania tych metod.

Na przedstawionym wcześniej rys. 1. widać, że reakcja służb przedsiębiorstwa na dobrze widoczny w analizie przepływów nocnych wyciek nastąpiła w piątej dobie po jego wystąpieniu (wykres górny). Automatyzacja procesu pozwoliła na wykrycie wycieku w dniu jego wystąpienia (wykres dolny, pokazujący zmianę stopnia przekonania systemu o wystąpieniu wycieku i wypracowany, zerojedynkowy sygnał diagnostyczny – przejście sygnału ze stanu „0” w stan „1” oznacza zgłoszenie przez system wykrycia wycieku.

Bardziej precyzyjna lokalizacja wycieku jest przedmiotem metod aktywnych, wymagających zaangażowania odpowiednio przeszkolonej ekipy wyposażonej w specjalistyczny sprzęt. Metody te pozwalają nie tylko na wykrycie, ale również na zlokalizowanie wycieku. Poważną ich wadą jest wysoki koszt sprzętu i konieczność posiadania wyszkolonych pracowników (warunek trudny do spełnienia dla małych przedsiębiorstw), a także stosunkowo niska wydajność tych metod - ok. 300 do 600 m przejranej sieci na godzinę pracy ekipy.

Większość metod aktywnych jest wrażliwa na szумы i hałas otoczenia i wymaga „ciszy w sieci” przez co w praktyce może być stosowana jedynie w godzinach nocnych. Jeżeli weźmie się pod uwagę fakt, że godziny nocne są najczęściej wykorzystywane do prowadzenia prac konserwacyjnych i regulacyjnych (w związku z tendencją do minimalizowania uciążliwości dla odbiorców), czas na prowadzenie monitoringu znacznie się skraca. Dodatkowo w tych sieciach, w których wykorzystuje się zbiorniki wodociągowe, noc jest najczęściej okresem ich napełniania, co jest związane ze znacznym wzrostem przepływu. Ponadto należy zauważyć, że metody oparte na bilansie wody lub porównywaniu zużycia są ograniczone w stosowaniu przez topologię sieci i możliwości pomiarowe. Przy sieciach zamkniętych, z występującą dużą liczbą cykli/pętli, wyróżnienie zamkniętych stref bywa trudne.

Podsumowując, można wnioskować, że w praktyce brakuje skutecznej metody, która mogłaby być z powodzeniem automatyzowana, nie byłaby uzależniona od topologii sieci i mogłaby być stosowana również w porach dnia, kiedy obciążenie sieci jest większe.

3. Propozycje rozwiązań narzędziowych zwiększających inteligencję sieci wodociągowych

Analizując dokładność lokalizacji metod omówionych w poprzednim punkcie, należy zauważyć, że skuteczna metoda zwiększająca inteligencję sieci w zakresie identyfikacji i lokalizacji awarii powinna uwzględniać następujące ograniczenia:

1. Skala i zakres wykrywanych wycieków. Metoda powinna pozwalać na szybkie wykrywanie pojedynczych awarii o większym natężeniu wypływu. Małe wycieki nie są w stanie znacząco zmienić obserwowanych parametrów przepływu i dopiero większa liczba wycieków może powodować straty wody widoczne np. w bilansie, dlatego dopuszcza się wykrycie takich awarii z opóźnieniem, tym dłuższym im mniejszy wyciek.
2. Spodziewana dokładność lokalizacji awarii. Dokładne lokalizowanie awarii przez system w pełni zautomatyzowany wymaga zastosowania rozbudowanych układów pomiarowych, pokrywających całą sieć wodociągową gęstą siatką czujników (rys. 3). Wydaje się, że lepiej mówić jedynie o wstępnej lokalizacji awarii dokonywanej automatycznie - dokładna lokalizacja musi być prowadzona przez ekipy poszukiwawcze, tyle że wymagane jest przeszukiwanie znacznie mniejszego obszaru [25], [26].

Rozpatrując sieć wodociągową, jako typowy obiekt diagnozowania i monitorowania, można wskazać wspólne cechy, które zdaniem autora powinny być uwzględnione w budowie inteligentnych rozwiązań wspomagających:

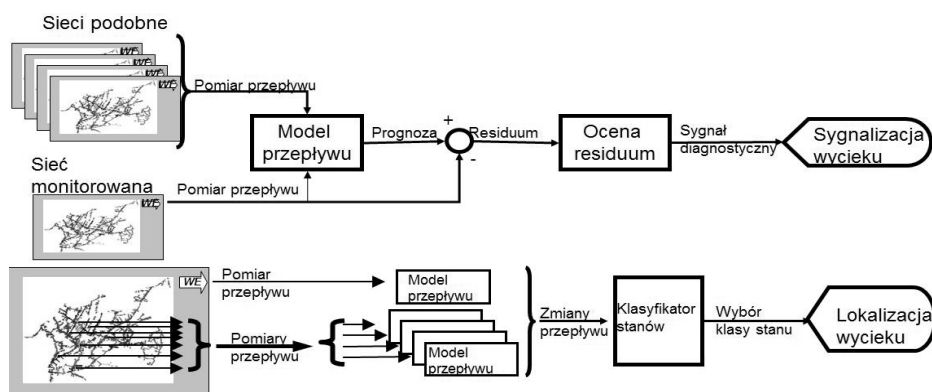
- niezwłoczne i pewne wykrycie anomalii w pracy sieci, niezależnie od warunków zewnętrznych i obciążenia sieci (pory dnia),
- minimalny poziom fałszywych alarmów,
- dokładna i pewna lokalizacja wycieku,
- niski koszt wdrożenia i eksploatacji,
- wysoki stopień automatyzacji pracy,
- niskie wymagania w stosunku do kwalifikacji i wyszkolenia operatora systemu,
- możliwość wykorzystania systemu również do innych działań (np. związanych z zarządzaniem eksploatacją i utrzymaniem ruchu sieci).

Analizując prace poświęcone rozwijaniu metod monitorowania i diagnozowania sieci wodociągowych, można wyróżnić pewne charakterystyczne trendy - rozwiązania powtarzające się w wielu pracach i proponowanych metodach. Można je podzielić na rozwiązania oparte o metody klasyczne, gdzie wysiłek ich twórców idzie w kierunku zastąpienia operatora przez system komputerowy oraz rozwiązania bazujące na szeroko pojętych metodach sztucznej inteligencji. W tych drugich można wyróżnić następujące wspólne cechy.

1. Wykrywanie anomalii w pracy sieci odbywa się w oparciu o analizę i prognozowanie szeregów czasowych wartości wybranego parametru sieci mierzonego w ściśle określonych jej punktach [8], [13], [14], [15], [17], [19], [23], [27].
2. Zastosowanie metod diagnostyki technicznej wspartej modelami – porównanie pomiarów dokonywanych na obiekcie z ich odpowiednikami wyznaczanymi w oparciu o model obiektu stanowi podstawę do określenia stanu sieci, przy czym model sieci jest to najczęściej tzw. model hydrauliczny - numeryczne odwzorowanie sieci pozwalające na symulację jej pracy w różnych warunkach [24], [26].
3. Zastosowanie klasyfikatorów budowanych w oparciu o zbiór danych trenujących do

określania stanów sieci [1], [16], [22], [24].

Autor opracował metodę wykrywania awarii w pracy sieci wodociągowej [24] odpowiadającą powyższym założeniom. Opracowana metoda do detekcji wycieków wykorzystywała model prognostyczny przepływu wody na wejściu do monitorowanej sieci wodociągowej, wykorzystujący na wejściu wcześniejsze wartości prognozowanego przepływu oraz, dla zmniejszenia liczby fałszywych alarmów, wyniki pomiarów na wejściu do sieci charakteryzujących się podobieństwem profilu dobowego zużycia wody. Rys 4. pokazuje schemat działania zastosowanych metod detekcji i lokalizacji wycieków.



Rys.4. Schemat działania proponowanych metod detekcji i lokalizacji wycieków [24]

Lokalizacja wycieków oparta była o analizę przepływu w wybranych punktach monitorowanej sieci, gdzie zainstalowane zostały przepływomierze pomiarowe. Łączna ocena nieprzewidywanych zmian przepływu rejestrowanego przez te wodomierze pozwalała na wstępną, z dokładnością do predefiniowanego fragmentu sieci, lokalizację wycieku.

Zbudowana przez autora metoda została przetestowana w oparciu o dane pochodzące z funkcjonowania sieci jednego z przedsiębiorstw wodociągowych [9]. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do budowy sposobów wykrywania i lokalizacji awarii niesie ze sobą znacznie większy potencjał innowacyjny, zarówno w aspekcie badawczym, jak i wdrożeniowym. Wymagają jednak dużych nakładów pracy oraz specjalistycznej wiedzy m.in. z zakresu metod modelowania przybliżonego, prognozowania, klasyfikacji. Również budowa, a przede wszystkim kalibracja, modelu hydraulicznego sieci jest dużym wyzwaniem [18]. W szczególności biorąc pod uwagę, że sieć wodociągowa jest tworem żyjącym – jest ciągle rozbudowywana, remontowana, zmieniają się jej parametry. Tak więc raz zbudowany model hydrauliczny wymaga okresowej aktualizacji.

4. Ocena możliwości w zakresie wdrażania nowoczesnych technologii i związanych z nimi metod w zarządzaniu rozdzielczymi sieciami wodociągowymi

Analizując przedstawione powyżej wymagania odnośnie budowy i wdrażania systemów monitorowania rozdzielczych sieci wodociągowych rodzi się pytanie, jakie kierunki działania powinny podejmować w tym zakresie przedsiębiorstwa wodociągowe. Szczególnie, że dla przedsiębiorstw małych budowa zaawansowanego systemu

monitorowania sieci wodociągowej może wydawać się zadaniem ponad siły.

Zdaniem autora, możliwe i celowe jest przyjęcie takiego scenariusz działań, który umożliwiłaby stopniową, etapową budowę zaawansowanego systemu monitorowania sieci w taki sposób, żeby każdy z etapów przynosił przedsiębiorstwu określone korzyści.

Proponowany scenariusz działań wygląda następująco:

1. Wdrożenie systemu SCADA. System taki najczęściej jest w przedsiębiorstwach już wdrożony i służy do monitorowania różnych obiektów wodociagowych (SUW, studni, hydroforni). Można więc powiedzieć, że jest to etap „bezkosztowy”. Kluczowe jest jednak zastosowanie takiego rozwiązania, które zapewniłoby przedsiębiorstwu elastyczną rozbudowę bazy danych systemu i dostęp do danych z poziomu innych, budowanych w przyszłości systemów.
2. Podłączenie do systemu SCADA urządzeń pomiarowych na wejściach (zasilaniach) poszczególnych podsieci wodociagowych. Realizacja tego etapu może wiązać się z pewnymi kosztami, jednak jest ona niezbędna dla wykonania dalszych kroków. Na tym etapie kluczowe jest zapewnienie elastyczności wdrażanego systemu transmisji danych, tak, żeby możliwe było łatwe podłączanie nowych urządzeń i czujników, bez ponoszenia dalszych, istotnych kosztów.
3. Budowa systemu detekcji wycieków opartego o pomiary na wejściach do poszczególnych podsieci. Taki system jest w tym momencie możliwy do realizacji. Nie wymaga istotnych nakładów sprzętowych ale wymaga budowy systemu informatycznego i wdrożenia metod prognozowania przepływów i kontroli procesów. Realizacja tego etapu może przynieść przedsiębiorstwu konkretne korzyści:
 - a. Znaczne skrócenie czasu detekcji awarii.
 - b. Proste wprowadzenie automatycznego bilansowania wody w sieci. Działanie to może jednak wymagać zmian organizacyjnych związanych ze zmianą sposobu odczytywania liczników u konsumentów tak, żeby odczyty dotyczące jednej strefy DMA dokonywane były w możliwie krótkim czasie i w powtarzalnych okresach. Może wymagać również integracji systemów bilingowych i systemu monitorowania sieci. Należy jednak zaznaczyć, że działanie takie ma istotne znaczenie z punktu widzenia późniejszego właściwego zagospodarowania wyników procesów diagnostycznych i ich interpretacji w kontekście polityki eksploatacyjnej przedsiębiorstwa [5], [6].
 - c. Zmniejszenie potrzeby prowadzenia prewencyjnego osłuchiwania sieci wodociagowej i ponoszenia związanych z tym kosztów.
4. Stopniowy podział sieci wodociagowych na mniejsze strefy (DMA), przy czym podział ten powinien być osiągnięty nie na drodze fizycznego podziału sieci zasuwami, lecz poprzez stopniową zabudowę przepływomierzy w kluczowych punktach sieci. Działanie takie umożliwia coraz dokładniejsze bilansowanie sieci, a rozszerzanie wprowadzonego w punkcie 3 systemu przynosi w efekcie coraz dokładniejszą wstępną lokalizację wykrytych wycieków. Dodatkowo przy zabudowie przepływomierzy łatwo „dodać” również pomiar ciśnienia, co zwiększa możliwości monitorowania sieci.
5. Budowę modelu hydraulicznego sieci wodociagowej. Etap ten co prawda jest niezbędny dopiero do realizacji ostatniego punktu scenariusza, ale ze względu na inne korzyści jakie daje posiadanie takiego modelu, może być realizowany niezależnie od stopnia rozwoju budowanego systemu. Należy jednak zauważyć, że wcześniejsza realizacja punktu 4 scenariusza znakomicie ułatwia kalibrację

modelu – są już zainstalowane w sieci punkty pomiarowe i zgromadzone odpowiednie dane.

6. Wprowadzenie metod umożliwiających jeszcze dokładniejszą lokalizację awarii, bazujących np. na sposobach opisanych w rozdziale 3.

Podsumowanie

Zaproponowany w artykule scenariusz wdrażania inteligentnych systemów monitorowania sieci wodociągowych jest wynikiem doświadczeń i przemyśleń zebranych przy budowie i wdrażaniu takiego systemu. Jest też odpowiedzią na podejście do tego problemu przedstawicieli małych przedsiębiorstw wodociągowych, z góry przyjmujących, że budowa tego typu systemów przekracza ich możliwości i rezygnujących z wejścia na tę ścieżkę rozwoju.

Zdaniem autora, nawet częściowe wdrożenie systemu, ograniczające się tylko do monitorowania i detekcji wycieków powinno przy stosunkowo niedużych nakładach przynieść przedsiębiorstwu konkretne korzyści, również te polegające na przekonaniu pracowników do stosowania takich rozwiązań.

Jednocześnie patrząc pod kątem przyszłych prac badawczych, konieczne wydaje się prowadzenie badań związanych z ułatwianiem wdrażania tych bardziej pracochłonnych składowych omawianych systemów, np.: wypracowaniem metod wspomagających kalibrację modeli hydraulicznych czy ułatwiających lub całkowicie automatyzujących okresowe dostrajanie opracowanych modeli do zmian następujących w monitorowanej sieci wodociągowej.

Celowe wydaje się również prowadzenie prac związanych z poprawą metod prognozowania zmian parametrów sieci (przepływy, ciśnienia), a przez to szybszym i pewniejszym wykrywaniem anomalii. Jedną z możliwych dróg rozwoju jest uwzględnienie metod o charakterze jakościowym, uwzględniających czynniki oddziaływania otoczenia na użytkowników sieci. Prace takie podejmowane były dla innych oddziaływań środowisko miejskie – człowiek, ale proponowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowania również w kontekście szeroko rozumianych zachowań odbiorców wody [10], [11], [12].

Przeprowadzona analiza i ocena stosowanych rozwiązań, a także opracowana przez autora metoda, pozwalają zauważyć, że skuteczność proponowanych w tym zakresie rozwiązań zależy w znacznym stopniu od sposobu i zakresu przetwarzania i interpretacji pozyskiwanych i gromadzonych danych będących wynikiem funkcjonowania sieci wodociągowych. Zdaniem autora, kierunkiem podejmowanych w tym zakresie prac badawczych powinny być koncepcje wykorzystujące metody inżynierii wiedzy. Powstające w wyniku tego wspomagające rozwiązania narzędziowe, pozwolą na skuteczne rozwiązanie występujących problemów awaryjności, a jednocześnie zwiększą poziom innowacyjności i inteligencji eksploatowanych systemów wodociągowych.

Literatura

1. Aksela K., Aksela A., Vahala R.: Leakage detection in a real distribution network using a SOM. *Urban Water Journal*, vol. 6, 2009, p. 179–289.
2. Berger M., Ways M.: Poszukiwania przecieków sieci wodociągowych. *Poradnik. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa 2003.*

3. en.gutermann-water.com/experience/case-studies/zonescan/global-increasing-efficiency-with-permanent-leakage-monitoring/
4. Koral W.: Sektoryzacja sieci wodociągowej pierścieniowej przy zastosowaniu przepływomierzy elektromagnetycznych na przykładzie PWiK Gliwice. Cz. 1. INSTAL 2012 nr 2, s. 53-54
5. Loska A.: Variant assessment of exploitation policy of selected companies managing technical network systems. Management Systems in Production Engineering 2015; No 3(19), s.pp 179-188.
6. Loska A: Methodology of variant assessment of exploitation policy using numerical taxonomy tools. Management Systems in Production Engineering 2015, nr 2(18), s. 98-104.
7. Loska A: Review of opportunities and needs of building the SmartMaintenance concept within technical infrastructure system of municipal engineering. Monografia pod red. R. Knosali: Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. 2. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2015, s. 544-555.
8. Luay F.M.: Decision-support system for domestic water demand forecasting and management. Water Resources Management, vol. 15(4), 2001, p. 363–382.
9. Moczulski W., Wyczółkowski R., Ciupke K., Tomasik P., Wachla D., Przyszałka P., Wiglenda R.: Metodyka budowy systemu monitorowania wycieków w sieciach wodociągowych - przykład zastosowania. Diagnostics of Processes and Systems, s. 409-420, Zamość 2011.
10. Paszkowski W.: Identyfikacja cech diagnostycznych w ocenie środowiska zurbanizowanego zagrożonego hałasem, Mechanik 2015 R. 88 nr 7, s. 637-644.
11. Paszkowski W.: Innowacyjna metoda oceny hałasu drogowego w środowisku miejskim. Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji pod red. R. Knosali. Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją 2015, s. 810-818.
12. Paszkowski W.: Innowacyjne metody kształtowania jakości akustycznej terenów zurbanizowanych z wykorzystaniem entropii informacji, Mechanik 2014 R. 87 nr 7, s. 513-522.
13. Przyszałka P., Moczulski W.: Methodology of neural modelling in fault detection with the use of chaos engineering. Eng. Appl. Artif. Intell. 2015 vol. 41, s. 25-40.
14. Przyszałka P., Wyczółkowski R.: Detekcja małych wycieków w sieciach wodociągowych z zastosowaniem metody modelowania niepewności. Pomiar Automatyka Kontrola, vol. 57(11), 2011, s. 1307–1310.
15. Rojek I.: Model neuronowy do prognozowania poboru wody w sieci wodociągowej, [w:] Rojek I.: Wspomaganie procesów podejmowania decyzji i sterowania w systemach o różnej skali złożoności z udziałem metod sztucznej inteligencji. Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz 2010.
16. Rojek I., Studziński J.: Algorytmy lokalizacji awarii w sieci wodociągowej przy użyciu sieci neuronowych. KZW, Bydgoszcz 2011.
17. Rosich A., Sarrate R., Nejari F.: Optimal sensor placement for leakage detection and isolation in water distribution networks. 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS), August 29-31, 2012, Mexico City, Mexico 2012.
18. Savic D.A., Kapelan Z.S., Jonkergouw P.M.R.: Quo vadis water distribution model calibration? Urban Water Journal, vol. 6(1), 2009 , p. 3–22.
19. Siwoń Z., Cieżak W., Cieżak J.: Modele neuronowe szeregów czasowych godzinowego poboru wody w osiedlach mieszkaniowych. Ochrona Środowiska, nr 2, 2011, s. 23–26.

20. Siwoń Z., Cieżak J., Cieżak W.: Praktyczne aspekty badań strat wody w sieciach wodociągowych. *Ochrona Środowiska*, nr 4, 2004, s. 25–30.
21. Studziński J.: Zastosowanie danych z monitoringu w systemie zarządzania miejską siecią wodociągową. *Studia i materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą* t. 8, Bydgoszcz 2007, s. 154–164.
22. Wachla D., Przystałka P., Moczulski W.: A method of leakage location in water distribution networks using artificial neuro-fuzzy system. *IFAC-PapersOnLine* 2015 vol. 48 iss. 21, s. 1216-1223.
23. Walker D., Creaco E., Vamvakeridou-Lyroudia L., Farmani R., Kapelan Z., Savić D.: Forecasting Domestic Water Consumption from Smart Meter Readings Using Statistical Methods and Artificial Neural Networks, *Procedia Engineering*, vol. 119, p. 1419-1428, Elsevier 2015
24. Wyczółkowski R.: Metodyka detekcji i lokalizacji uszkodzeń sieci wodociągowych z wykorzystaniem modeli przybliżonych. Gliwice : Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2013. Rozprawa habilitacyjna.
25. Wyczółkowski R., Matysiak G.: The development of an intelligent monitoring system of a local water supply network. *Eksplatacja i Niezawodność*, no. 2, 2009, p. 71–75.
26. Wyczółkowski R.: Inteligentny system monitorowania sieci wodociągowych. *Eksplatacja i Niezawodność* , nr 1, 2008, s. 33–36.
27. Wysogład B, Wyczółkowski R.: An optimization of heuristic model of water supply system with genetic algorithm. *Diagnostyka* 2006 nr 2, s. 49-52.

Dr hab. inż. Ryszard WYCZÓLKOWSKI, prof. nzw. w Pol. Śl.
 Instytut Inżynierii Produkcji, Politechnika Śląska
 41-800 Zabrze, ul. Roosevelta 26
 tel./fax: (0-32) 277 7311
 e-mail: ryszard.wyczolkowski@polsl.pl