

Propozycja metody diagnostycznej dla sieci wodociągowej

Proposal of diagnostic method for distribution network

DARIUSZ KOWALSKI, BEATA KOWALSKA, PAWEŁ SUCHORAB

DOI 10.36119/15.2021.7-8.8

W artykule zaprezentowano koncepcję oraz efekty 3-miesięcznego wdrożenia autorskiej metody detekcji stanów anormalnych w rzeczywistym wodociągu. Długość przewodów rozpatrywanego wodociągu wynosi ok. 260 km. Wydzielono w nim 24 strefy ciśnienia. Wodociąg zawiera jedno ujęcie, 7 zbiorników sieciowych oraz 15 pompowni strefowych. Istotą prezentowanej metody jest integracja modelu numerycznego (opracowanego w programie WaterGems) oraz funkcjonującego monitoringu wykorzystującego system SCADA. Dane pozyskane z monitoringu są na bieżąco porównywane z wynikami symulacji. W przypadku gdy różnice pomiarów i obliczeń symulacyjnych przekraczają założone wartości graniczne generowany jest alarm powiadamiający dyspozytora. Dzięki temu rozwiązaniu dyspozytor nie musi stale śledzić wskazań wszystkich zainstalowanych czujników monitoringu. Dodatkowo wdrożona metoda diagnostyczna pozwala na ocenę wielkości wycieków.

Słowa kluczowe: wodociąg, model numeryczny, awarie, metoda diagnostyczna

The aim of this paper is to present the detecting abnormal conditions system, including its concepts and effects after 3-month period operation. The analysed water supply system, of total pipe length equal to approx. 260 km, consists of 24 pressure zones, 7 water tanks and 15 water pumping stations. The essence of the system is the integration of numerical model (developed in Bentley WaterGems software) and SCADA monitoring system. The monitoring data are constantly compared to simulation results and when accepted compliance limits are exceeded the appropriate alerts are generated. Such solution cause that the WSS operator does not need to analyse SCADA system indications constantly. The additional application of the system enables the detection of water leakages.

Keywords: water network, numerical model, failures, diagnostic method

Wstęp

Głównym celem funkcjonowania przedsiębiorstw wodociągowych jest zaopatrzenie w wodę odbiorców. Dostarczana do nich woda musi być podawana w odpowiedniej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem. Musi być także bezpieczna pod względem zdrowotnym [1]. Z drugiej strony przedsiębiorstwa wodociągowe, aby sprawnie funkcjonować muszą być efektywne ekonomicznie. Oznacza to konieczność ograniczania kosztów energetycznych, zmniejszania strat wody, jak również podnoszenia niezawodności pracy systemów przesyłających wodę [2-5]. Wymagania powyższe wymuszają na przedsiębiorstwach wodociągowych stałą rozbudowę systemów monitoringu. Monitoring ten obejmuje między innymi warunki hydrauliczne pracy wodociągów, jakość przesyłanej przez nie wody, jak również pobór zużycia energii [6,7].

Związana z monitoringiem liczba zainstalowanych czujników, a tym samym

ilość zbieranych danych wciąż rośnie. W wielu przypadkach operatorzy systemów zaopatrzenia w wodę osiągnęli już granicę percepcji analizowania informacji. Przedsiębiorstwa wodociągowe zmuszone są więc wyposażać dyspozytorów w systemy wspomaganie decyzji [8]. Systemy te z czasem zaczęły przekształcać się w quasi inteligentne (*smart systems*). Mianem tym określane są systemy integrujące zestaw narzędzi i oprogramowania, które umożliwiają zakładom wodociągowym zdalne i ciągłe monitorowanie, diagnozowanie problemów, ustalanie priorytetów i zarządzanie problemami związanymi z utrzymaniem oraz wykorzystanie danych do optymalizacji wszystkich aspektów eksploatacji systemów dystrybucji wody [9]. Istnieje wiele innych definicji takich systemów [10]. We wszystkich jednak podkreśla się kluczową rolę diagnostyki pracy wodociągów i alarmowanie operatora o wystąpieniu stanów awaryjnych. Realizacja tych zadań wymaga integracji systemu monitoringu, analizy zbieranych

danych pomiarowych oraz systemu informatycznego rozpoznającego stany awaryjne [11,12]. Pierwsza grupa powyższych zadań realizowana jest już powszechnie przez systemy SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Znacznie trudniej spotkać w przedsiębiorstwach wodociągowych wdrożone systemy informatyczne rozpoznające stany awaryjne. Brakuje zarówno standardów rozpoznawania tych stanów jak i niezbędnego oprogramowania. Systemy diagnostyczne najczęściej wdraża się etapami, zależnie od możliwości finansowych przedsiębiorstw wodociągowych. Jako pierwsze instalowane są najczęściej systemy detekcji wycieków. Jednak i tutaj wciąż poszukiwane są nowe metody ich wykrywania [13,14].

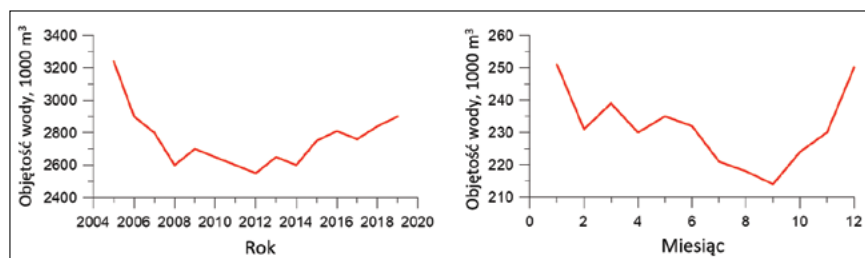
Celem artykułu jest prezentacja opracowanej przez Autorów metody diagnostycznej, wspomagającej proces podejmowania decyzji eksploatacyjnych przez operatora wodociągu. W chwili obecnej metoda obejmuje detekcję wycieków oraz ocenę wielko-

dr hab. inż. Dariusz Kowalski, <https://orcid.org/0000-0001-9929-1626>; prof. dr hab. inż. Beata Kowalska, <https://orcid.org/0000-0003-2489-1904>; mgr inż. Paweł Suchorab, <https://orcid.org/0000-0001-9275-4800> – Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Lublin. Adres do korespondencji/ Corresponding author: d.kowalski@pollub.pl.

ści strat wody. Wdrożono ją w istniejącej, wielostrefowej sieci wodociągowej. W artykule zaprezentowano efekty pilotażowego, obejmującego pierwsze 3 miesiące, funkcjonowania metody. Wskazano jej zalety, jak również zidentyfikowane niedoskonałości i wymagane korekty oraz kierunki dalszej rozbudowy.

Opis systemu wodociągowego

Przedstawiona w artykule metoda diagnostyczna została wdrożona w istniejącym systemie wodociągowym miasta liczącego ok. 30 000 mieszkańców, zlokalizowanego na terenie górzystym. Poza historycznym centrum miasta gęstość zabudowy jest niewielka. Zdarzają się przez to sytuacje, w których wypływ wody na powierzchnię na skutek rozszczelnienia wodociągu pozostaje niezauważony przez kilka do kilkunastu dni. W ciągu doby do systemu tłoczona jest średnio 5320 m³ wody, pochodzącej z pojedynczego ujęcia. Zmienność sezonowa tłoczenia wody jest stosunkowo niewielka – rys. 1.



Rys. 1. Objętość wody tłoczona do systemu wodociągowego – po lewej roczna, po prawej średnia miesięczna w latach 2010-2019

Fig. 1. Volume of water pumped into the water supply system – yearly (left) and monthly (right) mean in 2010-2019

Różnica pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi odniesiona do średniej arytmetycznej zgodnie ze wzorem:

$$n = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{over}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

wyniosła 24% dla objętości rocznych oraz 17% dla miesięcznych.

Całkowita długość przewodów sieci wodociągowej bez przyłączy wynosi ok. 260 km. Ze względu na znaczne różnice wysokościowe poszczególnych rejonów miasta, przekraczające 150 m, sieć wodociągową podzielono na 24 strefy ciśnienia. Związane to było z koniecznością zainstalowania 7 zbiorników sieciowych oraz 15 pompowni strefowych. Wszystkie zbiorniki sieciowe zlokalizowane są na początku wydzielonych stref zaopatrzenia w wodę. Pomimo wdrożonego podziału na strefy, w niektórych miejscach sieci wysokość ciśnienia przekracza 120 mH₂O.

Do budowy sieci wykorzystano rury wykonane z żeliwa szarego, stali, PVC, PEHD oraz azbesto-cementu. Najstarsze rurociągi, w wieku ponad 40 lat, stanowią ok. 33% długości sieci. Schemat struktury sieci wraz z lokalizacją pompowni i zbiorników sieciowych przedstawiono na rysunku 2.

Ze względu na niezadawalający stan techniczny najstarszych rurociągów oraz lokalnie wysokie ciśnienie, poziom strat wody w analizowanej sieci wodociągowej jest wysoki i wynosi około 38%. W chwili rozpoczęcia projektu lokalne przedsiębiorstwo wodociągowe nie miało pełnej świadomości rozkładu przestrzennego tych strat. Wynikało to z:

- funkcjonującego systemu odczytu wodomierzy (raz na 2 miesiące),
- funkcji tranzytowej, w stosunku do innych, 6 z 24 stref,
- funkcjonowania okresowo napełnianych zbiorników sieciowych,
- braku odpowiedniej liczby przepływomierzy i manometrów sieciowych.

Biorąc powyższe pod uwagę przedsiębiorstwo nie miało możliwości szybkiego

wykrywania dużych awarii, przez co musiało polegać na sygnałach od odbiorców sieci. Wszystkie powyższe czynniki skłoniły władze przedsiębiorstwa do podjęcia próby wdrożenia systemu, który pozwalałby na szybkie diagnozowanie stanów awaryjnych.

Rozwiązując powyższe problemy przedsiębiorstwo wodociągowe zdecydowało się na rozbudowę systemu monitoringu. W początkowej fazie projektu wdrożono system zdalnego odczytu wodomierzy. System ten umożliwia bezpośrednią transmisję danych z wodomierzy do centrum dyspozytorskiego, z wykorzystaniem sieci telefonii komórkowej GSM. Odczyty mogą być realizowane w programowalnych krokach czasowych (od 5 minut do 30 dni).

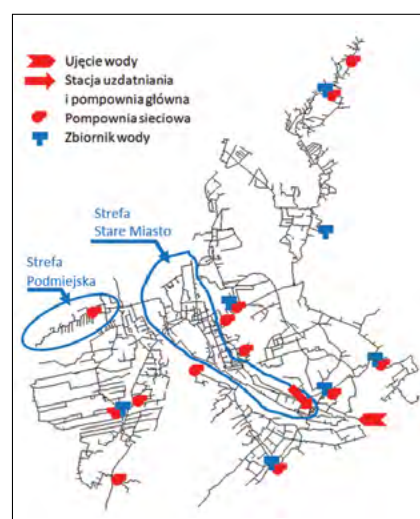
Dodatkowo zwiększono liczbę sieciowych czujników pomiarowych. Obecnie pomiary wysokości ciśnienia i natężenia przepływu realizowane są przez 58 manometrów oraz 41 przepływomierzy. Wszystkie zbiorniki sieciowe wyposażono w przepływomierze rejestrujące wodę dopływającą i odpływającą. Rozbudowany przez przedsiębiorstwo system monitoringu obejmuje także pomiar napięcia wszystkich zbiorników wodociągowych. Wszystkie urządzenia pomiarowe zostały zintegrowane w systemie SCADA.

Kolejnym krokiem zrealizowanym przez przedsiębiorstwo była budowa bazy GIS obejmującej wszystkie obiekty i urządzenia analizowanego systemu wodociągowego. Dodatkowo baza zawiera odczyty wodomierzy oraz zapewnia elektroniczny obieg dokumentów przedsiębiorstwa. Powstała baza danych pracuje w standardzie zaproponowanym przez firmę ESRI.

Po uruchomieniu rozbudowanego systemu monitoringu pojawił się problem z interpretacją wskazań czujników sieciowych. Dyspozytorzy mieli trudności z szybkim rozpoznawaniem stanów awaryjnych pracy systemu wodociągowego, szczególnie w sytuacji ciągłego występowania znaczących strat wody. W związku z powyższym przedsiębiorstwo wodociągowe podjęło kroki w celu opracowania metody diagnostycznej, która bazowałaby na już wdrożonych rozwiązaniach i wspomagałaby pracę dyspozytorów.

Opis systemu diagnostycznego

Opracowana przez autorów artykułu, przy współpracy z firmą MEGABIT z Warszawy, koncepcja metody diagnostycznej musiała uwzględniać ograniczone możliwości finansowe przedsiębiorstwa. Bazujący na tej metodzie system diagnostyczny musi być zatem traktowany jako znajdujący



Rys. 2. Schemat struktury geometrycznej sieci wodociągowej wraz z lokalizacją ujęcia, pompowni oraz zbiorników sieciowych

Fig. 2. Scheme of the geometrical structure of a water supply system with the location of the intake, pumping station and network tanks

cy się w trakcie tworzenia i możliwy do rozbudowy w przyszłości. Uruchomiono go na początku 2020 r. System wciąż znajduje się jeszcze w fazie testowania i strojenia. Za podstawę systemu autorzy przyjęli powstałą wcześniej bazę GIS, która pełni rolę integrującą funkcjonujący system SCADA i zdalny odczyt wodomierzy. W bazie tej utworzono dwie dodatkowe warstwy opisujące zmierzony pobór wody oraz status (zamknięta/otwarta) zasuw sieciowych. Dodatkowo z bazą powiązано model numeryczny rozpatrywanego wodociągu.

Schemat ideowy pracy tak powstałego narzędzia informatycznego przedstawiono na rysunku 3. W obecnej konfiguracji narzędzie ukierunkowano na realizację dwóch zadań: ocenę wielkości strat wody oraz detekcję i lokalizację dużych jej wycieków. Centrum integrującym wszystkie działania informatyczne jest baza danych GIS. Integrację uzyskano poprzez konsekwentne przypisywanie jednakowych adresów poszczególnych obiektów sieciowych, wodomierzy i czujników monitoringu, we wszystkich modułach powstałego narzędzia informatycznego. Dzięki temu poszczególne moduły w ułatwiony sposób udostępniają lub pobierają dane z bazy danych.

Pierwsze zadanie narzędzia – ocenę wielkości strat wody oparto o bilansowa-

ści rośnie w przypadku lokalizacji w danej strefie zbiornika sieciowego oraz w przypadku pełnienia przez strefę roli tranzytu wody do innych stref. W związku z powyższym ocenę wielkości strat wody oparto o następujące wzory: dla stref typu DMA,

$$Q_L = Q_{IN} - Q_T - Q_{WM} \quad (2)$$

dla stref tranzytowych

$$Q_L = Q_{IN} - Q_T - Q_{TRAN} - Q_{WM} \quad (3)$$

gdzie:

- Q_L – objętość wody traconej,
- Q_{IN} – objętość wody wtłoczonej,
- Q_T – objętość wody zużywanej na cele technologiczne,
- Q_{WM} – objętość wody zarejestrowana przez wodomierze odbiorców,
- Q_{TRAN} – objętość wody przesyłanej do innych stref.

Wyposażenie wszystkich zbiorników w przepływomierze rejestrujące dopływ i odpływ wody pozwoliło na znaczne uproszczenie obliczeń bilansowych. Napełnianie zbiornika liczone jest jako objętość wody przesyłanej do strefy, której początek stanowi zbiornik. Odpływ ze zbiornika stanowi jednocześnie objętość wody tłoczonej do tej strefy.

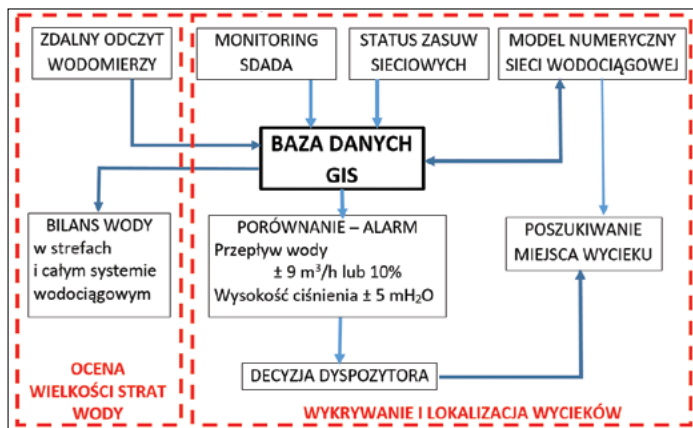
$Q_{IN-Zone}$ – objętość wody tłoczonej do danej strefy,

$Q_{L-Total}$ – objętość wody traconej w całym systemie wodociągowym.

Drugie zadanie narzędzia diagnostycznego oparto o realizowaną za pośrednictwem bazy GIS współpracę systemu SCADA i modelu numerycznego sieci wodociągowej. Kluczowym elementem jest tu ciągłe porównywanie wyników obliczeń symulacyjnych ze wskazaniami czujników monitorujących pracę systemu wodociągowego. Porównanie to obejmuje wszystkie zainstalowane czujniki jednocześnie. Jako dopuszczalną różnicę pomiędzy obliczeniami i pomiarami przyjęto $\pm 5.0 \text{ mH}_2\text{O}$ wysokości ciśnienia oraz $\pm 9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (25% wymaganej wydajności hydrantu pożarowego) lub $\pm 10\%$ natężenia przepływu wody. Próg 10% przewidziano w miejscach, w których natężenie przepływu jest na tyle duże, że różnica $9,0 \text{ m}^3/\text{h}$ jest bliska błędowi pomiarowemu zainstalowanych czujników monitoringu. W przypadku kiedy obliczona różnica pomiędzy wynikami obliczeń symulacyjnych a wskazaniami czujników pomiarowych przekracza powyższe progi narzędzie generuje alarm powiadamiający dyspozytora o potencjalnej sytuacji awaryjnej. W dalszej kolejności dyspozytor podejmuje decyzję o anulowaniu alarmu lub o wdrożeniu procedury poszukiwania wycieku z wykorzystaniem do tego celu specjalizowanego modułu modelu numerycznego sieci wodociągowej.

Pozostawienie dyspozytorowi obu powyższych decyzji wynikało z faktu wciąż nieuporządkowanego systemu eksploatacji, w tym przede wszystkim zmiennych godzin napełniania zbiorników sieciowych. W trakcie normalnej eksploatacji zdarzają się także sytuacje związane z prowadzeniem działań na sieci przez бригады remontowe, które wymagają zmian w ukierunkowaniu przepływu wody sieciowej i czasowego wyłączenia niektórych jej przewodów z użytkowania. Powstałe wówczas alarmy wynikałyby ze zmienionej, a nie nieprawidłowej, pracy sieci.

W trakcie budowy narzędzia diagnostycznego konieczne okazało się zastosowanie uśredniania zbieranych danych pomiarowych. Zainstalowany system monitoringu funkcjonuje z krokiem czasowym wynoszącym 10 sekund. Chwilowe wzrosty/spadki mierzonych parametrów nie powinny jednak generować alarmów. W związku z tym, w porozumieniu z przedsiębiorstwem wodociągowym, podjęto decyzję o uśrednieniu wyników pomiarów w okresach 20-minutowych. Okresy te skorelowano z krokiem czasowym modelu numerycznego.



Rys. 3. Schemat ideowy proponowanego narzędzia diagnostycznego Fig. 3. Schematic diagram of the proposed diagnostics system

nie wskazań przepływomierzy zasilających poszczególne strefy wodociągu, z odczytami wodomierzy odbiorców przypisanych do tej strefy. Krok czasowy bilansowania związany jest z zaprogramowaną częstością odczytów wodomierzy i może wynosić od 5 minut do 30 dni. Biorąc pod uwagę żywotność baterii zasilających zdecydowano o przyjęciu kroku czasowego odczytów równego jednej dobie. Straty wody oceniane są jako różnica objętości wody wtłoczonej i pobranej przez odbiorców danej strefy. Jest to zadanie łatwe w przypadku stref typu DMA (District Meter Area). Stopień jego trudno-

Zastosowany algorytm oceny wielkości strat wody umożliwia nie tylko określenie objętości traconej wody w poszczególnych strefach ale także ocenę wyrażoną w procentach w stosunku do objętości wody tłoczonej do danej strefy (δ_{Zone}) oraz do całego systemu ($\delta_{Z/T}$):

$$\delta_{Zone} = \frac{Q_{L-Zone}}{Q_{IN-Zone}} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$\delta_{Z/T} = \frac{Q_{L-Zone}}{Q_{L-Total}} \cdot 100\% \quad (5)$$

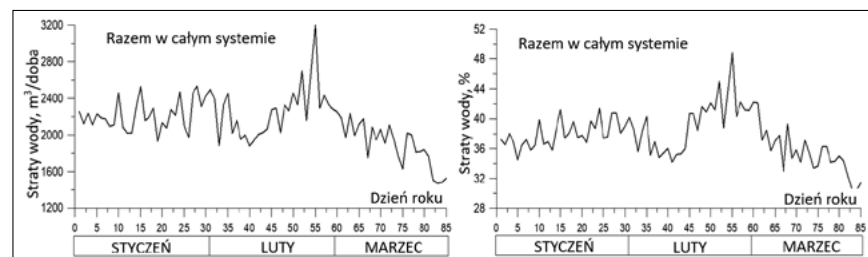
gdzie:

Q_{L-Zone} – objętość strat wody w danej strefie,

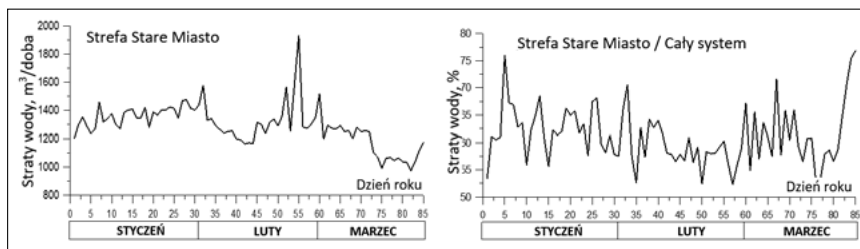
Jednym z ważniejszych elementów opisywanego narzędzia diagnostycznego jest model numeryczny. Do jego budowy wykorzystano oprogramowanie Water-Gems firmy Bentley [15], ze względu na kompatybilność z istniejącą bazą GIS, zautomatyzowaną procedurę kalibracyjną oraz wyposażenie w specjalizowany moduł umożliwiający poszukiwanie wycieków. Budowa modelu oparta została o automatyczną konwersję danych pochodzących z zasobów bazy GIS. Model obejmuje wszystkie przewody sieciowe oraz największe przyłącza. Przy budowie modelu niezbędne charakterystyki pompowni, nastawy zaworów redukcyjnych oraz charakterystyki zbiorników sieciowych przypisywano ręcznie. Tak powstała wersja modelu wymaga jednak okresowej aktualizacji związanej ze zmianami wielkości poboru wody (*base demand*) jak również ze zmianami statusu zasuw sieciowych. Zbudowane narzędzie informatyczne umożliwia przeprowadzenie tych aktualizacji w sposób częściowo zautomatyzowany, wymagający od operatora kilku odpowiednich komend. Przed wdrożeniem model został poddany dwukrotnie procesowi kalibracji, z uwzględnieniem pomiarów chropowatości zastępczej wybranych przewodów sieciowych oraz testów hydrantowych. Proces kalibracji przeprowadzono zgodnie ze standardami AWWA [16].

Wyniki i dyskusja

Przedstawiona powyżej metoda i powstałe narzędzie diagnostyczne zostały testowo uruchomione na początku 2020 roku. Trzy-miesięczny okres obserwacji traktowano jako pilotaż, którego celem było sprawdzenie poprawności działania, jak również identyfikacja problemów związanych z tym funkcjonowaniem oraz zaplanowanie stosownej modyfikacji narzędzia. Wykazana przez niego wielkość strat wody była zmienna w ciągu analizowanego 3-miesięcznego okresu (rys. 4). Wystąpiło w tym czasie 12 znaczących awarii sieciowych. Największa



Rys. 4. Objętość wody traconej w całym analizowanym systemie wodociągowym w roku 2020 – po lewej m³, po prawej % produkcji wody
Fig. 4. Volume of water lost in the entire water supply system in 2020 – in m³ (left) in % of water production (right)

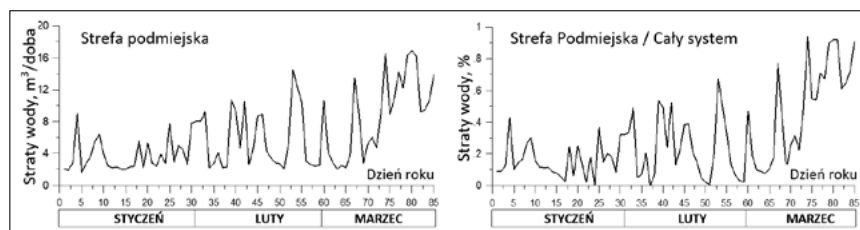


Rys. 5. Wielkość strat wody w strefie „Stare Miasto” – po lewej m³, po prawej udział procentowy ($\delta_{z/1}$) w stosunku do strat całego systemu wodociągowego
Fig. 5. Water losses in the “Stare Miasto” zone, in m³ (left), as percentage ($\delta_{z/1}$) in relation to the losses in the entire water supply system (right)

z nich miała miejsce 26-go marca.

Wdrożenie systemu diagnostycznego pozwoliło na identyfikację stref odpowiedzialnych za większość powstających strat wody. Przykładowo strefa centralna – „Stare Miasto” generowała do 75% strat całego systemu (rys. 5).

Strefy znajdujące się na obrzeżach miasta odpowiedzialne były za znacznie mniej traconej wody. Przykład wskazań systemu diagnostycznego dla jednej z takich stref przedstawiono na rys. 6. Strefa ta generowała mniej niż 1% strat określonych dla całego systemu.



Rys. 6. Wielkość strat wody w Strefie podmiejskiej – po lewej m³, po prawej udział procentowy ($\delta_{z/1}$) tych strat w stratach całego systemu wodociągowego
Fig. 6. Water losses in Suburb zone – in m³ (left), as percentage ($\delta_{z/1}$) in relation to the losses in the entire water supply system (right)

Identyfikacja		Stan		Stan aktualny		Dane techniczne	
Objekt	Pompownia główna	Tekst	Flow increase	Tekst	Wzrost przepływu	Alarm ID	Dane prawidłowe
Parametr	Średni przepływ 20	Dane pomiar	75.0	Pomiar	165.0	Objekt ID	76243
Czas	30/03/2020 02:03	Model	34.2	Model	179.8	Parametr ID	106457
Uwagi						Pomiar ID	30010100
						Pomiar ID	1170470984

Historia							
Czas zapisu	Czas pomiaru	Opis	Problem	Pomiar	Model	Różnica	Różnica %
30/03/2020 02:03	30/03/2020 01:59	Wzrost przepływu	12	75.0	34.2	40.8	119.3
30/03/2020 02:23	30/03/2020 02:19	Wzrost przepływu	12	75.0	15.9	59.1	371.1
30/03/2020 02:43	30/03/2020 02:39	Wzrost przepływu	12	63.0	13.1	49.9	380.9
30/03/2020 03:03	30/03/2020 02:59	Wzrost przepływu	12	72.0	15.9	56.1	352.8
30/03/2020 03:03	30/03/2020 03:19	Wzrost przepływu	12	72.0	14.4	57.6	400.0
30/03/2020 03:23	30/03/2020 03:39	Wzrost przepływu	12	60.0	10.6	449.4	433.0
...
30/03/2020 06:43	30/03/2020 06:39	Dane prawidłowe	12	165.0	179.8	-14.8	-8.2

Rys. 7. Wykaz alarmów z dnia 30.03.2020 – zrzut z ekranu
Fig. 7. List of alarms from 30th March 2020 – screenshot

Po uruchomieniu omawianego systemu diagnostycznego dyspozytor uzyskał nowe narzędzie wspomagające jego decyzje. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono widoki ekranu panelu dyspozytora informujące o wystąpieniu alarmów.

W trakcie 3-miesięcznego okresu obserwacji znacząca większość (98%) alarmów podanych przez prezentowany system diagnostyczny wynikała z przekroczenia 10% progu różnic wskazań przepływomierzy i wyników obliczeń symula-

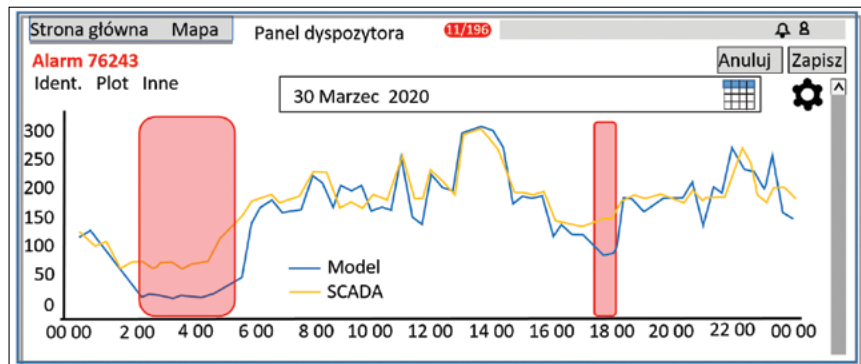
cyjnych. Rysunek 8 prezentuje jedną z przyczyn wywołania tych alarmów – znacznie większe przepływy nocne niż wyliczane przez model. Wywołanie alarmu w tym czasie wynika z błędnego zda-

spadki ciśnienia, że przekroczyły one wartość dopuszczalną. Brak alarmów może wynikać z faktu znacznego przewymiarowania przewodów sieci wodociągowej w stosunku do aktualnych potrzeb. Może

czasowy systemu diagnostycznego, dlatego nie wywołało alarmu. Krótki czas otwarcia wynikał z oszczędności wody. Wystarczył jednak by wypływ wody został zarejestrowany przez system monitoringu. Dzięki temu możliwe było testowe uruchomienie modułu poszukiwania wycieków, stanowiące ważny element proponowanego systemu diagnostycznego.

Moduł poszukiwania wycieków (*Water-Gems*) wskazał kilka prawdopodobnych lokalizacji – od najbardziej prawdopodobnego miejsca wycieku po wskazania drugo i trzeciorzędowe (rys. 10). W przypadku przykładowej strefy najbardziej prawdopodobne wskazanie odpowiadało węzłowi przyłącza hydrantowego.

Spośród 24 przeprowadzonych testów, po jednym otwarciu hydrantu w każdej strefie wodociągu, tylko w połowie przypadków udało się uzyskać tak dobre lub zbliżone efekty wskazań lokalizacji wycieków. Wynikało to przede wszystkim z faktu zbyt małej liczby manometrów i przepływomierzy sieciowych. Istniejący system pomiarowy (SCADA) nie rejestrował otwarć hydrantów. Konieczne jest zatem stopniowe zagęszczanie sieci pomiarowej monitoringu, w miarę możliwości finansowych przedsiębiorstwa.

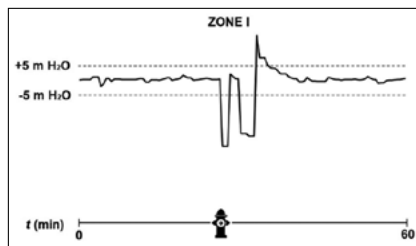


Rys. 8. Szczegóły przykładowego alarmu – zrzut z ekranu
Fig. 8. Details of an exemplary alarm – screenshot

niem autorów artykułu sposobu przypisania wielkości strat wody do poszczególnych odbiorców. Nie znając wielkości tych strat w momencie uruchamiania systemu diagnostycznego zwiększono pobór wody każdego z odbiorców o jednakową wielkość strat wynikającą z podzielenia sumy strat w całym systemie przez liczbę odbiorców. Taki sposób przypisania ma dodatkową wadę – wielkość strat zmienia się zgodnie ze wzorcem zmian poboru wody przypisanym danemu odbiorcy. W nocy wartości tych wzorców są najmniejsze. Drugą prawdopodobną przyczyną wywołania licznych alarmów był brak przestrzegania przez pracowników przedsiębiorstwa zadeklarowanego reżimu napełniania zbiorników sieciowych. Pomimo istniejącego systemu automatycznego sterowania pracownicy okresowo stosują zwyczajowo regulację „ręczną”, nie zawsze informując o tym dyspozytora sieci.

Trzecią prawdopodobną przyczyną powstawania alarmów w godzinach innych niż nocne jest brak wdrożenia modułu predykcji zużycia wody w analizowanym systemie diagnostycznym. Brak ten wynikał ze świadomej decyzji przedsiębiorstwa o jego odłożeniu w czasie ze względów finansowych. Spowodowało to jednak konieczność minimum comiesięcznej aktualizacji zarówno wielkości poboru wody, przypisywanej wielkości jej strat, jak i wzorców zmian jej poboru.

Warto zwrócić uwagę na fakt bardzo rzadko wywołanych alarmów będących skutkiem przekroczenia $\pm 5.0 \text{ mH}_2\text{O}$ różnicy wskazań manometrów sieciowych w stosunku do wartości z obliczeń symulacyjnych. W analizowanym okresie jedynie 12 awarii spowodowało na tyle znaczące



Rys. 9. Wykres zarejestrowanych zmian wysokości ciśnienia w trakcie testowego otwarcia hydrantu
Fig. 9. Graph of the recorded pressure value changes during the test hydrant opening

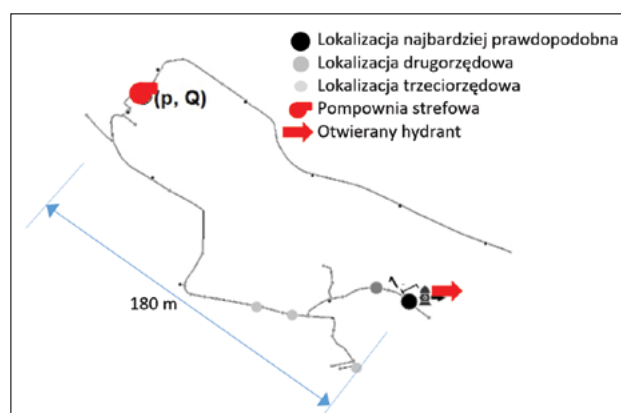
być także wynikiem błędnie założonego progu alarmowego. W prezentowanym okresie obserwacji autorzy artykułu dokonali jednak testowych prób otwierania hydrantów. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy wynik takiego testu zrealizowanego w wybranej niewielkiej strefie. Strefa zasilana była za pośrednictwem własnej pompowni, w której zainstalowano przepływomierz (*Q*) i manometr (*p*). Na terenie strefy nie było innych czujników pomiarowych. Otwarcie hydrantu było znacznie krótsze niż 20-minutowy krok

Wnioski

Prezentowana w artykule metoda i opracowane narzędzie diagnostyczne zostały wdrożone w rzeczywistym systemie wodociągowym. Narzędzie znajduje się nadal w trakcie budowy. Może jednak stanowić przykład wdrożenia dla innych przedsiębiorstw wodociągowych. Jego funkcjonowanie w okresie 3 pierwszych miesięcy traktowane było jako pilotaż niezbędny do przeprowadzenia testów, wykrywania wad i niedoskonałości oraz właściwego określenia progów alarmowych.

Wdrożenie systemu oceny wielkości strat wody zarówno dla całego systemu wodociągowego jak i jego poszczególnych

Rys. 10. Wyniki wskazań najbardziej prawdopodobnej lokalizacji wycieku w analizowanej strefie
Fig. 10. Indication of the most probable leakage location in the analysed zone



stref pozwoliło już w okresie pilotażowym wyraźnie zmniejszyć wielkość strat. Pozwoliło również na zaplanowanie najbardziej pilnych napraw i modernizacji.

Wdrożony system alarmowania o nadmiernych lub zbyt niskich przepływach i ciśnieniu znacząco ułatwia dyspozytorowi zarządzanie wodociągami. Nie wymaga już od dyspozytora stałego śledzenia wskazań czujników monitoringu i ciągłej interpretacji tych wyników. Wykorzystanie modułu poszukiwania wycieków ułatwia podejmowanie decyzji o wystaniu ekip naprawczych.

W pilotażowym okresie pracy powstałego narzędzia diagnostycznego stwierdzono konieczność dokonania w nim szeregu zmian. Należą do nich przede wszystkim zmiana sposobu przypisywania strat wody poszczególnym odbiorcom i wdrożenie w pełni automatycznego systemu zarządzania napełnianiem zbiorników sieciowych. Ze względu na brak wdrożonego systemu predykcji poboru wody konieczna jest okresowa (comiesięczna) aktualizacja modelu numerycznego sieci wodociągowej, uwzględnia-

jąca zarówno wielkość poboru, wielkość strat jak i wzorce zmian poboru wody.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal L 330 , 05/12/1998 P. 0032 – 0054.
- [2] Lenzi C, Bragalli C, Bolognesi A, Artina S. From energy balance to energy efficiency indicators including water losses. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2013, <https://doi.org/10.2166/ws.2013.103>
- [3] Shirzad A, Tabesh M. New indices for reliability assessment of water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2016, 65 (5), 384-395
- [4] Świętochowski K. Awaryjność sieci wodociągowych w województwach dolnośląskim i opolskim. Instal nr 10 2020 DOI: 10.36119/15.2020.10.7
- [5] Piechurski F., Mierzwa T. Ocena działań zmierzających do obniżenia awaryjności sieci wodociągowej na przykładzie miasta Z 2012-2017. Instal nr 11 2020 DOI 10.36119/15.2020.11.6
- [6] Carrico N, Covas D, Alegre H, Almeida M. How to assess the effectiveness of energy management processes in water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 2014, <https://doi.org/10.2166/aqua.2014.094>
- [7] Stańczyk J, Burszta-Adamiaik E The Analysis of Water Supply Operating Conditions Systems by Means of Empirical Exponents. *Water*, 2019, <https://doi.org/10.3390/w11122452>
- [8] Cobacho R, Arregui F, Soriano J, Cabrera E Including leakage in network models: an application to calibrate leak valves in EPANET. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 2015, 64 (2), DOI:10.2166/aqua.2014.197
- [9] Zimoch I., Czopik Ł. Zarządzanie strategiczne jako element minimalizacji ryzyka eksploatacją infrastruktury wodociągowej Instal nr 1, 2020, DOI: 10.36119/15.2020.1.8
- [10] Savić D. Intelligent/Smart Water System, 2015, <https://www.slideshare.net/gidrasavic/intelligent-smart-water-systems> (dostęp 07.03. 2020)
- [11] Tao T, Li J, Xin K, Liu P, Xiong X. Division method for water distribution networks in hilly areas. *Water Sci Tech Water Supply*, 2016, 16 (3), <https://doi.org/10.2166/ws.2015.182>
- [12] Albino V, Berardi U, Dangelico R.M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *J Urban Technol*, 2015, 22, 3–21.
- [13] Allen M, Preis A, Iqbal M, Whittle A.J. Case study: A smart water grid in Singapore. *Water Pract. Technol.*, 2012, 7(4), 1-8.
- [14] El-Zahab S, Zayed T. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*, 2019, 4, 5, <https://doi.org/10.1186/s40713-019-0017-x>
- [15] Bentley WaterGEMS CONNECT Edition Help, Bentley, 2018
- [16] AWWA Engineering Computer Applications Committee. Calibration Guidelines for water distribution system modeling. In Proceedings of the 1999 AWWA Information Management and Technology Conference, New Orleans, Louisiana 1999.