

## HIERARCHICZNY SYSTEM STEROWANIA SIECIĄ WODOCIĄGOWĄ Z ZASTOSOWANIEM RADIOWEJ INFRASTRUKTURY KOMUNIKACYJNEJ

Tomasz KARLA<sup>1</sup>, Jarosław TARNAWSKI<sup>2</sup>, Kazimierz DUZINKIEWICZ<sup>3</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 347-17-42 e-mail: tomasz.karla@pg.gda.pl  
2. tel.: 58 347-12-26 e-mail: jaroslaw.tarnawski@pg.gda.pl  
3. tel.: 58 347-22-39 e-mail: kazimierz.duzinkiewicz@pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono proces budowy hierarchicznego systemu sterowania ilością i jakością wody w sieci dystrybucji wody pitnej miasta Chojnice. Do badań wykorzystano model szkieletowy opracowany w środowisku Epanet. Dokonano dekompozycji, zaproponowano strukturę systemu regulacji, w warstwie bezpośredniej sprawdzono różne rodzaje regulacji: zdarzeniowo-regulowe, PID oraz MPC. Zaproponowano bezprzewodowe metody komunikacji pomiędzy punktami monitorowania i sterowania. Dokonano badań symulacyjnych poprawności działania zaproponowanego systemu sterowania.

**Słowa kluczowe:** sterowanie hierarchiczne, sieci wodociągowe, komunikacja bezprzewodowa, sterowanie koordynowane.

### 1. WPROWADZENIE

Sieci wodociągowe to jedne z najważniejszych działów infrastruktury zarówno dla odbiorców indywidualnych jak i przemysłu. W obu wypadkach niezbędnym jest zapewnienie odpowiedniej ilości dostarczonej wody w każdym momencie doby. W wypadku odbiorców indywidualnych bardzo ważna jest także jakość dostarczonej wody, gdyż w wielu wypadkach jest ona bezpośrednio spożywana przez ludzi.

W artykule przedstawiono opracowany hierarchiczny system sterowania dla sieci wodociągowej miasta Chojnice [1], którego zadaniem jest regulacja ilości i jakości dostarczonej wody do odbiorców. Przedstawiono proces dekompozycji obiektu sterowania, opracowane struktury i mechanizmy sterowania oraz przykładową implementację z wykorzystaniem radiowej infrastruktury komunikacyjnej.

### 2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Systemy sieci wodociągowych są rozległymi przestrzennie obiektami, które służą do dystrybucji wody [2, 3, 4]. Woda jest wykorzystywana w różnych celach: spożywczych, sanitarnych oraz przemysłowych. Sieci wodociągowe składają się z systemu rurociągów, które mogą się rozgałęziać lub łączyć tworząc węzły, z których pobierana jest woda dla użytkowników. Sieci wodociągowe mogą być zaopatrywane w wodę z kilku rodzajów ujęć: naturalnych rezerwuarów, napełnianych zbiorników, czy też podziemnych źródeł. W zależności od zastosowania (m.in. instalacje pożarowe, przemysłowe lub dystrybucji wody pitnej), istnieją odpowiednie normy regulujące

dopuszczalne poziomy ciśnienia, czy też maksymalne poziomy stężenia substancji chemicznych zawartych w wodzie.

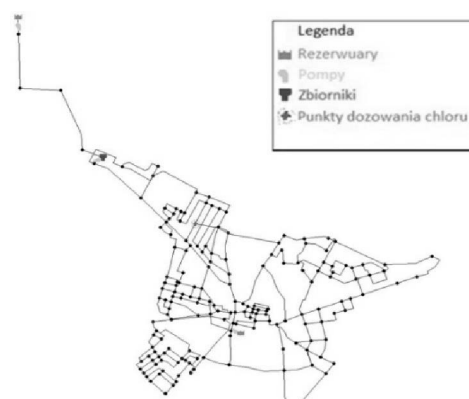
Jedną z najpopularniejszych technik zapobiegania powstawaniu materii organicznych w rurociągach jest używanie chloru jako środka dezynfekującego, dodawanego do wody w punktach uzdatniania wody przy ujęciach wody jak i w wybranych węzłach sieci.

Na potrzeby badań użyto przedstawionego w [5] modelu sieci wodociągowej miasta Chojnice opracowanego w oprogramowaniu Epanet 2.0. Model ten powstał po przeprowadzeniu szkieletyzacji (uproszczeniu rzeczywistej struktury sieci w celu zbudowania jej modelu matematycznego) rzeczywistej sieci wodociągowej miasta. W momencie wykonywania badań, sieć ta nie posiadała żadnych systemów automatycznej regulacji. W tabelicy 1 przedstawiono zestawienie ilościowe elementów modelu.

Tablica.1. Zestawienie ilościowe elementów modelu

Ujęcia wody	2 rezerwuary, 1 zbiornik
Rurociągi	177 węzłów sieci (najniżej położony 150 m n.p.m, najwyższej 178 m n.p.m.), 271 rur długości ponad 73 km
Urządzenia wykonawcze	3 pompy dostarczające wodę do sieci

Struktura połączeń i węzłów sieci została przedstawiona na rysunku 1.



Rys.1. Struktury połączeń i węzłów sieci wodociągowej miasta Chojnice

Rurociągi głównej części miasta są zasilane w wodę przez pompy ze zbiornika przepływowego oraz jednego rezerwuaru. Przepływ wody w tych punktach jest jednokierunkowy w normalnym trybie pracy, co powoduje, że musi panować równowaga między ilością wody włączanej do sieci a pobieranej przez odbiorców. W sieci nie ma dodatkowego zbiornika, który mógłby kompensować większe różnice w dostarczanej i pobieranej wodzie. Łatwo przez to można doprowadzić do sytuacji tzw. dławienia pomp. Polega ono na tym, że jedna pompa jest w stanie wytworzyć na tyle duże ciśnienie w rurociągach, że nastąpi zatrzymanie przepływu wody w innych pompach. Jest to sytuacja niedopuszczalna mogąca doprowadzić nawet do uszkodzenia pomp. Z tego względu wymagana jest precyzyjna regulacja pracy pomp i możliwie dokładne podążanie za zmianami zapotrzebowania wody w sieci. W rzeczywistej sieci wodociągowej miasta Chojnice nie ma dodatkowych punktów dozowania chloru. W wykorzystanym modelu dodano je po analizie hydraulicznej i jakościowej sieci.

### 3. DEKOMPOZYCJA OBIEKTU NA POTRZEBY SYNTEZY SYSTEMU STEROWANIA

Pierwszym etapem badań, było określenie, czy jest możliwe podzielenie całego układu na mniejsze niezależne systemy. Wykorzystując oprogramowanie Epanet zbadano rozpyły wody w sieci realizując różne scenariusze. W kolejnych ujęciach połączonych z poszczególnymi pompami ustawiano wysokie stężenie chloru. Następnie badając stężenie chloru w węzłach sieci określano rozpyły wody. Wyodrębnienie całkowicie odseparowanych podsystemów nie było możliwe, jednak zaobserwowano duże strefy z dominującymi wpływami poszczególnych pomp. Na tej podstawie cały system podzielono na 3 mniejsze podsystemy. Określono także dodatkowe punkty dozowania chloru prócz dozowników w rezerwuarach i zbiorniku.

Ze względu na charakter sieci, specyficzne ułożenie i wykorzystanie zbiornika nie ma dużych możliwości magazynowania wody i tym samym oszczędzania energii elektrycznej. Wobec tego w artykule nie rozpatrywano kwestii ekonomicznych, a wyłącznie pokrycie zapotrzebowania i jakość dostarczanej wody. Nie rozpatrywano również sytuacji nadzwyczajnych typu: susza, awarie urządzeń sterujących i wykonawczych.

### 4. SYNTEZA UKŁADU STEROWANIA

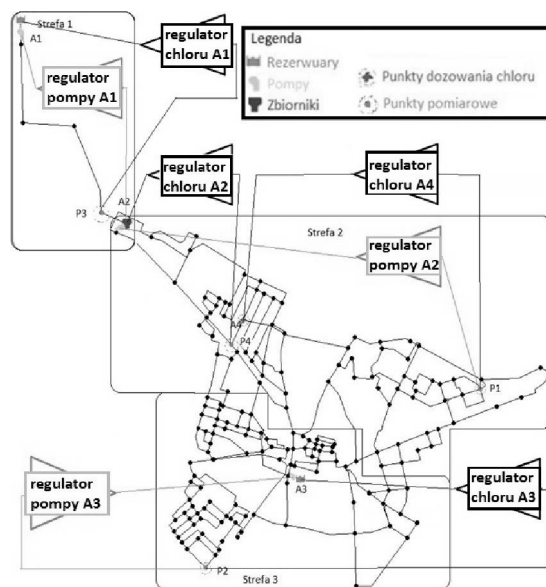
Syntezę układu sterowania rozpoczęto od określenia 3 niezależnych pętli sterowania dla wydzielonych podsystemów. W wypadku sterowania ilością dostarczanej wody (hydrauliki) wyszczególniono 3 niezależne pętłe, dla sterowania jakością wody (chlorowanie) wyszczególniono 4 pętłe (rysunek 2).

#### 4.1. Zdefiniowanie celów sterowania

Cele sterowania zostały określone na podstawie typowych wartości ciśnień i stężenia chloru dla wody pitnej w sieciach wodociągowych wraz z uwzględnieniem regulacji dotyczących minimalnego ciśnienia na potrzeby przeciwpożarowe. Tablica 2 przedstawia określone cele dla systemów hydrauliki i dla systemów jakości wody. Wartości ciśnień w punktach pomiarowych miały zawierać się w zakresie 25-45 mH<sub>2</sub>O przy zadanej 35 mH<sub>2</sub>O, zaś poziom wody w zbiorniku w zakresie 2,75-4,5 m przy zadanym

3,5 m co stanowiło bezpieczne limity zarówno przed przepełnieniem jak i opróżnieniem zbiornika. Maksymalne dopuszczalne stężenie chloru w wodzie wynosi 0,3 mg/l (wg rozporządzenia ministra zdrowia z 2007 roku). Wartości zadane przyjęto na poziomie 0,15 mg/l stanowiącego połowę dopuszczalnego stężenia. Stała praca pomp wymusza ciągłe przepływy w rurach, co spowalnia powstawanie materii organicznych.

W badaniach wykorzystano dobowy profil zapotrzebowania z rzeczywistych danych dla sieci wodociągowej miasta Chojnice.



Rys.2. Dekompozycja zadań sterowania - wyznaczone pętłe sterowania ilością i jakością

Tablica.2. Cele sterowania systemów hydrauliki i jakości

Systemy hydrauliki		
Elementy	Powiązania	Cele
Strefa 1		
Rezerwar, Pompa A1, Zbiornik	Pompa A1 pobiera wodę z rezerwuaru, która trafia do zbiornika	Utrzymanie zadanego poziomu w zbiorniku
Strefa 2		
Zbiornik, Pompa A2, Punkt pomiarowy P1	Pompa A2 pobiera wodę ze zbiornika, która potem zostaje doprowadzona do P1	Utrzymanie zadanego poziomu ciśnienia w P1
Strefa 3		
Rezerwar, Pompa A3, Punkt pomiarowy P2	Pompa A3 pobiera wodę z rezerwuaru, która potem zostaje doprowadzona do P2	Utrzymanie zadanego poziomu ciśnienia w P2
Systemy jakości		
Podsystem	Miejsce	Cel sterowania
A1-P3	Rezerwar A1	Utrzymanie zadanego poziomu stężenia chloru w wodzie w P3
A2-P4	Zbiornik A2	Utrzymanie zadanego poziomu stężenia chloru w wodzie w P4
A3-P2	Rezerwar A3	Utrzymanie zadanego poziomu stężenia chloru w wodzie w P2
A4-P1	Węzeł sieci nr 4	Utrzymanie zadanego poziomu stężenia chloru w wodzie w P1

## 4.2. Synteza regulatorów

Regulatory zostały opracowane w środowisku MATLAB. Syntezę rozpoczęto od projektowania systemów sterowania hydrauliką sieci (ilością dostarczanej wody) gdyż pokrycie zapotrzebowania wody jest pierwszorzędym priorytetem. Sterowanie pomp polegało na określeniu procentowej wydajności przepływu, sterowanie chloru na określeniu dawki chloru wstrzykiwanej do ujęć wody lub określenia stężenia w poszczególnych węzłach sieci. W scenariuszach testowych, profile zapotrzebowania zmieniane były losowo o wartość do  $\pm 10\%$  wzorcowych profili w poszczególnych godzinach symulacji.

### 4.2.1. Niezależne regulatory zdarzeniowo-regulowe

Badania przeprowadzono pod kątem sprawdzenia, czy w takiej strukturze sieci wodociągowej możliwe jest zaimplementowanie niezależnych podsystemów sterowania, które zapewnią wystarczającą jakość regulacji. Nie udało się jednak opracować reguł, które zapewniły prawidłową pracę systemu. Całkowicie niezależne układy sterowania doprowadzały do wzajemnego dławienia pomp.

### 4.2.2. Koordynacja podsystemów sterowania

Wykorzystując model sieci w oprogramowaniu Epanet oraz MATLAB opracowano mechanizm koordynacji sterowań z poszczególnych regulatorów. Niezależne pętle nawet po utracie koordynacji byłyby w stanie zapewnić pracę przynajmniej części układu. Zadaniem mechanizmu koordynacji sterowań pomp była taka modyfikacja sterowań wypracowanych przez poszczególne podsystemy, aby nie następowało dławienie pomp. Mechanizm otrzymywał wypracowane wartości sterowań od wszystkich podsystemów i na podstawie modelu sieci estymował, czy nastąpi dławienie. W tym wypadku wartości były modyfikowane zgodnie z wprowadzonymi ograniczeniami sterowania oraz ustalonymi regułami wynikającymi z zaobserwowanych w czasie analizy wzajemnych zależności między podsystemami. Obliczenia i modyfikacje trwały dopóki nie znaleziono sterowań niedławiających pomp lub po osiągnięciu określonego czasu maksymalnego. W drugim wypadku do systemów były przesyłane sterowania, które wykazywały najkrótsze okresy dławienia pomp.

Wdrożenie mechanizmu przekształciło cały system w hierarchiczny układ sterowania [6, 7], z mechanizmem koordynacji w warstwie wyższej (nadzorczej) oraz regulatorami poszczególnych pomp w warstwie bezpośredniego sterowania.

### 4.2.3. Koordynowane regulatory zdarzeniowo-regulowe

Zastosowanie mechanizmu koordynowania pozwoliło na wyeliminowanie efektu dławienia pomp w testowych scenariuszach. Jednak obserwowano spadki ciśnienia poniżej wymaganych 25 mH<sub>2</sub>O.

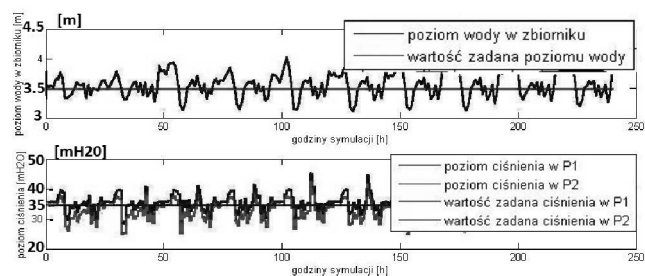
### 4.2.4. Koordynowane regulatory PID

Metodą eksperymentalną dobierano nastawy parametrów regulatorów poszczególnych podsystemów. Po kilku iteracjach udało się uzyskać zadowalającą jakość sterowania hydrauliką sieci. Wszystkie wartości zawierały się dopuszczalnych przedziałach przy czym przez większość czasu znajdowały się w granicach  $\pm 7$  mH<sub>2</sub>O dla ciśnienia oraz -0,2 m/ +0,7 m dla poziomu wody w zbiorniku (ze względu na specyfikę sieci niemożliwe było uniknięcie

powolnego napełniania się zbiornika w porze nocnej bez dławienia/wyłączenia pomp co jest niewskazane).

### 4.2.5. Koordynowane regulatory MPC

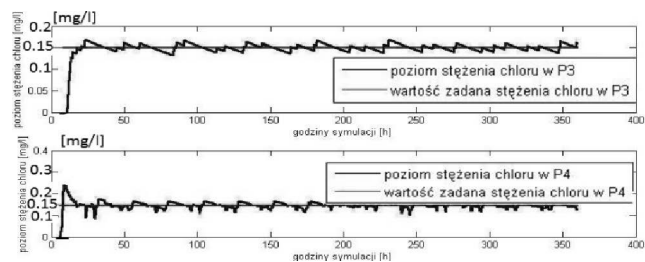
Regulatory MPC pozwalają na uwzględnianie zarówno przewidywanych zmian zapotrzebowania jak i możliwości uwzględnienia w predykowanym sygnale sterującym dodatkowych ograniczeń. Potencjalnie pozwala to na polepszenie jakości sterowania. Wykorzystano także algorytm adaptacji parametrów w danych porach dnia. W ten sposób zbudowano 3 różne regulatory MPC po jednym dla każdego podsystemu. Uzyskano dodatkową poprawę względem regulatorów PID. Wartości ciśnień w większości wypadków zawierały się w granicach  $\pm 5$  mH<sub>2</sub>O zaś poziom wody w zbiorniku -0.3 m/ +0.5 m. Dalsze polepszenie jakości sterowania jest utrudnione przez specyficzną budowę sieci i ograniczenia z tym związane. Na rysunku 3 przedstawiono otrzymane przebiegi.



Rys. 3. Przebiegi poziomu wody i ciśnienia w monitorowanych węzłach

### 4.2.6. Regulatory MPC dla systemów chlorowania

Pierwszym etapem projektowania regulatorów MPC było określenie opóźnień, z jakimi następuje rozplływ wstrzykiwanego chloru. Dla podsystemów zostały wykonane analizy i na ich podstawie określono parametry regulatorów MPC. Przeprowadzone badania wykazały, że dla tak dobranych podsystemów z tego typu regulatorami spełnione są wszystkie zakładane cele. Wartość stężenia w żadnym punkcie pomiarowym nie przekroczyła granicznych wartości, w większości wypadków oscylowała wokół wartości zadanej w zakresie  $\pm 2$  mg/l co jest wartością zadowalającą. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.



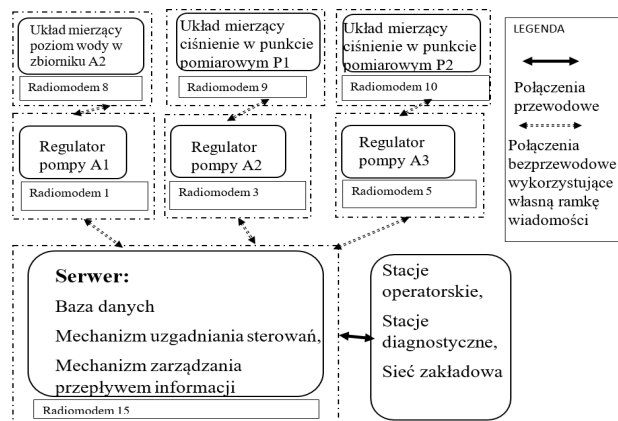
Rys. 4. Wartości stężenia chloru w wybranych monitorowanych węzłach

## 5. INFRASTRUKTURA KOMUNIKACYJNA I ARCHIWIZACJA POMIARÓW

W rzeczywistym środowisku wszystkie elementy całego opracowanego układu sterowania znajdują się w odległości nawet kilkunastu kilometrów od siebie. Ważnym aspektem jest więc zapewnienie odpowiedniej komunikacji między poszczególnymi jednostkami. Wybrano alternatywne w stosunku do kablowego rozwiązanie z wykorzystaniem

technologii radiowych. Opracowany system sterowania przetestowano wykorzystując radiomodemy Satellar do komunikacji w modelu master-slave. W celu podwyższonej niezawodności i pewności poprawności przesyłania danych wybrano przemysłowe modele o konfigurowalnych parametrach takich jak: częstotliwość pracy, moc sygnału, czułość, szerokość kanału i możliwości doboru anten do różnorodnych potrzeb. Przesyłane dane są szyfrowane. Modemy mogą pracować na dzierżawionych częstotliwościach oraz w systemach redundantnych. Dla dodatkowego podwyższenia pewności transmisji danych można dokonać również redundancji w postaci innej technologii transmisji bezprzewodowej czyli transmisji GSM. Konieczność potrzeb tak rozbudowanych systemów redundantnych można zweryfikować wyłącznie w zastosowaniach praktycznych.

Poszczególne regulatory zostały zaimplementowane w środowisku MATLAB na komputerach połączonych z radiomodemami (urządzenia slave). Jeden komputer pełni rolę serwera – mastera, który cyklicznie komunikował się z jednostkami typu slave oraz jednocześnie symulował obiekt i punkty pomiarowe, przysyłając dane do regulatorów. Jego funkcją było także archiwizowanie wszystkich danych otrzymywanych z podsystemów. Wszystkie radiomodemy nastawione były na jedną częstotliwość. Przesyłane dane były rozróżniane i interpretowane na podstawie opracowanej ramki komunikacyjnej. Układ połączeń dla sterowania hydrauliką sieci przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Schemat połączeń komunikacyjnych

Przeprowadzono ponownie testy układu sterowania ilością dostarczanej wody z wykorzystaniem opisanej

infrastruktury komunikacyjnej. Nie zaobserwowano żadnych odstępów od normy w wynikach symulacji ani w komunikacji.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono proces budowy hierarchicznego systemu sterowania dla sieci wodociągowej miasta Chojnice z wykorzystaniem infrastruktury radiowej wraz z różnymi wariantami regulatorów. Przedstawiono uzyskane wyniki jakości sterowania poszczególnych wariantów, opracowano mechanizm uzgadniający sterowania zapewniający poprawną pracę systemu. Zbadano aspekty komunikacyjne między poszczególnymi elementami systemu sterowania oraz zaproponowano odpowiednią infrastrukturę, uwzględniającą możliwość archiwizacji danych i kontroli przepływu informacji między elementami systemu. Sieć miasta Chojnice w trakcie badań nie posiadała żadnego systemu regulacji automatycznej. Opracowany system sterowania jest realną opcją, możliwą do implementacji, niewymagającą dużych zmian związanych z infrastrukturą komunikacyjną.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Karla T.: Rozproszony system sterowania dla sieci wodociągowej miasta Chojnice z wykorzystaniem radiowej infrastruktury komunikacyjnej, Praca magisterska, WEiA PG, 2013.
2. Duzinkiewicz K.: Zintegrowane sterowanie systemami zaopatrzenia w wodę pitną. AGH Uczelniane wydawnictwo naukowo-dydaktyczne, 2005.
3. Osuch-Pajdzińska E., Roman M.: Sieci i obiekty wodociągowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
4. Dohnalik P., Jędrzejewski Z.: Efektywna eksploatacja wodociągów. Ograniczanie strat wody to wcale nie trudne”, LEMTECH Konsulting, Kraków 2004.
5. Ciminski A.: Metody estymacji stanu systemu w warunkach „deficytu” danych pomiarowych – podejście do budowy miękkiego symulatora hydrauliki na przykładzie sieci wodociągowej miasta Chojnice, Praca magisterska, WEiA PG, 2005.
6. Tatjewski P.: Advanced Control of Industrial Processes: Structures and Algorithms, Springer-Verlag London Limited 2007.
7. Grega W.: Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych, Wydawnictwo AGH 2004.

## HIERARCHICAL CONTROL OF DRINKING WATER DISTRIBUTION SYSTEM WITH WIRELESS COMMUNICATION INFRASTRUCTURE

Drinking Water Distribution Systems (DWSW) are most important sectors of infrastructure, both for individuals and industry. In both cases it is necessary to provide a suitable amount of water at all times during a day. In the case of individual customers it is very important to ensure good quality of the water supply, since in many cases it is directly consumed by customers. The DWDS from the perspective of control engineer is a multi-dimensional, nonstationary object with variable delays and uncertainty. So it is a very complex object, and geographically distributed. The article presents the process of building a hierarchical control of quantity and quality of water in the DWDS of the city Chojnice. In purpose of application of decentralized control DWDS was decomposed and subsystems were created. Different types of regulation: event-driven-rule-based, PID and MPC were tested. Coordination among subsystems was necessary to obtain sufficient quality of control. Wireless communication between monitoring and control points is introduced. Simulation studies were performed to confirm proper operation of the proposed control system.

**Keywords:** drinking water distribution systems, hierarchical control, wireless communication, coordinated control.