

Dariusz Andraka • Georgij Cherednik

AUTOMATYCZNY SYSTEM ZARZĄDZANIA POBOREM I DYSTRYBUCJĄ WODY JAKO ELEMENT ZRÓWNOWAŻONEGO SYSTEMU EKSPLOATACJI NA PRZYKŁADZIE MIASTA ŻODINO (BIAŁORUŚ)

Dariusz Andraka, dr inż. – Politechnika Białostocka

Georgij Cherednik, mgr inż. – Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji Żodino

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Systemów Inżynierii Środowiska

ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

e-mail: d.andraka@pb.edu.pl; kanal@tut.by

UTOMATIC SYSTEM OF WATER SUPPLY MANAGEMENT AS THE ELEMENT OF SUSTAINABLE MAINTENACE SYSTEM ON THE EXAMPLE OF ŻODINO WATERWORKS (BIELORUS)

SUMMARY: The paper presents application of automatic system to monitor, control and optimize operation of water distribution network and underground water intakes. The results achieved in Żodino Waterworks show significant reduction in costs of exploitation, mostly concerned with electrical energy savings. Implementation of integrated automatic systems of management and control in water supply systems appears to be one of the key factors encouraging introduction of sustainable maintenance strategy that merges ideas of sustainable development, good maintenance practice and scientific research.

KEY WORDS: sustainable maintenance, automatic control and management systems, energy savings, waterworks

Wstęp

System zaopatrzenia w wodę jest zespołem obiektów technicznych realizujących określone funkcje technologiczne i eksploatacyjne związane z ujmowaniem, uzdatnianiem oraz dystrybucją wody, stanowiących integralną całość. Zakres funkcjonowania tych systemów kształtowany jest z jednej strony przez zmienne warunki pracy związane ze zróżnicowanym poborem wody oraz zmienną jakością i ilością wody źródła zasilania, z drugiej zaś – uwarunkowany zasadą akceptacji przez konsumenta poziomu usług świadczonych przez przedsiębiorstwo wodociągowe¹. System wodociągowy jest przy tym elementem infrastruktury technicznej i krytycznej o charakterze służby publicznej, spełniając zadania polegające na świadczeniu usług zarówno komunalnych (dostawa wody do spożycia), strategicznych (dostawa wody w sytuacjach kryzysowych), jak i społecznych (dostawa wody do gaszenia pożarów) w sposób zorganizowany, długoterminowy i bezpieczny dla użytkownika oraz środowiska naturalnego. Gwarancją spełnienia wyżej wymienionych zadań może być zrównoważony system eksploatacji oparty na trzech podstawowych zasadach: zrównoważonego rozwoju (wypełnianie zadań bieżących w taki sposób, aby nie spowodować obniżenia poziomu usług przyszłym pokoleniom), dobrej praktyki eksploatacyjnej (stosowanie nowoczesnych materiałów i technologii oraz zintegrowanych systemów jakości) oraz naukowych (stały rozwój z wykorzystaniem najlepszych dostępnych technik)². Realizacja powyższych zasad jest możliwa dzięki zastosowaniu różnorodnych środków, wśród których szczególne znaczenie mogą mieć nowoczesne metody zarządzania pracą infrastruktury technicznej, wykorzystujące kompleksowy monitoring obiektów technologicznych powiązany z informatycznymi technikami analizy i przetwarzania danych, tworząc zintegrowany system automatycznego zarządzania, kontroli oraz wspomagania podejmowania decyzji.

W pracy przedstawiono rozwiązania zastosowane w Przedsiębiorstwie Wodociągów i Kanalizacji miasta Żodino na Białorusi, obsługującym sektor komunalny (około 62 tys. mieszkańców) oraz przemysłowy (samochodowy, tekstylny, spożywczy). Rozwiązania te, a także ich wymierne efekty użytkowe, doskonale wpisują się w opisaną wcześniej strategię zrównoważonego systemu eksploatacji wodociągu.

¹ I. Zimnoch, *Zastosowanie modelu komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego*, „Ochrona Środowiska” 2008 t. 30, nr 3, s. 31.

² S. Denczew, *Koncepcja zrównoważonego systemu eksploatacji wodociągów*, „Ochrona Środowiska” 2007 t. 29, nr 4, s. 70.

Struktura automatycznego systemu zarządzania dostawą wody miasta Żodino

Automatyczny system zarządzania dostawą wody (ASZDW) obejmuje następujące obiekty: 17 pompowni wodociągowych, 54 stacje wodomierzowe, 4 stacje pomiarowo-kontrolne oraz centralny punkt dyspozytorski zlokalizowany w siedzibie Przedsiębiorstwa w centrum miasta, który zapewnia zdalną kontrolę oraz sterowanie parametrami techniczno-technologicznych podległych obiektów.

Każdy ze składników systemu, z wyjątkiem centralnej dyspozytorni, działa, opierając się na 3-stopniowym schemacie sterowania i regulacji:

- pierwszy stopień to urządzenia kontrolno-regulacyjne na poszczególnych obiektach;
- drugi stopień to sterownik PLC (programowalny sterownik logiczny), który zbiera stany pracy i odczyty z wszystkich przyrządów, zapisuje je i przekazuje do centralnej dyspozytorni, jak również realizuje zadania lokalnego sterowania obiektem w oparciu o zadany algorytm lub sygnały z centralnej dyspozytorni;
- trzeci stopień to specjalistyczne oprogramowanie systemowe zainstalowane w centralnej dyspozytorni, pozwalające na pełny monitoring technologiczny zarówno całego systemu zaopatrzenia w wodę miasta, jak i jego poszczególnych elementów.

Zarządzanie pracą obiektów może być realizowane w dowolnym momencie czasu (*on-line*). Urządzenia pomiarowo-kontrolne poszczególnych obiektów zbierają i wstępnie analizują dane eksploatacyjne z możliwością sterowania pracą tych obiektów. W sytuacjach awaryjnych lub w przypadku przekroczenia zadanych parametrów pracy sterownik przesyła natychmiastowy sygnał do centralnej dyspozytorni oraz inicjuje procedurę awaryjną w celu ograniczenia możliwych negatywnych następstw nieprawidłowego działania obiektu. Przesył informacji do dyspozytorni odbywa się z wykorzystaniem transmisji GSM/GPRS. Taki układ pozwoli na wprowadzenie w perspektywie systemu zarządzania zintegrowanego z technologią GIS.

Dużą wagę przywiązuje się do bezpieczeństwa pracy systemu. Cały układ posiada szereg zabezpieczeń programowych i sprzętowych przed dostępem osób niepowołanych, które ograniczają w sposób selektywny dostęp użytkowników do baz danych i modułów sterujących. Poszczególne obiekty posiadają również zasilanie awaryjne, zapewniające zarówno bezpieczeństwo danych gromadzonych na obiektach, jak i nieprzerwaną pracę urządzeń technologicznych. Wszystkie elementy automatyki, a w szczególności urządzenia mikroprocesorowe, są ekranowane, co zabezpiecza przed zakłóceniami od pola elektrycznego w środowisku pracy.

Szczegółowy opis ASZDW

Od strony funkcjonalnej system zarządzania dostawą wody obejmuje 3 elementy: obiekty kontrolowane, centralną dyspozytornię i środki łączności. Do funkcji realizowanych w obiektach kontrolowanych zalicza się: zbieranie danych z urządzeń pomiarowych, wstępne przetwarzanie informacji oraz ich przesył, a także realizację funkcji sterowania. Szczegółowe funkcje kontrolno-sterujące realizowane w poszczególnych elementach systemu wodociągowo-kanalizacyjnego zależą od specyfiki technologicznej obiektu i obejmują przykładowo:

- możliwość zdalnego sterowania i kontroli pracy wyposażenia technologicznego obiektu (z poziomu centralnej dyspozytorni);
- odwzorowanie stanów pracy urządzeń na obiekcie;
- zbieranie, przetwarzanie i archiwizację danych z urządzeń pomiarowych na obiekcie;
- kontrolę parametrów elektrycznych agregatów pompowych z możliwością wyłączenia agregatów przy przekroczeniu zadanych parametrów eksploatacyjnych;
- pomiar i kontrolę ciśnienia na wejściu / wyjściu z obiektu, sygnalizacja przekroczenia zadanych parametrów;
- pomiar i kontrolę wydajności technologicznej, sygnalizację przekroczenia zadanych parametrów;
- w przypadku braku zasilania energetycznego – natychmiastowy przekaz stanu awaryjnego do centralnej dyspozytorni oraz zapewnienie autonomicznej pracy systemu sterowania przez 2 godziny;
- monitoring dostępu osób nieupoważnionych do obiektu.

Na podstawie informacji zebranych z wszystkich kontrolowanych obiektów system zaopatrzenia w wodę jest w całości sterowany automatycznie, z uwzględnieniem następujących reguł:

- dla podsystemu pompowania pierwszego stopnia (na ujęciu):
 - utrzymanie wymaganej objętości wody zgromadzonej w zbiornikach wody czystej, wydajności i założonego harmonogramu pracy studni, z uwzględnieniem bieżącego i prognozowanego zużycia wody w mieście,
 - kontrolę wydajności studni w funkcji ciśnienia w przewodzie tłocznym oraz współdziałania studni pracujących na tej samej gałęzi (decyzja o włączeniu lub wyłączeniu danej studni w celu osiągnięcia maksymalnej wydajności gałęzi przy minimalnym zużyciu energii);
- dla podsystemu pompowania drugiego stopnia (tranzyt do sieci miejskiej):
 - automatyczna regulacja ciśnienia na wyjściu z pompowni II stopnia oparta na wskazaniach czujników w punktach pomiarowo-kontrolnych, pompowniach sieciowych i stacjach wodomierzowych;
- dla punktów pomiarowo-kontrolnych:
 - układ sieci wodociągowej został podzielony na strefy obsługiwane przez wydzielone punkty, które ustalają wymagane ciśnienie na dopływie do każdej strefy za pomocą zaworów regulacyjnych,

- w przypadku niemożności uzyskania wymaganego ciśnienia w sieci za pomocą zaworów regulacyjnych system przekazuje sygnał o konieczności zwiększenia ciśnienia na wyjściu z pompowni II stopnia,
- istnieje możliwość powiązania układu sterowania punktów z pracą pompowni sieciowych;
- dla pompowni sieciowych:
 - w przypadku awarii na ujęciu wody system podaje sygnał wyłączenia pompowni sieciowych, które włączają się sukcesywnie po usunięciu awarii, w zależności od ciśnienia na dopływie,
 - w zależności od wskazań punktów pomiarowo-kontrolnych system może dostosowywać ustawienia falowników pomp celem zarówno zwiększenia, jak i zmniejszenia ciśnienia na wyjściu z pompowni.

Korzyści wynikające z zastosowania ASZDW

Efektywność energetyczna podsystemu dystrybucji wody jest jednym z ważniejszych czynników różnicujących koszt eksploatacji systemu wodociągowego. W sposób uproszczony zapotrzebowanie na energię elektryczną do pompowania wody w przedziale czasowym $(0,t)$ wyraża się zależnością³:

$$E_a = \sum_{j=1}^m \left(\int_0^t P_{el,j} dt \right) \quad (1)$$

przy czym:

$$P_{el,j} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_j \cdot H_j}{\eta_j} \quad (2)$$

gdzie:

m – liczba pracujących agregatów pompowych,

ρ, g – odpowiednio: gęstość wody, stała grawitacji,

Q_j [m³/s], H_j [m] – parametry pracy j -tej pompy (wydajność i wysokość podnoszenia).

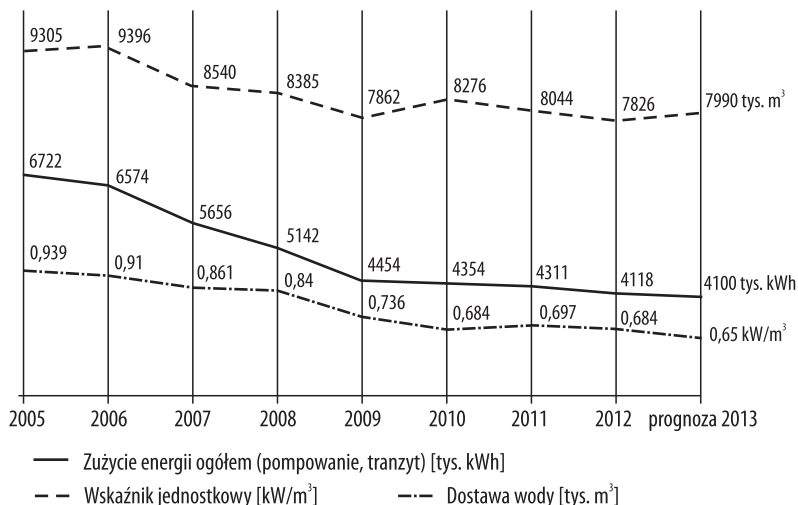
Dostosowanie wartości ciśnienia podawanego do sieci wodociągowej do warunków chwilowego poboru pozwala na optymalizację parametrów pracy pomp, co z kolei determinuje efektywność wykorzystania energii elektrycznej na pompowanie i transport wody w obrębie obszaru zasilania.

Wprowadzany sukcesywnie od 2006 roku w PWK Żodino system ASZDW pozwolił na osiągnięcie szeregu wymiernych oszczędności w kosztach eksploatacji sieci oraz poprawę jakości świadczonych usług przez przedsiębiorstwo. Na rysunku 1 pokazano dynamikę zmian zużycia energii elektrycznej na pompowanie i transport wody, która pokazuje bezpośredni wpływ zmian w sposobie sterowania pracą pomp w systemie na zmniejszanie się poboru energii elektrycznej. Na przestrzeni analizowanego okresu (2005 – 2012) można zaobserwować

³ W. Jędrał, *Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych*, Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Warszawa 2007, s. 24.

Rysunek 1

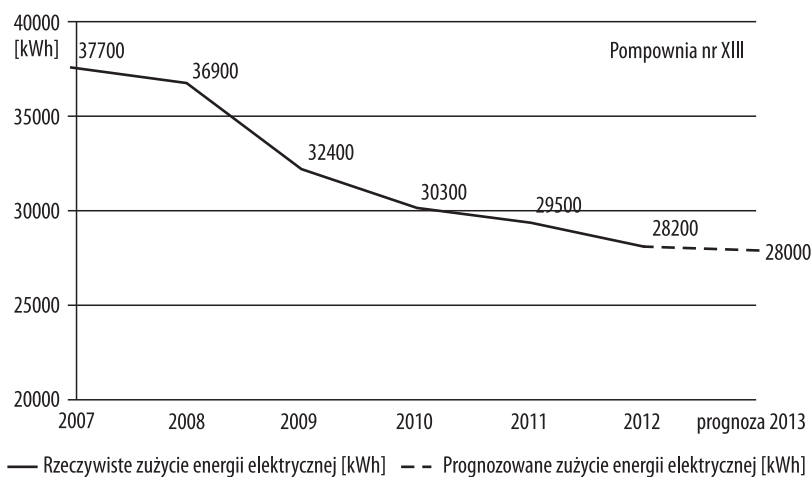
Dynamika zmian poboru wody w PWK Żodino i zużycia energii elektrycznej na pompowanie i przesył wody w latach 2005-2012



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2

Dynamika zmian zużycia energii elektrycznej w pompowni sieciowej nr XIII wynikająca ze zmiany wyposażenia pompowni oraz systemu sterowania



Źródło: opracowanie własne.

zmniejszenie się zużycia energii elektrycznej o około 36%, przy jednoczesnym obniżeniu produkcji wody jedynie o 15%, co wyraża się równocześnie obniżeniem się wskaźnika jednostkowego o około 25%.

Zastosowanie aktywnego systemu sterowania pracą pompowni jest możliwe jedynie we współpracy z nowoczesnymi agregatami pompowymi, pozwalającymi na płynną zmianę charakterystyki hydraulicznej. Integralną częścią prowadzonych prac modernizacyjnych była więc sukcesywna wymiana tradycyjnych pomp wirowych na wielostopniowe agregaty pompowe zasilane poprzez przemienniki częstotliwości, zrealizowana na wszystkich obiektach systemu wodociągowego. Efekty energetyczne odniesione do jednego z wybranych obiektów (pompownia sieciowa nr XIII) pokazano na rysunku 2, z którego wynika, że wprowadzone w 2007 roku zmiany spowodowały zmniejszenie zużycia energii elektrycznej na badanym obiekcie o około 25%.

Optymalizacja pracy ujęcia wód podziemnych

Jako główne zadania programu optymalizacji pracy ujęć wód podziemnych można wskazać:

- sprecyzowanie i określenie parametrów warstwy wodonośnej i studni głębinowych wraz z ich wyposażeniem i rurociągami;
- ocenę stanu technicznego poszczególnych elementów ujęcia pod kątem możliwości uzyskania wymaganej wydajności;
- dobór optymalnego wyposażenia obiektów ujęcia z uwzględnieniem parametrów eksploatacyjnych;
- prognozowanie zasobów eksploatacyjnych ujęcia z uwzględnieniem możliwości jego rozbudowy.

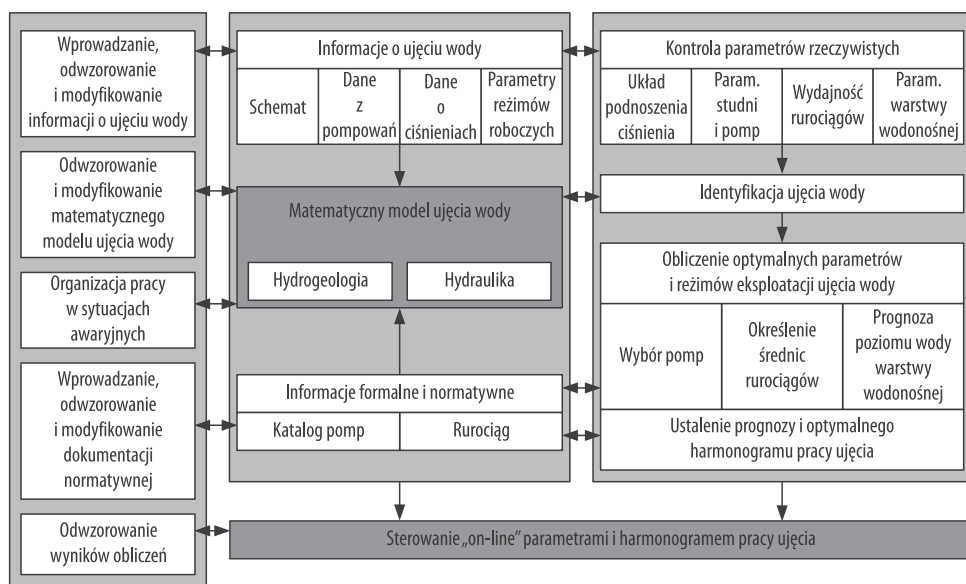
Badania i kontrola parametrów pracy ujęcia powinny być realizowane zarówno na etapie uruchamiania nowego ujęcia, jak i na ujęciach już istniejących, obejmując następujące czynności:

- zbieranie danych technicznych i parametrów eksploatacyjnych;
- obserwację rzeczywistych danych z eksploatacji działających urządzeń i wyposażenia;
- przetwarzanie i analizę zebranych informacji celem identyfikacji matematycznego opisu funkcjonowania ujęcia;
- opracowanie działań mających na celu intensyfikację pracy pompowni I-go stopnia i racjonalizację poboru wód podziemnych.

Dzięki zebranych informacjom eksploatacyjnym możliwe jest opracowanie schematu funkcjonalnego ujęcia wraz z charakterystyką technologiczną obiektów, urządzeń i armatury, jak też stworzenie bazy danych dotyczących hydrogeologicznych oraz opracowanie charakterystyki studni.

Obserwacja parametrów pracy istniejących urządzeń jest szczególnie cenna w przypadku pracy ujęcia pod zwiększonym obciążeniem, zwłaszcza w odniesieniu do takich parametrów, jak: ciśnienie wody w rurociągach tłocznych, obserwacja

Rysunek 3
Struktura Automatycznego Systemu Zarządzania Ujęciem (ASZU)



Źródło: opracowanie własne.

poziomów wody w studniach roboczych i kontrolnych, zużycie energii przez pompy głębinowe, poziomy napełnienia zbiornika wody czystej.

Jednym z trudniejszych zadań w ustaleniu optymalnego reżimu pracy ujęcia wód podziemnych jest ustalenie optymalnych parametrów pracy urządzeń do poboru wody, zapewniających uzyskanie wymaganej wydajności przy minimalizacji kosztów eksploatacyjnych. Wymaga to kompleksowej analizy złożonego systemu: {warstwa wodonośna} → {studnie wiercone} → {pompy głębinowe} → {przewody tranzytowe} → {zbiornik zapasowo-wyrównawczy}.

W celu opracowania dostępnych danych eksploatacyjnych ujęcia oraz ustalenia optymalnych parametrów jego pracy w Przedsiębiorstwie Wodociągowo-Kanalizacyjnym w Żodino został wdrożony Automatyczny System Zarządzania Ujęciem (ASZU), przedstawiony na rysunku 3.

System ten pozwala na:

- ocenę jakościową i ilościową funkcjonowania ujęcia z uwzględnieniem rzeczywistych i wymaganych wartości parametrów (między innymi określenie wskaźników gotowości urządzeń do wykonania założonych zadań, strat energetycznych oraz niedoborów wody w związku z wyłączeniem określonych studni, wymianą agregatów pompowych lub też awarią przewodów tranzytowych i inne);
- modelowanie pracy ujęcia z uwzględnieniem czynnika czasowego i empirycznej prognozy zjawiska kolmatacji filtrów, zarastania przewodów tranzytowych, zastosowanych pomp;

- opracowanie optymalnej strategii eksploatacji ujęcia (minimalizacja zużycia energii elektrycznej przy zachowaniu wymaganej wydajności), z uwzględnieniem dobowego, tygodniowego lub dowolnego czasu harmonogramu pracy studni;
- optymalne rozmieszczenia dostępnych agregatów pompowych w studniach ujęcia;
- analizę możliwości rozbudowy ujęcia z uwzględnieniem wyżej wymienionych celów.

Oprócz wspomnianych wyżej zadań nadrzędnych system umożliwia także opracowywanie różnorodnych analiz szczegółowych, mających na celu między innymi:

- automatyczną obróbkę danych z pompowań próbnych i eksploatacyjnych oraz ustalenie zwierciadła ustabilizowanego w warstwie wodonośnej;
- opracowanie danych z pompowań pod kątem właściwego doboru pomp głębinowych;
- opracowanie danych z pomiarów ciśnienia w rurociągach;
- opracowanie danych eksploatacyjnych w celu określenia zmian poziomu zwierciadła wody w eksploatowanych i kontrolnych studniach.

Na podstawie takich analiz możliwe jest między innymi określenie zasięgu lejów depresji studni, co z kolei umożliwia planowanie działań w zakresie ochrony zasobów wód podziemnych.

Jedną z ważniejszych cech użytkowych systemu jest możliwość optymalizacji parametrów doboru pomp głębinowych w studniach oraz rurociągów tranzytowych na terenie stacji wodociągowej. Daje to możliwość optymalizacji hydraulicznej pracy ujęcia zwłaszcza pod kątem jego energochłonności.

Wprowadzając program optymalizacji pracy ujęcia, należy mieć na uwadze przede wszystkim kryterium ekonomiczne, które w tym przypadku może przyjąć postać uproszczonego wskaźnika efektywności bezwzględnej⁴:

$$E = \frac{E_f}{K_c} \quad (3)$$

gdzie:

E_f – średnie roczne korzyści osiągnięte w wyniku inwestycji,

K_c – średnie roczne koszty całkowite inwestycji.

Warunkiem efektywności inwestycji jest, aby wskaźnik ten był co najmniej równy 1.

Biorąc pod uwagę fakt, że wprowadzenie programu optymalizacji pracy ujęcia wiąże się przede wszystkim ze zmniejszeniem zużycia energii elektrycznej związanej z pompowaniem wody, program optymalizacji będzie efektywny ekonomicznie, jeżeli będzie spełniona nierówność wynikająca ze wzorów (2) i (3):

⁴ R. Miłaszewski, *Ekonomika ochrony wód powierzchniowych*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 2003, s. 85.

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon \cdot \left(\frac{Q_i H_i}{\eta_i} - \frac{Q'_i H'_i}{\eta'_i} \right) \geq K \quad (4)$$

gdzie:

Q_i, H_i, η_i – parametry „starego” reżimu pracy i-tego elementu ujęcia (wydajność, wysokość podnoszenia i sprawność pomp),

Q'_i, H'_i, η'_i – parametry nowego reżimu pracy i-tego elementu ujęcia (jak wyżej),

ε – jednostkowy koszt energii elektrycznej,

K – nakłady związane z zastosowaniem programu optymalizacji.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono rozwiązania techniczne zastosowane w ramach modernizacji sieci zaopatrzenia w wodę miasta Żodino. Wprowadzone przez Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji systemy automatycznego zarządzania obiektami związanymi z ujmowaniem i dostawą wody pozwoliły na osiągnięcie wymiernych efektów związanych z optymalizacją warunków poboru wody z warstw wodonośnych z punktu widzenia ochrony zasobów wód podziemnych oraz dostarczania użytkownikom wody w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem.

Automatyczne sterowanie pracą zespołów pompowych z wykorzystaniem monitoringu parametrów eksploatacyjnych wybranych punktów sieci wodociągowej powinno być podstawowym kierunkiem zmian wprowadzanych w procesie eksploatacji wodociągów⁵. Działania takie przyczyniają się do znacznego zmniejszenia energochłonności pompowania wody. W przypadku przedsiębiorstw wodociągowych koszt energii elektrycznej jest jednym z głównych składników „technologicznych” w kosztach funkcjonowania przedsiębiorstwa (około 8% ogółu kosztów funkcjonowania zakładu⁶). Zmniejszenie energochłonności produkcji i dostawy wody może więc znacząco oddziaływać na łańcuch zależności ekonomicznych (koszt dostarczenia wody odbiorcom → koszt funkcjonowania zakładu → cena wody), będąc jednocześnie istotnym składnikiem szeroko pojętej strategii zrównoważonego rozwoju, a w szczególności przyczyniać się do realizacji koncepcji zrównoważonego systemu eksploatacji wodociągu.

Artykuł napisano na podstawie badań prowadzonych w Katedrze Systemów Inżynierii Środowiska PB w ramach pracy statutowej S/WBIIS/2/2011.

⁵ J. Studziński, *Zastosowanie danych z monitoringu w systemie zarządzania miejską siecią wodociągową*, w: „Studia i Materiały PSZW”, red. W. Bojar, t. 9, PSZW Bydgoszcz 2007, s. 154.

⁶ M. Bakalarczyk, *Usługi wodociągowo-kanalizacyjne w badaniach Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie”*, www.forumsamorządowe.pl [03-03-2013].