

dr inż. Andrzej Pawlak
prof. dr hab. Edward Wł. Mielcarzewicz
mgr inż. Jan Janczewski

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

WPŁYW OPTIMALNEGO STEROWANIA POMPOWNIAMI NA PARAMETRY SYSTEMU ZAOPATRZENIA W WODĘ

Metody energooszczędnej eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę

Dążenie do energooszczędnej eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę znalazło wyraz między innymi w wielokrotnie wypowiedzianym postulacie dbania o wysoką sprawność agregatów pompowych [1]. W praktyce powinno się to wyrażać przyjęciem wskaźnika sprawności, jako kryterium uzasadniające remont lub wymianę agregatów o niskich wartościach tego wskaźnika. Wskaźnik sprawności powinien także uzasadniać wybór zespołów agregatów pompowych, współpracujących ze sobą. Realizacja powyższego postulatów wiąże się z koniecznością dokonywania pomiarów wskaźnika sprawności agregatów w czasie ich przemysłowej eksploatacji. W związku z istnieniem konkretnych propozycji metod przeprowadzenia takich pomiarów [5], wymieniony postulat wydaje się już być obecnie możliwy do zrealizowania.

Możliwość energooszczędnej eksploatacji pompowni daje także metoda regulacji wydajności pompowni przez płynną zmianę prędkości obrotowej silników napędzających pompy [2]. Upowszechnienie w Polsce tej metody regulacji, choć już technicznie możliwe, jest jednak zadaniem na przyszłość.

Innym jakościowo odmiennym w stosunku do poprzednich, sposobem na zaoszczędzenie energii elektrycznej, w czasie eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę jest ustalenie optymalnych programów pracy pomp w przyjętych horyzontach czasowych. Odmienność tego sposobu oszczędzania związana jest z tym, że podczas gdy celem poprzednio wymienionych jest uzyskanie jak najlepszych wskaźników energetycznych pompowni i dzięki temu obniżenie zużycia energii, to zasadniczym celem ustalenia programów pracy pomp powinno być globalne, w skali systemu energetycznego, poprawienie wskaźnika sprawności energetycznej. W związku z tym ustalając programy pracy pomp powinno się dążyć do większego obciążenia systemu energetycznego w godzinach jego niedociążenia, charakteryzujących się niższą ceną za energię elektryczną. Pompownie powinny wówczas pracować, zgodnie z instytucyjnymi oczekiwaniami, z większą wydajnością,

aby w godzinach „drogiej energii elektrycznej” pracować z wydajnościami mniejszymi. Zauważyć można, że metoda wyznaczania harmonogramów pracy pomp może być stosowana jedynie w wypadku systemów zaopatrzenia w wodę, zawierających w swojej strukturze zbiorniki wyrównawcze, pozwalające magazynować wodę. Chcąc harmonogramy takie określić w sposób jednoznaczny należy sformułować i rozwiązać zadania optymalnego sterowania pracą pompowni w konkretnych warunkach określonych przez:

- strukturę systemu
- czasowe rozkłady zapotrzebowania na wodę
- taryfy opłat za energię elektryczną.

Sformułowanie zadania optymalizacyjnego

Po szczegółowych analizach przykładów wziętych z praktyki eksploatacyjnej oraz na podstawie literatury [2, 4, 6], za kryterium jakości wyznaczania optymalnych sterowań wodociągowym systemem grupowym — co sprowadza się do optymalnych planów pracy pompowni zasilających system — przyjęto oszacowanie minimum sumy średnich kosztów energii elektrycznej zużytej na wpompowanie wody do systemu w określonym horyzoncie optymalizacyjnym oraz kosztów poniesionych na wyprodukowanie wody wpompowywanej do systemu. Aby wyznaczyć optymalne plany pracy pomp, w sensie przyjętego kryterium optymalizacji, konieczne jest uwzględnienie szeregu warunków ograniczających, wynikających z funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę oraz ze specyfiki proponowanej metodyki wyznaczania sterowań. Podstawowym warunkiem, który musi być spełniony, jest konieczność dostarczenia użytkownikom systemu wody w ilościach zaspokajających ich potrzeby w rozważanym okresie horyzontu optymalizacyjnego. Wprowadzając powyższy warunek zakłada się możliwość całkowitego pokrycia potrzeb.

Zadanie sterowania systemem wodociagowym w przypadku istnienia deficytu wody jest problemem bardziej złożonym, a to ze względu na niemożliwość sformułowania prognoz zapotrzebowania na wodę [8] jak i konieczność usta-

lenia priorytetów odbiorców i jako takie wymaga skonstruowania odmiennych algorytmów sterowania, nie będących przedmiotem niniejszej pracy. Wprowadzony warunek dostarczania wymaganej ilości wody użytkownikom systemu wodociągowego określa jego podstawowe zadanie [4].

Kolejnym warunkiem w sposób istotny wpływającym na funkcjonowanie systemu w rozumianym w pracy sensie jest fakt występowania w systemie zbiorników magazynujących wodę, posiadających określone objętości i początkowe stany wody w zbiornikach.

Na funkcjonowanie systemu wywiera także wpływ ograniczona wielkość zasobów dyspozycyjnych źródeł wody. Wprawdzie dla prawidłowo zaprojektowanego systemu, ograniczenie to nie powinno być aktywne. Zdarzyć się jednak może, iż z czasem warunki hydrologiczne ulegną na tyle zmianie, w stosunku do zakładanych na etapie opracowania koncepcji systemu, że warunek ten stanie się istotny.

Wymienione powyżej warunki wynikają z funkcjonowania systemu. Kolejny istotny związek jest ze specyfiką proponowanej metodyki wyznaczania sterowania, a to ze względu na jego specjalne ujęcie. Jest to warunek, jaki na funkcjonowanie systemu nakłada jego struktura oraz parametry jego elementów, takich jak pompowne, zbiorniki, przewody wodociągowe z umieszczoną na nich niezbędną armaturą i aparaturą pomiarową. Specjalne traktowanie tego warunku polega na wyróżnieniu, spośród wszystkich parametrów hydraulicznych całego systemu, jedynie wektora wydajności pompowni oraz wektora natężeń przepływu wody na przewodach doprowadzających wodę do zbiorników i sprawdzeniu dopuszczalności rozkładów ciśnień w sieci, wywołanych tymi przepływami oraz rozbiórami wody w sieci.

Przykład obliczeniowy

Sformułowane powyżej zadanie optymalizacyjne zostało rozwiązane [7] przy wykorzystaniu techniki programowania dynamicznego. Zaproponowana w oparciu o tę technikę metoda wyznaczania optymalnych harmonogramów pracy pompowni, w okresie jednej doby została zapisana w postaci programu pt. HARMONOGRAM na EMC Odra 1305. W celu weryfikacji proponowanej przez autora metody wyznaczania harmonogramów pracy pompowni przeprowadzono szereg obliczeń testujących na przykładzie prostego, eksperymentalnego systemu zaopatrzenia w wodę. Decyzja przyjęcia do badań numerycznych systemu, o tak prostej strukturze wiąże się z tym, że w praktyce większość grupowych systemów zaopatrzenia w wodę, zawierających w swojej strukturze zbiorniki wyrównawcze można zdekomponować na szereg podsystemów typu pompownia — zbiornik — użytkownicy systemu lub pompownia — użytkownicy systemu — zbiornik. Przyjęty do obliczeń system swoim zasięgiem obejmuje dwie aglomeracje zasilane w wodę za pośrednictwem zbiorników początko-

wych o pojemnościach $V_1 = 40\,000\text{ m}^3$ i $V_2 = 10\,000\text{ m}^3$. Woda do zbiorników dostarczana jest układem rurociągów z jednej pompowni, w której zainstalowanych jest 6 pomp typu 40D30-2/1-1470, współpracujących w układzie równoległym.

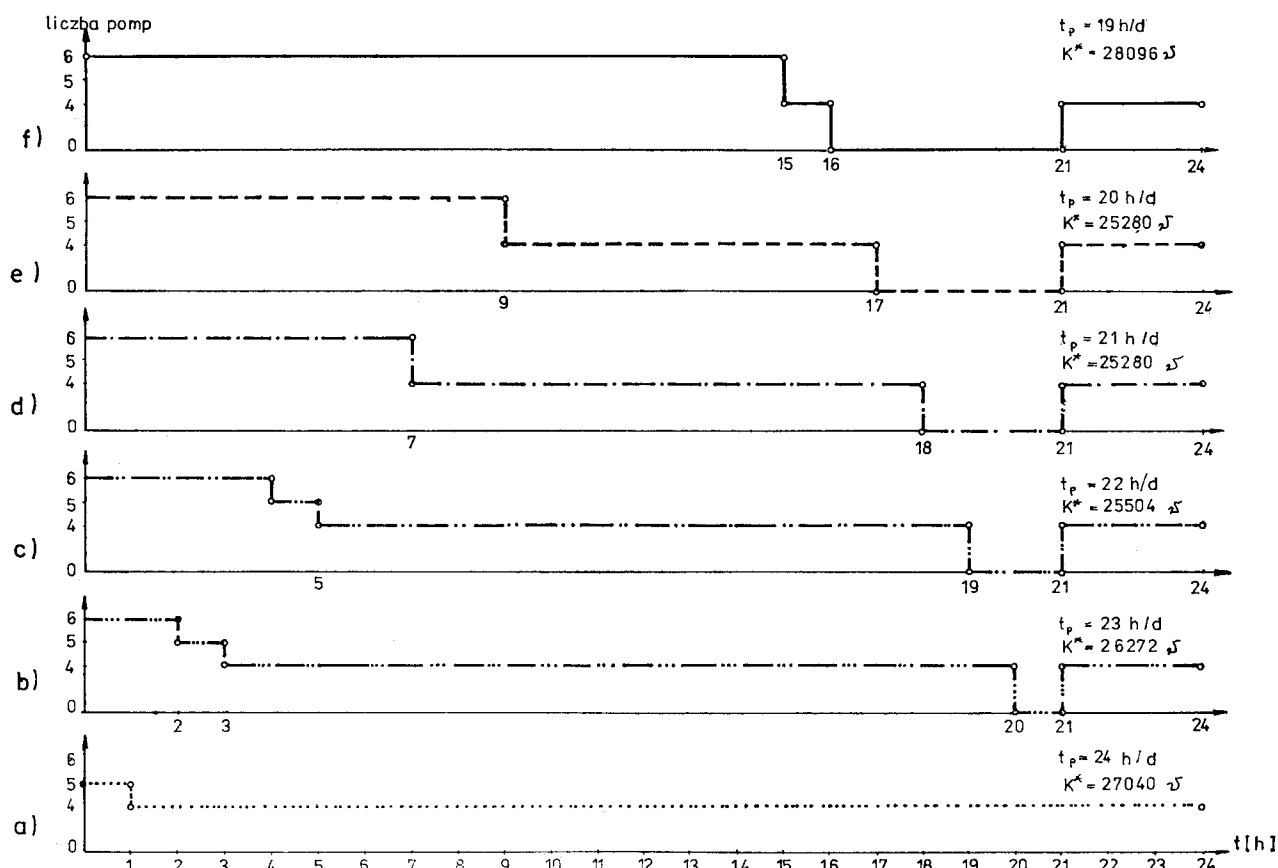
Hydrauliczna analiza współpracy pompowni z układem rurociągów oraz zbiornikami przeprowadzona przy pomocy programu SWH1 [8] wykazała, że poprawne zasilanie układu rozprowadzania wody wymaga współpracy czterech, pięciu lub sześciu pomp.

Warunki rozdziału wody pomiędzy obydwie aglomeracje określone są prognozowanymi dobowymi zapotrzebowaniami na wodę Q_{d1} i Q_{d2} oraz rozkładami godzinowych rozbiórów wody pobieranej przez te aglomeracje. Maksymalne dobowe zapotrzebowania na wodę w obydwu aglomeracjach wynoszą odpowiednio $Q_{d1\max} = 181\,000\text{ m}^3/\text{d}$ oraz $Q_{d2\max} = 41\,000\text{ m}^3/\text{d}$. W przeprowadzonych badaniach testowych rozkłady godzinowych rozbiórów wody przyjęto na podstawie badań zużycia wody w aglomeracjach miejsko-przemysłowych prowadzonych w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej [9]. W obliczeniach przyjęto dwupoziomową taryfę opłat za energię elektryczną. Niższe opłaty obowiązują w godzinach nocnych, tj. od 21.00 do 6.00 natomiast od 6.00 do 21.00 obowiązują opłaty wg taryfy wyższej. W przykładzie nie uwzględniono kosztów eksploatacji związanych z kosztami produkcji wody. Wywierają one wpływ na wybór strategii sterowania dopiero wówczas, gdy w systemie istnieją choć dwie pompownie czerpiące wodę z zakładów jej uzdatniania, w których są różne koszty produkcji wody.

Omówienie rezultatów obliczeń

Wprowadzając niezbędne parametry, charakteryzujące system do programu HARMONOGRAM uzyskano szereg rezultatów, które można uogólnić na całą klasę systemów zaopatrzenia w wodę, zawierających w swojej strukturze zbiorniki wyrównawcze. Przykładowo, przyjmując dobowe wartości zapotrzebowania na wodę w aglomeracjach A1 i A2 równe odpowiednio $Q_{d1} = 110\,300\text{ m}^3/\text{d}$ oraz $Q_{d2} = 31\,500\text{ m}^3/\text{d}$, w wyniku obliczeń uzyskano zbiór rozwiązań optymalnych lokalnie L^* , odpowiadających pracy pomp odpowiednio przez 19, 20, 21, 22, 23 i 24 godziny na dobę. Absolutnie najlepszym (w sensie minimalnych kosztów energii elektrycznej zużytej na pompowanie wody) harmonogramem pracy pompowni jest praca przez 20 lub 21 godzin na dobę.

Harmonogramy te są przedstawione w postaci wykresów d) i e) na rys. 1, a szacunkowy koszt ich realizacji wynosi 25 280 zł. Oprócz optymalnych harmonogramów pracy pompowni wyniki obliczeń uzyskane z EMC zawierają informacje o stanach wody w zbiornikach Z1 i Z2 na koniec każdej godziny okresu optymalizacyjnego. Zmiany napełnień obydwu zbiorników wywołane dopływami wody, realizowanymi pracą pomp wg wyznaczonych harmono-

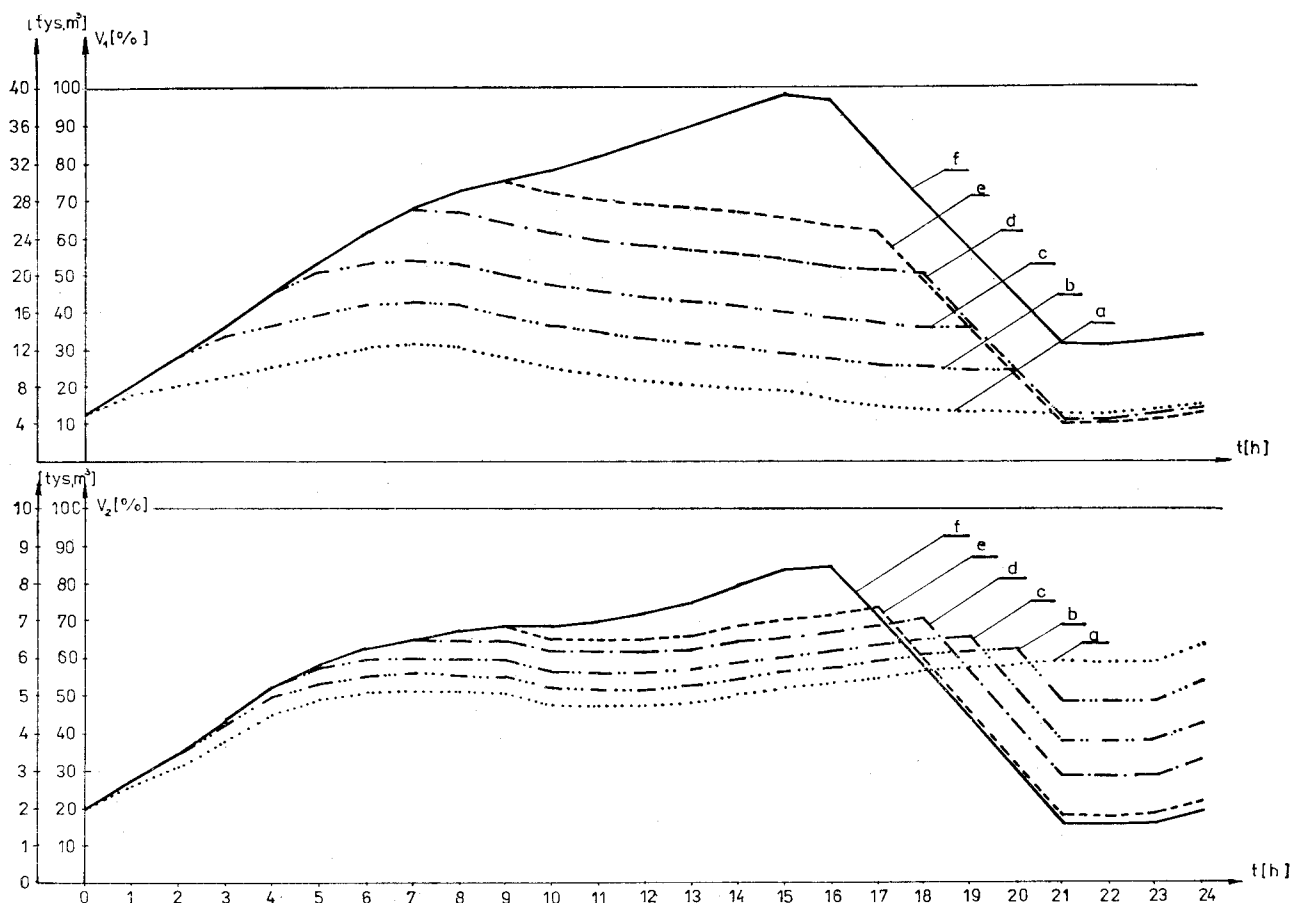


Rys. 1 Optymalne lokalnie harmonogramy pracy pompowni dla $Q_{d1}=118\,300\text{ m}^3/\text{d}$ i $Q_{d2}=31\,500\text{ m}^3/\text{d}$

gramów oraz odpływami równymi godzinowym rozkładom zapotrzebowania na wodę w aglomeracjach A1 i A2 przedstawiono na rys. 2. Z wykresów zmian stanów wody w zbiornikach, odpowiadających kolejnym optymalnym lokalnie harmonogramom pracy pompowni ze zbioru L^* wynika, że w rozważanym eksperymentalnym systemie najekonomiczniejsza realizacja dostarczania wody jej odbiorcom w ilości $Q_{d1}=118\,300\text{ m}^3/\text{d}$ i $Q_{d2}=31\,500\text{ m}^3/\text{d}$ nie wymaga wykorzystania całkowitej objętości zbiorników.

Realizując optymalny globalnie harmonogram pracy pompowni, którym jest praca przez 21 godzin na dobę wykorzystuje się 75% dyspozycyjnej objętości zbiornika Z1 i 74% dyspozycyjnej objętości zbiornika Z2. Całkowite wykorzystanie objętości zbiornika występuje przy realizacji 19-godzinnego harmonogramu pracy pompowni i związane jest z najdroższym z optymalnych lokalnie harmonogramów ze zbioru L^* . Realizacje harmonogramów pompowania wody przez 22, 23 i 24 godziny na dobę wymagają coraz mniejszych objętości dyspozycyjnych zbiorników, lecz należy pamiętać, że nie są to harmonogramy optymalne globalnie. Najmniej, bo 30% objętości zbiornika Z1 i 66% objętości zbiornika Z2 wykorzystywane jest przy realizacji 24-godzinnego harmonogramu pracy pompowni. Harmonogram ten jest nieznacznie droższy od harmonogramu optymalnego globalnie bo jedynie o 1960 zł. Można stąd więc wnioskować, że dla tak nieznacznego zy-

sku stanowiącego 6,5% kosztu 24-godzinnego pompowania nie jest opłacalna budowa zbiorników o objętościach, zapewniających realizację harmonogramów optymalnych globalnie. Wniosek ten wynika z tych samych przesłanek, które powodują, że analiza ekonomiczna nie uzasadnia potrzeby budowy zbiorników sieciowych w ogóle. Wiąże się to z pomijaniem w analizach ekonomicznych ewentualnych strat, jakie mogą ponieść użytkownicy systemu zaopatrzenia w wodę w przypadku jej niedostarczenia. Uwzględnienie tych kosztów w analizach podniosłoby poziom ryzyka, a to z kolei wpłynęło na zwiększenie stopnia gotowości systemu, wyrażającego się magazynowaniem określonych awaryjnych ilości wody. Wydaje się w tym świetle, że dotychczas prowadzone analizy ekonomiczne efektywności systemów zaopatrzenia w wodę powinny ulec weryfikacji. Innym ważnym zagadnieniem, które w tym miejscu się nasuwa jest określenie optymalnej objętości zbiorników wyrównawczych występujących w systemie. Z analizy obliczeń przeprowadzonych dla różnych wartości dobowych zapotrzebowań na wodę wynika, że maksymalne wymagane objętości zbiorników określone są na poziomach zmieniających się w zbiorniku Z1 od około $16\,500\text{ m}^3$ do $27\,000\text{ m}^3$, a w zbiorniku Z2 od $5\,000\text{ m}^3$ do $7\,100\text{ m}^3$, przy czym najmniejsze z maksymalnych stanów wody w zbiornikach odpowiadają wartościom dobowych zapotrzebowań na wodę zbliżonym do maksymalnych dobowych wydajności pom-



Rys. 2 Zmiany stanów wody w zbiornikach dla zasilañ wg harmonogramów optymalnych lokalnie

powni. Przypadkowi temu odpowiada, jako jedyna możliwa, równomierna praca pomp w ciągu doby, a wymagana w tym wypadku objętość zbiornika równa jest objętości, wyrównującej jedynie dobowe nierównomierności zapotrzebowania na wodę. Wzrost wykorzystywanej objętości zbiorników w miarę zmniejszenia wartości dobowych zapotrzebowań na wodę, którym odpowiadają optymalne harmonogramy pracy pomp, o zróżnicowanej w ciągu doby wydajności związany jest z przesunięciem w czasie stref maksymalnego, godzinowego zapotrzebowania na wodę i strefy niskich opłat za energię elektryczną. W związku z tym niezbędna objętość zbiorników wzrasta do wartości wyrównującej dobową nierównomierność rozbioru wody, w stosunku do nierównomiernych zasilañ, wg optymalnych harmonogramów pracy pompowni. Wzrost ten ma swoje granice, zależne od stosunku cen energii elektrycznej w godzinach „taniej” i „drogiej energii”, co można zauważyć, analizując koszty realizacji optymalnych lokalnie harmonogramów z rys. 1 oraz odpowiadające im wykresy zmian stanów wody w zbiornikach pokazane na rys. 2. Okazuje się, że największa objętość zbiorników wymagana jest przy realizacji pracy pompowni wg harmonogramu na rys. 1, który nie jest najtańszym sposobem eksploatacji systemu w zadanych warunkach.

Oprócz relacji cen energii elektrycznej, optymalna objętość zbiorników w systemie zależy

od dobowych rozkładów godzinowych zapotrzebowań na wodę i stopnia ich nierównomierności określanego jako procent zapotrzebowania na wodę, występującego w godzinach „drogiej energii”. Wpływ ten jest na tyle istotny, że powinno mu się poświęcić specjalne badania, zarówno w przypadkach systemów sterowania dla wodociągów projektowanych, jak też dla istniejących. I tak w czasie badań zużycia wody, w celu określenia prognostycznych modeli zapotrzebowania na wodę można dodatkowo zbadać rozkład dobowego zużycia wody, w zależności od stopnia nierównomierności tego rozkładu. Takie opracowanie pozwoli określić, na różnych poziomach prawdopodobieństwa przewyższania, wymagane optymalne objętości zbiorników. W przypadku systemów istniejących, w których istnieją zbiorniki o konkretnych objętościach, zestawienie takie pozwoli na przeprowadzenie analizy ekonomicznej, rozstrzygającej o opłacalności wprowadzenia sterowania, zmierzającego do ekonomicznego wykorzystania objętości zbiorników.

Wprowadzenie sterowania nie będzie uzasadnione, gdy w aglomeracjach objętych systemem zaopatrzenia w wodę duży procent dobowych zapotrzebowań na wodę będzie posiadał rozkłady uniemożliwiające zbudowanie optymalnych harmonogramów pracy pomp, na które nie oddziałują ograniczenia maksymalnej objętości zbiorników.

Przeprowadzone obliczenia potwierdziły spotykaną w publikacjach uwagę o tym, że ekonomiczna eksploatacja systemu zaopatrzenia w wodę, wyposażonego w zbiorniki wymaga zwiększenia objętości tych zbiorników w stosunku do objętości dotychczas przyjmowanych. Korzystne jest również, z uwagi na realizowalność optymalnych sterowań pracą pompowni, wyposażenie jej w zestawy pomp o wydajnościach gwarantujących dostarczenie dobowego zapotrzebowania na wodę w czasie krótszym niż doba.

Także z tego samego powodu pompownie powinny być wyposażone w większą liczbę pomp o sumarycznej wydajności, pozwalającej spełnić warunek poprzedni.

Wymienione powyżej uwagi należy traktować jako warunki konieczne sterowalności systemu zaopatrzenia w wodę.

LITERATURA

1. K. DOHNALIK: Prawidłowość oceny zużycia energii elektrycznej w zakładach wodociagowych. Mat. Seminar. pt. „Oszczędności energii el. w systemach wodoc. i kanaliz.” PZITS Kraków 1981.
2. P. DOHNALIK, W. MACIEJOWSKI: Kierunki optymalizacji zużycia energii el. w pompowniach wodoc. w świetle przeprowadzonych badań. Mat. VI konf. Nauk.-Techn. pt. „Zagadnienie zaopatrzenia miast i wsi” PZITS Poznań 1978.
3. P. DOHNALIK: Analiza wpływu regulacji wydajności pompy wirowej na warunki pracy układu pompownia—sieć—zbiornik wyrównawczy w świetle przeprowadzonych badań. Praca doktorska. Kraków 1979.
4. T. GABRYSZEWSKI: Wodociągi. Arkady, W-wa 1983.
5. A. M. GEISLER: Układy do ciągłego pomiaru wskaźników energetycznych agregatów pompowych. Mat. Seminar. pt. „Oszczędność energii...”, PZITS, Kraków 1981.
6. E. W. MIELCARZEWICZ: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, W-wa 1972 r.
7. A. PAWLAK: Optymalne sterowanie pompowniami zasilającymi grupowe systemy zaopatrzenia w wodę. Praca doktorska. Wrocław 1984.
8. PRACA ZBIOROWA: Raport SPR nr 19/80 Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocł. Wrocław 1980.
9. Z. SIWOŃ z zespołem: Opracowanie metod prognozowania zapotrzebowania na wodę w aglomeracji miejsko-przemysłowej Raport Inst. Inż. Ochr. Środ. P. Wr. Wrocław 1980.