

dr inż. Andrzej Pawlak
prof. zw. dr hab. inż. E. Wł. Mielcarzewicz
dr inż. Henryk Pełka

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

PODSTAWY KOMPUTEROWEGO STEROWANIA UKŁADEM ROZPROWADZANIA WODY W AGLOMERACJACH MIEJSKO-PRZEMYSŁOWYCH

Analiza zużycia energii elektrycznej w systemach rozprowadzania wody wykazała, że sumaryczne zużycie energii elektrycznej na cele technologiczne stanowi 5—10%, zaś na pompownie 90—95% całkowitego zużycia energii elektrycznej. Stąd też, mówiąc o optymalnej, w sensie kryteriów ekonomicznych, eksploatacji systemów rozprowadzania wody, uwagę należy przede wszystkim skupić na opracowaniu metod i środków, pozwalających na ekonomiczne sterowanie pracą zespołów pompowych, wody. Prace poświęcone problemowi minimalizacji zużycia energii elektrycznej w systemach rozprowadzania wody uległy z początkiem lat 70 dużej intensyfikacji i są prowadzone w dwóch zasadniczych kierunkach. [2, 5, 6]. Jednym z nich jest automatyzacja i telemechanizacja systemów rozprowadzania wody, czyli opracowanie i wyprodukowanie osprzętu, umożliwiającego realizację sterowania pracą elementów systemu oraz kontrolowanie jego funkcjonowania. Drugim natomiast, opracowanie efektywnych algorytmów sterowania rozdziałem wody w układach jej rozprowadzania, a zwłaszcza zawierających w swojej strukturze zbiorniki magazynujące wodę.

Pierwsze kroki w dziedzinie telemechanizacji wodociągów zostały już poczynione [5, 6]. Wykonano np. układ telemechaniczny dla ujęcia wód podziemnych w Lublinie. W zaawansowanych fazach realizacji znajdują się układy telemechaniczne, obejmujące układy rozprowadzania wody w Łodzi oraz Lublińsko-Głogowskim Okręgu Miedziowym.

Bardzo szeroki zakres, obejmujący zarówno układy automatyki jak i opracowanie metodyczne, mają prace poświęcone zagadnieniom sterowania, w systemach rozprowadzania wody prowadzone, w ramach Programów Rządowych.

Na podstawie dostępnych materiałów konferencyjnych [6] możemy stwierdzić, że prace metodologiczne poszły w kierunku badań podstawowych nad teorią algorytmów dla potrzeb sterowania systemami wodno-gospodarczymi. W wielu przypadkach autorzy opracowań zastrzegają, że praktyczne zastosowanie proponowanych algorytmów musi być ograniczone do sterowania pracą układu rozprowadzania wody z jednym zbiornikiem. Natomiast z praktycznego punktu widzenia istotnym wydaje się zaproponowanie metody rozwiązania zadania sterowania rozdziałem wody w czasie w sys-

temie wielozbiornikowym. Ze względu na skalę trudności, mierzoną wielkością potencjału maszyny cyfrowej niezbędnego do otrzymania rozwiązania możemy wyróżnić następujące klasy systemów:

- a) wielozbiornikowy system grupowy ze zbiornikami początkowymi zasilany z jednego źródła,
- b) wielozbiornikowy system pompowy ze zbiornikami początkowymi, zasilany z wielu źródeł,
- c) system wielozbiornikowy ze zbiornikami końcowymi, zasilany z wielu źródeł.

System wymieniony w punkcie c należy do systemów najbardziej złożonych i przez to, mając na uwadze będące obecnie do dyspozycji w Polsce maszyny cyfrowe, możliwości realizacji sterowania pracą takiego systemu są mało prawdopodobne. Nie wnikając dalej w możliwość rozwiązania tego zadania, w dalszych rozważaniach ograniczymy się do rozpatrywania zadania sterowania rozdziałem zasobów wodnych w systemie wymienionym w punkcie b oraz w przypadku szczególnym tego systemu wymienionym w punkcie a.

Sformułowanie zadania

W metodzie, którą proponujemy w niniejszym opracowaniu, wykorzystujemy fakt dysponowania konkretnymi zestawami pomp w pompowniach, które mogą być eksploatowane w systemie „włącz-wyłącz”. W takich warunkach eksploatacji pomp nie jesteśmy w stanie zrealizować dowolnej strategii uzupełniania zbiorników, a tylko takie, które wynikają z wydajności zainstalowanych agregatów pompowych.

Dlatego też racjonalnym wydaje się wyróżnienie dopuszczalnych, ze względu na poprawność funkcjonowania systemu, zestawów pomp i poszukiwanie rozwiązań jedynie na dyskretnym zbiorze średnich wartości wydajności wyróżnionych zestawów.

Przyjmując operowanie na wartościach średnich za zobowiązujące, zadanie sterowania rozdziałem wody w czasie, w wielozbiornikowym systemie pompowym zapiszemy jako zadanie minimalizacji kosztów poniesionych w okresie jednej doby na wpompowanie wody do systemu, w ilości nie mniejszej niż prognozowane dobowe zapotrzebowanie na wodę, zgłaszane przez użytkowników systemu przy spełnieniu ograniczeń, wynikających ze struktury syste-

mu, ograniczeń nałożonych na wydajność źródeł zasilania oraz użytkową objętość zbiorników, występujących w systemie rozprowadzania wody.

W odniesieniu do systemu grupowego zaopatrzenia w wodę, zasilanego przez M pompowni, które tłoczą wodę do K zbiorników, bezpośrednio lub pośrednio zasilających aglomeracje miejsko-przemysłowe, opisane za pomocą prognostycznych modeli zapotrzebowania na wodę $\tilde{Q}_{d_k}$, funkcja kryterialna zadania sterowania rodzajem wody w czasie jednej doby ma postać:

$$E = \sum_{n=1}^{24} F(\bar{Q}_p, n) = \sum_{n=1}^{24} C_n \cdot \Delta T_n \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot P_{ij}(\bar{Q}_p, n) \rightarrow \min_{\bar{Q}_p(n)} \quad (1)$$

przy zachowaniu warunku

$$\sum_{j \in z_i} \delta_{ij} = 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, M\},$$

który mówi, że rozwiązania będą poszukiwane na dyskretnym zbiorze możliwych włączeń pomp w tej samej pompowni,

gdzie:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{— gdy rozpatrywany jest } j\text{-ty stan} \\ & \text{pracy w } i\text{-tej pompowni} \\ 0 & \text{— w przeciwnym przypadku} \end{cases}$$

C_n — taryfa opłat za energię elektryczną w n -tym okresie doby.

ΔT_n — kwant czasu, w którym założono niezmiennosc parametrów zadania $\Delta T_n = 1$ godz.

$\bar{Q}_p(n)$ — średnia wydajność pompowni w n -tym przedziale czasu.

P_{ij} — moc na wale silnika agregatu pompowego odpowiadająca pracy j -tego zestawu pomp pracujących w i -tej pompowni z wydajnością $\bar{Q}_p$.

Warunek bilansu wody, mówiący o konieczności wpompowania do systemu wody w ciągu doby, w ilości nie mniejszej niż sumaryczne prognozowane zapotrzebowanie na wodę wszystkich użytkowników systemu zapiszemy w postaci nierówności:

$$\sum_{n=1}^{24} \Delta T_n \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}} \right) \sum_{k=1}^K \tilde{Q}_{d_k} \quad (2)$$

Warunek ten określa podstawowe zadania systemu. Dla prawidłowego funkcjonowania systemu spełnione muszą być ograniczenia, wynikające z aktualnego stanu wody w zbiornikach oraz ich ograniczonej pojemności. Warunek ten zapiszemy w postaci podwójnej nierówności:

$$V_{\min} \leq V_{n-1} + \Delta T_n \cdot (Q_z(n)_k - \sigma(n)_k) \leq V_{\max} \quad (3)$$

w której:

$V_{\min}, V_{\max}$ — odpowiednio minimalne i maksymalna dopuszczalna dopuszczalna pojemność zbiornika,

$Q_z(n)_k$ — ilość wody wpływającej do k -tego zbiornika w n -tym okresie doby.

$\sigma(n)_k$ — pobór wody z k -tego zbiornika w n -tej godzinie doby równy prognozowanemu godzinowemu zapotrzebowaniu na wodę użytkowników ze strefy zasilanej przez ten zbiornik.

Drugim bardzo istotnym dla poprawnego określenia modelu funkcjonowania systemu jest warunek, wynikający z ograniczeń strukturalnych systemu.

W niniejszym zadaniu, ze względu na przyjętą później koncepcję rozwiązania, interesuje on nas w następującej postaci operatorowej:

$$Q_z^{[K \times 1]} = \Phi [Q_p^{[M \times 1]}] \quad (4)$$

w której:

$Q_z^{[K \times 1]}$ — k -wymiarowy wektor natężeń dopływów wody do zbiorników

Φ — operator systemu wyrażony za pomocą równań wynikających z praw Kirchhoffa.

$A \cdot q = R$ — dla sieci typu drzewo { dla sieci
 $B \cdot \Delta h = 0$ { obwo-
dowej

Dodatkowym warunkiem, który powinien być spełniony z definicji, ponieważ jest warunkiem podstawowym przy projektowaniu ujęć wody jest warunek, wynikający z ograniczonej wydajności ujęć W :

$$\sum_{n=1}^{24} \Delta T_n \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot Q_{p_{ij}}(n) \leq W_i \quad (5)$$

Poczynione uprzednio założenia, związane ze specyfiką zadania i sposobem jego sformułowania, pozwalają na ustalenie cyklu obliczeniowego, w którym możemy wyróżnić etap nazywany „wstępnym” oraz etap „właściwego rozwiązania zadania”.

Zakres czynności niezbędnych do wykonania na każdym etapie przedstawimy na poniższym schemacie:

Badania symulacyjne:

Etap A „wstępny”

- wygenerowanie dopuszczalnych układów pomp zasilających
- obliczenie natężeń dopływu wody do zbiorników z uwzględnieniem struktury układu
- obliczenie mocy układów agregatów zasilających.

Etap B

- obliczenie prognozowanego dobowego i godzinowego zapotrzebowania na wodę,
- weryfikacja modeli prognostycznych.

Etap C „właściwego rozwiązania zadania”

- wybór zbioru stanów dopuszczalnych uwzględniający warunki ograniczające wynikające z równań zbiorników oraz bilansu wody w ciągu doby.
- poszukiwanie optymalnej strategii zasilania systemu.

Cykl obliczeń obejmujący punkt C, powtarzany jest za każdym razem, gdy występują istotne różnice między obliczoną a realizowaną trajektorią stanów rozdziału zasobów wodnych. Konieczne staje się wówczas wyznaczenie nowej strategii zasilania systemu, uwzględniającej jego aktualny stan. Cykl obliczeń obejmujący punkt B i C, powtarzany jest co dobowo.

Cykl obliczeń obejmujący wszystkie punkty, należy przeprowadzić ponownie wówczas, gdy w wyniku długotrwałej awarii lub rozbudowy sieci zostanie w sposób trwały zmieniona jej struktura.

Koncepcja rozwiązania zadania

Cechą charakterystyczną sformułowanego zadania optymalizacji jest addytywna postać funkcji kryterialnej:

$$E = \sum_{n=1}^{24} F(\bar{Q}_p, n) \rightarrow \min_{\bar{Q}_p(n)} \quad (6)$$

przy ograniczeniach wynikających z bilansu wody w ciągu doby.

Fakt ten pozwala zadania tego typu zaliczyć do klasy zadań optymalizacji wieloetapowej, a tym samym wykorzystać do jego rozwiązania, podstawową dla tej klasy zadań metodą, wynikającą z zasady optymalności Bellmana [1, 4]. Podejście to sprawia, że rozwiązanie $N \cdot M$ wymiarowe zadania optymalizacji sprawdzamy do rozwiązania N zadań M wymiarowych, sformułowanych w postaci rekurencyjnych równań wynikających z zasady optymalności

$$\begin{aligned} B(\bar{Q}_p(n) | S(n); n) = \\ \min_{\bar{Q}_p(n)} \\ = B^*(S(n-1); n-1) + F(\bar{Q}_p(n); n) \\ \text{dla } n=1, \dots, N; \quad B(\bar{Q}_p(0); 0) = 0 \end{aligned}$$

Interpretacja sformułowanego zadania rozdziału zasobów wodnych w konwencji terminologii występującej w zadaniach optymalizacji wieloetapowej, wymaga zdefiniowania niezbędnego zakresu pojęć [1, 4]. Pod pojęciem łańcucha decyzji rozumie się kolejno następujące po sobie w czasie wartości natężenia $\bar{Q}_p(n)$ zasilania systemu w wodę przez pompownie. Pod pojęciem stanu procesu rozdziału wody $S(n)$ będzie my rozumieć ilość wody rozdysponowanej do chwili n , tj. ilości wody wtłoczonej do systemu od początku okresu optymalizacyjnego do chwili n . Dla przyjętej interpretacji zmiennej stanu $S(n)$, stan w chwili końcowej N będzie odpowiadał ilości wody, która musi być wpompowana do systemu w ciągu doby.

$$S(N) = \sum_{k=1}^K \bar{Q}_{d_k} \quad (8)$$

Ponieważ przy metodzie sterowania pracą pomp w układzie „włącz—wyłącz” nie można zrealizować dowolnego łańcucha decyzji, a tylko takie, jakie wynikają z kombinacji dyskretnych

wartości wydajności pomp, warunek (8) musimy przedstawić w postaci nierówności:

$$S(N) \geq \sum_{k=1}^K \bar{Q}_{d_k} \quad (9)$$

Nierówność ta odpowiada warunkowi (2), który określiliśmy mianem warunku bilansu wody w zadaniu jej rozdziału.

Stan procesu w etapie pierwszym określony jest zależnością:

$$S(1) = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(1); \quad \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} = 1 \quad (10)$$

co oznacza, że ilość rozdysponowanej wody po pierwszym etapie optymalizacji jest równa ilości wody wpompowanej w tym etapie do systemu. Stan procesu w etapie drugim jest związany ze stanem $S(1)$ i decyzją $\bar{Q}_{p_{ij}}(2)$ zgodnie z zależnością:

$$\begin{aligned} S(2) = \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(1) + \\ + \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(2); \end{aligned} \quad (11)$$

albo inaczej:

$$S(2) = S(1) + \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(2); \quad (12)$$

Uogólnienie powyższego zapisu prowadzi do zależności rekurencyjnej, będącej równaniem przejścia stanów procesu rozdziału wody:

$$S(n) = S(n-1) + \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(n); \quad (13)$$

Na zmienne decyzje $\bar{Q}_{p_{ij}}(n)$ oraz zmienne stanu procesu $S(n)$ nakłada się na każdym etapie optymalizacji warunki ograniczające, wynikające z równań bilansu wody (2) w systemie oraz warunki wynikające z równań stanu zbiorników (3).

W odniesieniu do przyjętej interpretacji stanów procesu rozdziału wody słuszną jest nierówność:

$$S(n+1) \geq S(n); \quad n=0, \dots, N-1$$

oraz

$$S(n) \leq \sum_{i=1}^M \sum_{j \in z_i} \delta_{ij} \cdot \bar{Q}_{p_{ij}}(n) \leq S(n+1) \quad (14)$$

Powyższy zapis procesu rozdziału wody w systemie jej rozprowadzania możemy przedstawić za pomocą grafu N warstwowego, zawierającego

rającego w pierwszej warstwie $N_p = \prod_{i=1}^M Z_i$ mo-

żliwych stanów procesu, a w każdej następnej już $n \cdot (N_p - 1)$. Nałożenie na ten graf warunków ograniczających, wynikających z równań bilansu wody (2) oraz równań stanu zbiorników (3) obcina powyższy graf do N warstwowego podgrafu, dopuszczalnych stanów procesu o znacznie mniejszej liczbie stanów dopuszczalnych w każdej warstwie. Znaleźnienie rozwiązania optymalnego, czyli takiego łańcucha decyzji $Q_p(n)$; $n=1, \dots, 24$ wpompowania wody do systemu w ciągu doby, który minimalizuje funkcję kosztów pompowania (1), sprowadza się do wyboru najtańszej drogi we wspomnianym powyżej grafie stanów dopuszczalnych.

Do klasy zadań, do których należy rozpatrywane przez nas zagadnienie, tzn. zadań optymalizacji wieloetapowej systemów odwracalnych, z nałożonymi warunkami ograniczającymi na stany końcowe, najbardziej efektywnym algorytmem poszukiwania rozwiązań jest algorytm „postępowania w przód typu katalog” będący analogiem algorytmu „postępowania wstecz” [4]. Algorytm ten zapiszemy w następującej postaci:

Krok 1:

Przyjąć za decyzje optymalne wszystkie możliwe wartości zasilania $\bar{Q}_p(1)$.

Krok 2:

Rozwiązać lokalne zadania optymalizacji

$$B(\bar{Q}_p(2); S(2); 1) = F(\bar{Q}_p(2); 2) \rightarrow \min_{\bar{Q}_p(2)}$$

Decyzją optymalną oznaczyć przez $\bar{Q}_p^*(2; S_1(2))$, a optymalną wartość funkcji przez $B^*(S_1(2))$.

Powyższe zadanie rozwiązać dla każdego stanu $S(2) \in S(2)$ tj. warstwy stanów dopuszczalnych na etapie drugim.

Krok n: $n=3, \dots, N$

Oznaczyć przez $L^*[S(n-1); S(1)]$ zbiór optymalnych łańcuchów stanu, prowadzących z każdego stanu warstwy $n-1$ tj. $S(n-1)$ do stanów w warstwie $S(1)$.

Wziąć pod uwagę zbiór $\{L[S(n), S(1)]\}$ łańcuchów prowadzących z ustalonych stanów warstwy $S(n)$ do stanów warstwy $S(1)$.

Każdemu łańcuchowi stanów ze zbioru $\{L[S(n), S(1)]\}$ odpowiada łańcuch decyzji; którego jakość jest określona wzorem:

$$B(Q_p(n), S^1(n); n) = B^*(S(n-1); (n-1) + F(Q_p(n); n) \rightarrow \min_{Q_p(n)}$$

Znaleźnienie optymalnej decyzji $\bar{Q}_p^*[(n)|S^1(n)]$ polega na rozwiązaniu zadania minimalizacji określonego powyższym wzorem. Zadanie to rozwiązujemy dla wszystkich stanów $S^1(n) \in S(n)$ warstwy n .

Po dojściu do ostatniej warstwy N będziemy dysponować katalogiem optymalnych łańcuchów. Dla najlepszego łańcucha katalogu od-

czytujemy łańcuch optymalnych decyzji $Q_{pij}^*(n)$; $n=1, \dots, N$ oraz stanów $S^*(1), \dots, S^*(N)$. Może się okazać, że ilość stanów dopuszczalnych będzie tak duża, co może mieć miejsce w przypadkach systemów zasilanych przez więcej niż dwie pompownie, że w trakcie rozwiązywania zadania przekroczone zostaną parametry emc. Wówczas należy zastosować pewne modyfikacje metody programowania dynamicznego. Ominięcie wspomnianej trudności jest możliwe przez zastosowanie iteracyjnych metod programowania dynamicznego. Wykorzystywana przez nas metoda przyrostowego programowania dynamicznego znajduje swe źródło w teoretycznych pracach Jacobsona i Mayne'a [3], dotyczących jednak poszukiwania rozwiązań na zbiorach ciągłych.

W przypadku proponowanego przez nas rozwiązania zadania tok postępowania jest następujący:

1. Wybieramy arbitralnie jedną z dopuszczalnych trajektorii stanów, a następnie poszukujemy rozwiązania zadania (7) na zbiorze zawartym w korytarzu stanów, wyznaczonym przez trajektorie sąsiadujące z wybraną na wstępie.

2. Trajektorja będąca optymalnym rozwiązaniem zadania (7) w danym kroku iteracyjnym, staje się trajektorią, na bazie której budowany jest kolejny korytarz stanów ograniczający zbiór rozwiązań.

Cykl obliczeniowy, w którym do poszukiwania rozwiązań optymalnych wykorzystujemy przedstawiony poprzednio algorytm typu katalog, jest powtarzany do chwili, gdy wybrany zostanie łańcuch o najmniejszej wartości funkcji, określającej jakość wyznaczonego przezeń rozdziału wody.

Przedstawiona metoda rozwiązania zadania rozdziału zasobów wodnych w grupowych wielozbiornikowych układach rozprowadzania wody stała się podstawą do stworzenia pakietu programów na emc, do komputerowo wspomaganego sterowania pracą takich systemów.

Rezultatami obliczeń wspomnianych programów są między innymi harmonogramy pracy pomp w poszczególnych pompowniach oraz stany wody w zbiornikach. Realizacja uzyskanych rezultatów obliczeń, zapewni zminimalizowanie dobowych kosztów, poniesionych na opłaty za energię elektryczną zużytą na dostarczenie wody odbiorcom.

LITERATURA

1. W. G. BOŁTANSKI: Sterowanie optymalne układami dyskretnymi, WNT, Warszawa 1978.
2. J. L. GERLT, G. P. HADDIX: System operation analysis model, July 1975, Journal of AWWA.
3. M. D. JACOBSON, D. O. MAJNE: Differential Dynamic Programming, American Elsevier, New York 1970.
4. J. SEIDLER, A. BADACH, W. MOLISZ: Metody rozwiązywania zadań optymalizacji, WNT, Warszawa 1980.
5. Materiały na Konferencję Naukowo-Techniczną „Intensyfikacja zaopatrzenia w wodę miast i osiedli”. Wisła 1981.
6. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 694 i 695, „Sterowanie systemem wodno-gospodarczym na obszarze aglomeracji miejsko-przemysłowej”, Gliwice 1981.