ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria : AUTOMATYKA z.79 Nr kol. 848

Jerzy KOTOWSKI
Jan NIKODEM
Jędrzej UŁASIEWICZ
Instytut Cybernetyki Technicznej
Politechnika Wrocławska

WYKORZYSTANIE METODY AGREGACJI MODELU SIECI DO OPTYMALNEGO STEROWANIA SYSTEMEM WODOCIĄGOWYM

Streszczenie

W pracy sformułowano zadanie optymalnego sterowania systemem wodociągowym zawierającym zbiorniki. Przedstawiono metodę otrzymywania zagregowanego modelu sieci w postaci układu form kwadratowych. Wykorzystanie modelu zagregowanego pozwala na istotne uproszczenie zadania wyjściowego. Podano wyniki badań testowych modelu oraz algorytmu rozwiązywania zadania optymalizacji sformułowanego w oparciu o model zagregowany. Określono także zakres zastosowań opracowanych metod.

1. WSTĘP

W skład typowego systemu zaopatrzenia w wodę aglomeracji miejsko-przemysłowej wchodzą takie podsystemy, jak:ujęcia wody, stacje uzdatniania, pompownie, sieć rozprowadzania, zbiorniki sieciowe i odbiorcy. Strukturę rozważanej klasy systemów pokazano na rys. 1. Model nie ujmuje zagadnień związanych z dostarczaniem wody surowej i jej uzdatnianiem. Podstawowym zadaniem systemu jest dostarczanie odbiorcom wymaganej przez nich ilości wody, co sprowadza się do utrzymania ciśnień w węzłach sieci w odpowiednich przedziałach. Zmieniające się zapotrzebowanie odbiorców i cena energii elektrycznej oraz ograniczone wydajności źródeł uzasadniają celowość istnienia zbiorników sieciowych. Gromadzony w nich zapas jest wykorzystywany w okresach wysokiego zapotrzebowania i cen energii. Możliwość akumulacji wody w zbiornikach oraz zróżnicowanie cen energii w ciągu doby umożliwia takie sterowanie systemem,aby koszty energii zużywanej przez pompownie były możliwie najmniejsze. Za funkcję celu przyjęto koszt energii zużywanej w ciągu doby przez pompownie. Gdy koszt uzyskiwania wody uzdatnionej jest proporcjonalny do jej ilości,może on być także uwzględniony w funkcji celu. W modelu rozważanego systemu uwzględnione zostały następujące czynniki wynikające z praw fizycznych obowiązujących w systemach hydraulicznych oraz ze stosowanych obecnie rozwiązań technicznych.

a) Sieć rozprowadzająca jest nieliniową siecią,w której obowiązują I i II prawo Kirchhoffa.

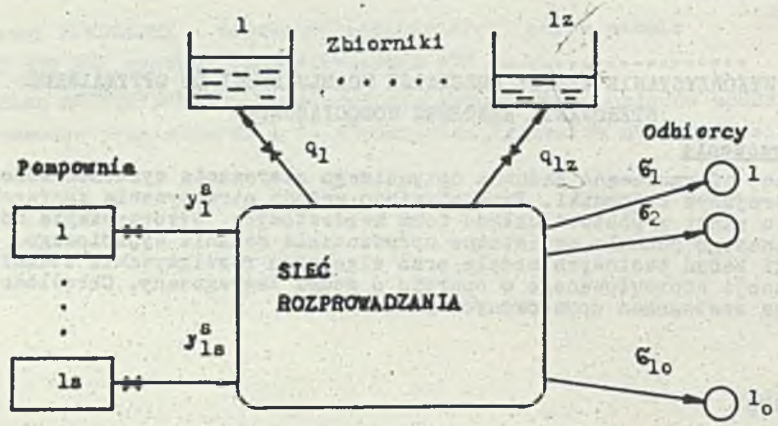
b) Pompownie, zbiorniki i odbiorcy oddziałują na siebie za pośrednictwem sieci.

c) Aby system mógł pracować w prawidłowy i zaplanowany sposób, muszą być spełnione określone relacje pomiędzy ciśnieniami w węzłach sieci.

d) Sterowanie pompami odbywa się w sposób dyskretny poprzez włączanie i wyłączanie kolejnych pomp.

e) Zbiorniki wnoszą dynamikę do systemu.

Założono, że w systemie nie występują deficyty, a więc, że zapotrzebowanie odbiorców może być pokryte.



Rys. 1. Struktura typowego systemu wodociągowego.

W systemach wodociągowych czasowa i przestrzenna struktura potrzeb posiada stochastyczny charakter, co jest powodem dodatkowych trudności. Wybór funkcji celu i ograniczeń zadania optymalnego sterowania systemem wodociągowym w znacznej mierze zależy od konkretnych potrzeb. Uwzględnienie pełnego modelu sieci oraz dynamiki wnoszonej przez zbiorniki prowadzi, dla większych systemów, do zadań w praktyce nierozwiązywalnych. Toteż konieczne bywa zwykle wprowadzanie pewnych uproszczeń. Obecność w systemie znacznej liczby zbiorników powoduje konieczność radykalnego uproszczenia modelu sieci. Podejście takie zaprezentowane zostało w pracach [1], [2], [8]. Niniejsza praca, będąca w dużym stopniu kontynuacją [3], koncentruje się na metodach przezwyciężania trudności wynikłych z uwzględnienia czynników a) do d) dla dużych systemów wodociągowych. Grawitacyjny charakter wypływu wody ze zbiorników powoduje, że gdy ciśnienie w sieci jest zbyt wysokie, zbiornik może nie osiągać zadanej wydajności. Stąd planowanie pracy zbiorników powinno uwzględniać ciśnienia panujące w sieci. Koncepcja agregacji modelu sieci, za pomocą form kwadratowych, podana została w [3]. Tutaj podano jej rozwinięcie oraz wyniki badań testowych. Przyjęta postać modelu umożliwia określenie jego parametrów na podstawie eksperymentu identyfikacyjnego przeprowadzonego bezpośrednio na systemie. Stąd możliwa jest optymalizacja systemu o nieznanej w pełni strukturze i parametrach łuków sieci. Zadanie optymalizacji sformułowane w oparciu o model zagregowany jest nieliniowym zadaniem programowania mieszanego. Jego statyczna wersja może być skutecznie rozwiązana w oparciu o koncepcję metody podziału i ograniczeń.

2. WIELOPOZIOMOWA STRUKTURA ROZWIĄZANIA ZADANIA OPTYMALIZACJI SYSTEMU WODOCIĄGOWEGO

Złożoność zadania optymalizacji, uwzględniającego wymienione wcześniej czynniki, powoduje konieczność jego dekompozycji. Polega ona na rozdzieleniu dynamicznej i statycznej części zadania. Koncepcja postępowania przedstawiona była w pracach [3], [5]. Zadaniem górnego poziomu jest wyznaczanie optymalnego harmonogramu wykorzystania zbiorników (wyznaczenia przepływów do zbiorników $\{q_i(t)\}$ $t \in T$, $i=1,\dots,l_z$). $T = \{1,\dots,24\}$ jest zbiorem dyskretnych chwil czasowych, a l_z liczbą zbiorników.

Aby możliwe było rozwiązanie zadania górnego poziomu, konieczne jest rozwiązanie znacznej liczby zadań statycznych, co jest realizowane na niższym poziomie. Poziom statycznej optymalizacji dla danego wektora przepływów do zbiorników $q_i(t)$ i zapotrzebowań odbiorców $\sigma_i(t)$ wyznacza optymalną konfigurację pracy pompowni ($n_i(t)$ - liczba włączonych pomp w pompowni) oraz wydajność $y_i^s(t)$ pompowni i. Wartość funkcji celu $F(q_i(t),\sigma(t))$ przekazywana jest na poziom nadrzędny. Rozwiązanie zadania statycznego wymaga uwzględnienia modelu sieci. Przyjęto, że jest on następujący:

$$Ay = p \tag{2.1}$$

$$Bx = 0 \tag{2.2}$$

$$x_j = k_j y_j^2 \operatorname{sgn}(y_j) + d_j \qquad j=1,\dots,k \tag{2.3}$$

$$v = Cx + 1\, v_0 \tag{2.4}$$

A jest macierzą incydencji grafu sieci, B macierzą obwodów podstawowych, $x = (x_1,\dots,x_m)$ wektorem spadków ciśnień na łukach, $y = (y_1,\dots,y_m)$ wektorem przepływów w łukach, k_j opornością hydrauliczną łuku j, $p = (p_1,\dots,p_k)$ wektorem poborów z wierzchołków. Zależności (2.1) i (2.2) odpowiadają I i II prawu Kirchhoffa, a (2.3) podaje związek pomiędzy przepływem w łuku i występującym na nim spadku ciśnienia. Wzór (2.4) podaje związek pomiędzy wektorem ciśnień w wierzchołkach $v = (v_1,\dots,v_k)$ a spadkiem ciśnień x na łukach sieci, v_0 jest ciśnieniem w węźle odniesienia. Rozwiązanie układu równań (2.1)-(2.4) daje zależność wektora v od wektora p i ciśnienia v_0, czyli funkcję $v(p,v_0)$. Przyjmując, że $p = (-y^s,q,\sigma)$ może być sformułowane zadanie statycznej optymalizacji systemu

$$\sum_{i=1}^{ls} F_i(y_i^s,n_i) \longrightarrow \min \qquad (2.5)$$

$$H_i(y_i^s,n_i) \geq v_i(p,v_0) \quad i=1,\dots,ls \qquad (2.6)$$

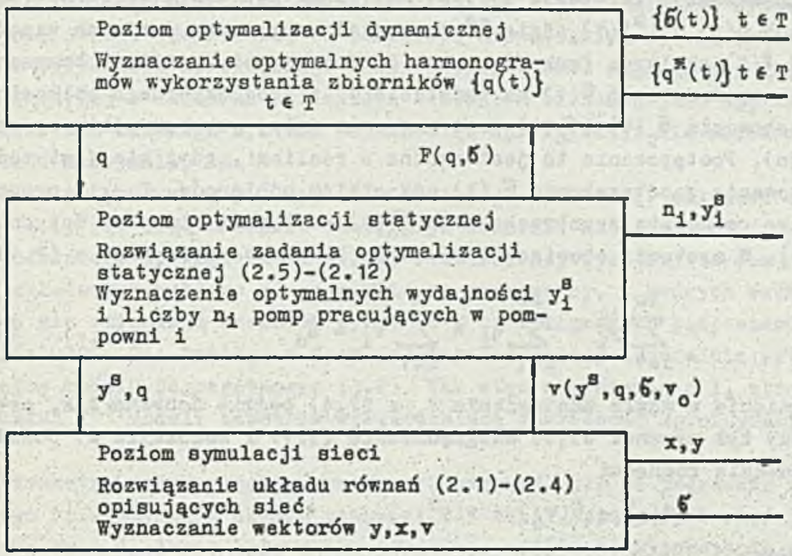
$$\left.\begin{array}{ll} h_i-k_iq_i^2 \geq v_i(p,v_0) & \text{gdy } q_i < 0 \\ h_i+k_iq_i^2 \leq v_i(p,v_0) & \text{gdy } q_i > 0 \end{array}\right\} i=1,\dots,lz \qquad \begin{array}{r}(2.7)\\(2.8)\end{array}$$

$$v_i(p,v_0) \geq \underline{v} \quad i=1,\dots,k \qquad (2.9)$$

$$\left.\begin{array}{l} \underline{y}_i n_i \leq y_i^s \leq \overline{y}_i n_i \\ 0 \leq n_i \leq \overline{n}_i \\ n_i - \text{liczba całkowita} \end{array}\right\} i=1,\dots,ls \qquad \begin{array}{r}(2.10)\\(2.11)\\(2.12)\end{array}$$

Przyjęto, że w systemie występuje ls pompowni posiadających po $\overline{n}_i$ pomp, z których n_i jest aktualnie włączonych. W obrębie każdej z pompowni pompy połączone są równolegle i posiadają jednakowe parametry. $F_i(n_i,y_i^s) = \alpha_i n_i + \beta_i y_i^s$ jest charakterystyką mocy pompowni, $H_i(n_i,y_i^s) = H_i^0-k_i(y_i^s/n_i)^2$ charakterystyką podnoszenia, $\underline{y}_i$ oraz $\overline{y}_i$ minimalną i maksymalną wydajnością pompy w pompowni i. Nierówność (2.6) precyzuje warunek nieujemnego zapasu ciśnienia pompowni. Zależności (2.7) i (2.8) gwarantują realizowalności przepływów pomiędzy siecią a zbiornikami. Gdy $q_i > 0$, zbiornik pracuje jako odbiorca, a gdy $q_i < 0$, jako źródło (h_i jest wysokością zbiornika, d_i opornością rurociągu łączącego go z siecią). Nierówność (2.9) gwarantuje zapewnienie odbiorcom ciśnienia nie mniejszego od minimalnego wymaganego $\underline{v}$. Zależności (2.10)-(2.12) zapewniają pracę pompowni w wymaganych obszarach wydajności (mogą być one niespójne). Aby możliwe było rozwiązanie zadania statycznego (2.5)-(2.12), konieczna jest znajomość zależności ciśnień $v_i(y^s,q,\sigma,v_0)$ w węzłach od wektorów y^s,q,σ. Wymaga to rozwiązania nieliniowego układu równań (2.1)-(2.4), co jest dokonywane na poziomie lokalnym przez symulację sieci. Tak więc w rozważanym zadaniu optymalizacji systemu wodociągowego można wyróżnić trzy odrębne poziomy. Poziom optymalizacji dynamicznej, poziom optymalizacji statycznej i poziom symulacji sieci. Zależności pomiędzy poziomami podano na rys. 2.

Rozwiązanie zadania statycznego wymaga wielokrotnej symulacji sieci. Techniki te opisano w [5]. Dla większych sieci czasy ich symulacji są na tyle duże, że rozwiązanie zadania statycznego, a tym bardziej dynamicznego staje się nierealne. Trudności te mogą być przezwyciężone poprzez agregację modelu sieci, co będzie opisane dalej.



Rys. 2. Trójpoziomowa struktura rozwiązania zadania optymalizacji systemu wodociągowego.

3. TECHNIKA OTRZYMYWANIA MODELU ZAGREGOWANEGO SIECI

Zagregowany model sieci powinien przybliżać dość dokładnie istotne z punktu widzenia algorytmu optymalizacji jej własności, będąc przy tym znacznie prostszym niż układ równań (2.1)-(2.4). Koncepcje agregacji polegająca na zastępowaniu sieci wyjściowej sieciami prostszymi podano w [5],[6]. W pracy [6] jest to sieć otrzymana z sieci wyjściowej poprzez połączenie węzłów pewnego podobszaru o różnicy ciśnień mniejszej od zadanej. W pracy [5] zastępuje się daną sieć siecią o strukturze drzewiastej znacznie łatwiejsza do rozwiązania. Aproksymacja zależności $v(p,v_o)$ formami kwadratowymi ([3],[5]) jest uzasadniona własnościami asymptotycznymi rozwiązania układu równań (2.1)-(2.4) podanymi w [4],[5]. Aby możliwe było rozwiązanie zadania statycznego, potrzebna jest znajomość zależności $v_i(y^s,q,\sigma,v_o)$ dla wierzchołków odpowiadających pompowniom i zbiornikom. Dane o pozostałych przepływach y i ciśnieniach x w sieci nie są tu istotne. Konstrukcja modelu zagregowanego oparta jest na założeniach.

a) Pomiędzy chwilowymi zapotrzebowaniami odbiorców $\sigma_i(t)$ (lub ich grupami) istnieje silna korelacja.

b) Najniższe spośród ciśnień v_i w węzłach odpowiadających odbiorcom jest równe minimalnemu ciśnieniu wymaganemu $\underline{v}$, a więc $\min\limits_{i=1,\dots,k} \{v_i\} = \underline{v}$.

Konsekwencją założenia a) jest możliwość zapisania wektora $\sigma(t)$ w postaci $\sigma(t) = \sigma^s \xi(t)$, gdzie σ^s jest stałym wektorem średnich zapotrzebowań, a $\xi(t)$ skalarną funkcją czasu. Stąd staje się możliwe otrzymanie wektora zapotrzebowań $\sigma(t)$ na podstawie σ^s i prognozowanego całkowitego zapotrzebowania $\sigma_o(t)$ ($\sigma_o(t)$ jest nazywane dalej poborem odbiorcy zagregowanego). Postępowanie to jest zgodne z realiami, gdyż nie jest możliwe prognozowanie zapotrzebowań $\sigma_i(t)$ wszystkich odbiorców. Zwykle proponuje się tylko całkowite zapotrzebowanie $\sigma_o(t)$ odbiorców lub też dużych ich grup [5]. W systemie obowiązuje równanie bilansowe otrzymane z (2.1)

$$\sum_{i=1}^{ls} y_i^s - \sum_{i=1}^{lz} q_i = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i = \sigma_o \tag{3.1}$$

Gdy ciśnienie w węźle odniesienia v_o z (2.4) będzie dobrane tak, aby spełniony był warunek b), to uwzględnienie (3.1) i założenia a) pozwala na sformułowanie równości

$$v(y^s,q,\sigma,v_o) = v(y^s,q).$$

Niech

$$z = (y^s,q) \text{ i } v(y^s,q) = v(z).$$

Zależność v(z) może być aproksymowana formami kwadratowymi

$$v_i(z) = z^T A^i z + B^i z + C^i \tag{3.2}$$

Zależności (3.2) otrzymywane są dla węzłów odpowiadających pompowniom i zbiornikom. Uzupełnienie form (3.2) równaniem bilansowym (3.1) daje zagregowany model sieci. Model (3.2) jest liniowy ze względu na parametry A^i, B^i, C^i, które otrzymywane są metodą najmniejszych kwadratów. Parametry modelu zagregowanego należy wyznaczać w następujący sposób:

1. Wybrać zbiór wektorów $\{z^1,\dots,z^r\}$ tak, aby leżały one w przewidywanym zakresie pracy systemu. Tutaj zastosowany został rototabilny plan eksperymentu podany w pracy [7].

2. Dla każdego z ustalonych wektorów $\{z^1,\dots,z^r\}$ rozwiązać układ równań (2.1)-(2.3). Ciśnienie w węźle odniesienia v_o dobrać tak, by spełniony był warunek $\min_{i=1,\dots,k} \{v_i\} = \underline{v}$. Dla danego z^j obliczyć z (2.4) wektor v^j.

3. Z otrzymanych $\{z^1,\dots,z^r\}$, $\{v^1,\dots,v^r\}$ utworzyć macierz U i V według [7]. Rozwiązać układ równań liniowych $U^T U W = U^T V$ występujący w metodzie najmniejszych kwadratów. Wektor W zawiera szukane parametry modelu zagregowanego.

Do rozwiązania sieci użyta została zmodyfikowana w [5] metoda Crossa-Łobaczewa. Układ równań liniowych rozwiązano metodą Gaussa-Crouta. Procedura realizowana była przez program napisany w Fortranie 1300. W celu zbadania dokładności modelu zagregowanego przeprowadzona została seria eksperymentów dla systemu przykładowego o 3 pompowniach i 2 zbiornikach.

Sieć liczyła 24 węzły i 26 łuków. Wyniki eksperymentów upoważniły do wyciągnięcia następujących wniosków odnoszących się do badanego systemu. Można się jednak spodziewać, że posiadają one ogólniejszy charakter.

1. Dokładność aproksymacji ciśnień przez model zagregowany jest wystarczająca, gdy w obszarze zmienności wektora z składowe jego nie zmieniają znaku. Dla badanego systemu średni błąd aproksymacji nie przekracza 1%, a błąd maksymalny 6%.

2. W przypadku gdy w systemie występują zbiorniki, składowe q_i wektora $z = (y^s, q)$ mogą zmieniać znak, gdyż zbiornik może być tak źródłem, jak i odbiorcą. Z uwagi na 1. należy obszar pracy systemu (zakres zmienności składowych wektora z) podzielić na podobszary, w których składowe wektora nie zmieniają znaku. W systemie o lz zbiornikach podobszarów tych jest 2^{lz}. Dla każdego z tych podobszarów należy oddzielnie wyznaczyć parametry modelu zagregowanego (3.2). Tak więc w systemie o l_z zbiornikach układ 2^{lz} modeli zapewnia wystarczającą dokładność aproksymacji ciśnień.

Parametry modelu zagregowanego otrzymywane były na podstawie wielokrotnego rozwiązywania układu równań (2.1)-(2.4) opisujących sieć. Parametry k_l oraz d_l łuków były znane. Istnieje możliwość wyznaczenia parametrów modelu zagregowanego (3.2) na podstawie pomiarów prowadzonych bezpośrednio na rzeczywistej sieci. W tym celu należy przeprowadzić serię pomiarów przepływów y^s z pompowni i q ze zbiorników, ciśnień w węzłach odpowiadających pompowniom i zbiornikom oraz w węzłach krytycznych o najniższych ciśnieniach (aby zapewnić spełnienie warunku b)). Rozwiązanie układu równań $U^T UW = U^T V$ pozwala na wyznaczenie parametrów modelu zagregowanego. Postępowanie takie wydaje się być godne polecenia, gdyż pozwala na uniknięcie kosztownych i kłopotliwych pomiarów oporności k_l odcinków rurociągów sieci.

4. ZASTOSOWANIE ZAGREGOWANEGO MODELU SIECI DO OPTYMALIZACJI SYSTEMÓW WODOCIĄGOWYCH

Sformułowany w rozdziale 3 zagregowany model sieci ma postać:

$$v_i(y^s, q, v_o) = (y^s, q)^T A^i (y^s, q) + B^i (y^s, q) + C^i$$

$$i = 1, \dots, (l_s + l_z) \tag{4.1}$$

$$\sum_{i=1}^{l_s} y_i^s = \sum_{i=1}^{l_z} q_i + б_o \tag{4.2}$$

Zastępując $v_i(p, v_o)$ występujące w sformułowaniu zadania (2.5)-(2-9) zależnościami (4.1) oraz podstawiając dla uproszczenia oznaczeń $y^s = y$ i $n = (n_1, \dots, n_{l_s})$ otrzymujemy na drodze przekształceń algebraicznych poniższe zadania statycznej optymalizacji dla ustalonego wektora przepływów q.

$$\sum_{i=1}^{l_s} (\alpha_i n_i + \beta_i y_i) = F(n,y) \longrightarrow \min \qquad (4.3)$$

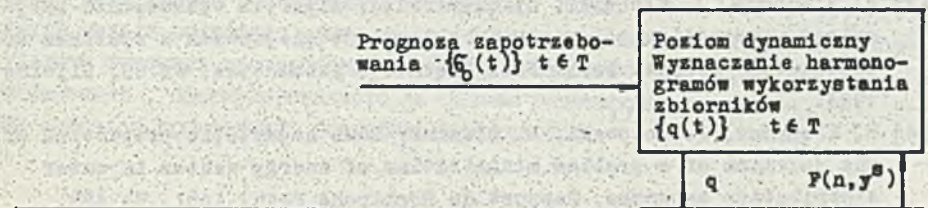
$$y^T A^i(n)y + B^i(n)y + C^i > 0 \quad i=1,\dots,(l_s+l_z) \qquad (4.4)$$

$$\left.\begin{array}{l} \underline{y}_j n_j < y_j \leq \overline{y}_j n_j \qquad (4.5) \\ 0 < n_j < \overline{n}_j \qquad (4.6) \\ n_j \text{ - liczba całkowita} \qquad (4.7) \end{array}\right\} i=1,\dots,l_s$$

$$\sum_{j=1}^{l_s} y_j = y_0 \qquad (4.8)$$

Warunek b) z rozdziału 3 gwarantuje spełnienie (2.9), a więc zapewnianie odbiorcom minimalnego wymaganego ciśnienia $\underline{y}$. W powyższym sformułowaniu nie występuje bezpośrednio poziom symulacji sieci, potrzebne wartości ciśnień określane są poprzez obliczanie wartości form kwadratowych (4.1), a nie poprzez rozwiązanie układu równań nieliniowych (2.1)-(2.3), jak to miało miejsce w sformułowaniu z rozdziału 2. Postępowanie takie radykalnie skraca czas rozwiązywania zadania, który jest elementem krytycznym podczas bieżącego sterowania systemem. Zadanie sformułowane w oparciu o model zagregowany posiada liczbę zmiennych i ograniczeń proporcjonalną do liczby pompowni i zbiorników w systemie, która to zwykle nie przekracza kilkunastu. Natomiast sformułowanie (2.5)-(2.12) wykorzystujące bezpośrednio równania sieci posiada liczbę zmiennych i ograniczeń proporcjonalną odpowiednio do liczby łuków i węzłów w sieci, która może być rzędu kilkuset lub więcej.

Sformułowane powyżej zadanie (4.3)-(4.8) jest nieliniowym zadaniem programowania mieszanego. Spójne podobszary zbioru rozwiązań dopuszczalnych mogą być zbiorami niewypukłymi, co jest źródłem istotnych trudności obliczeniowych. Wymagany krótki czas obliczeń skłonił autorów do opracowania wyspecjalizowanego algorytmu rozwiązywania zadania (4.3)-(4.8). Oparty on został na idei metody podziału i ograniczeń. Specyfika zadania pozwoliła na skonstruowanie testów dopuszczalności i optymalności eliminujących ponad 90% podproblemów. Otrzymywane podproblemy, będące ciągłymi zadaniami programowania nieliniowego, rozwiązywane są za pomocą opracowanej modyfikacji algorytmu hiperpłaszczyzn tnących Kelley'a, uwzględniającej niewypukłość zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Zaprezentowanie algorytmu przekroczyłoby ramy niniejszej pracy. Jego koncepcja opisana została w [3], w pracy [7] podano dokładny opis i dowody zbieżności. Algorytm rozwiązania zadania statycznego (4.3)-(4.8) realizowany jest przez program napisany w Fortranie 1900. W celu zbadania jego własności rozwiązane zostało 40 zadań testowych dla systemu przykładowego. Obliczenia przeprowadzone były na komputerze ODRA-1325. Średni czas rozwiązania zadania statycznej optymalizacji (4.3)-(4.8) wynosił dla systemu przykładowego (3 pompownie, 2 zbiorniki, 24 węzły, 26 łuków) około 15 sekund. Czasy obliczeń zależą głównie od liczby pompowni i zbiorników w systemie, nie zależą natomiast od liczby łuków i węzłów sieci. Już dla sieci o około 20 łukach i 10 węzłach czas pojedynczego obliczenia sieci byłby równy czasowi rozwiązania całego zadania statycznego opracowaną metodą. Wyznaczenie modelu zagregowanego trwało około 5 minut, jest to jednak czynność jednorazowa lub rzadko powtarzana. Istotnym zagadnieniem jest oszacowanie wpływu błędu aproksymacji ciśnień na rozwiązanie. Występują tu jednak trudności, gdyż zadanie statyczne jest niestabilne. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że przyjęcie w nierównościach (4.4) współczynników bezpieczeństwa gwarantujących dopuszczalność rozwiązań spowodowało 1,6% wzrost wartości funkcji celu. Wielkość ta może być uznana za miarę dokładności metody. Wielopoziomowa struktura optymalizacji systemu wodociągowego wykorzystująca zagregowany model sieci pokazana została na rys. 3.



Rys. 3. Struktura optymalizacji systemu wodociągowego z wykorzystaniem zagregowanego modelu sieci

5. UWAGI KOŃCOWE

Uzyskane wyniki badań testowych wskazują na celowość wykorzystania zagregowanego modelu sieci do optymalizacji złożonych systemów wodociągowych. Przyjęcie uproszczeń na etapie formułowania modelu umożliwia oszącowanie błędu, co byłoby utrudnione przy zastosowaniu metod przybliżonych do rozwiązywania zadań zawierających pełny model sieci. Przyjęte kryterium optymalizacji (2.5) oraz warunek b) z rozdziału 2 skłaniają do nieutrzymywania nadmiernych ciśnień w sieci, przez co zmniejszają się niekontrolowane straty wody. Uzyskane czasy rozwiązania zadania statycznego (4.3)-(4.8) wskazują na możliwość wykorzystania opracowanych metod jako dolnego poziomu optymalizacji dynamicznej systemów jednozbiornikowych. Dla systemów wielozbiornikowych należy zastosować kolejny stopień agregacji systemu. Dokładność modelu może być zwiększona poprzez przyjęcie większej liczby odbiorców zagregowanych.

LITERATURA

[1] B. Coulbeck, M. Sterling; Optimised control of water distribution systems. Procedings IEE, Vol. 125, No. 10, October 1978.

[2] P. Faliside, P.F. Perry; Hierarchical optimisation of a water supply network, Proceedings IEE, Vol. 122, No. 2, Febr. 1975.

[3] R. Klempous, J. Kotowski, J. Ułasiewicz; Algorytm wyznaczania optymalnej strategii współdziałania zbiorników sieciowych z systemem wodociągowym; Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Automatyka, Nr 69, Gliwice 1983.

[4] R. Klempous, J. Kotowski, M. Olesiak; Some asymptotic properties of the solution of a problem minimization of energy wastes in water distribution networks, Rapport de Recherche Math. Appl. No 489, Grenoble 1984, France.

[5] Praca zbiorowa; Opracowanie podstawowych założeń, metod i algorytmów dla potrzeb operatywnego sterowania złożonym systemem wodociągowym, Praca wyk. w ramach PR-7 (01.09.01). Wrocław 1981.

[6] S. Miyaoka, M. Funabashi; Optimal control of water distribution Systems by Network Flow Theory, IEEE Transactions on Aut. Control Vol. AC-29, No. 4, April 1984.

[7] J. Ułasiewicz; Minimalnoenergetyczne sterowanie przepływem w nieliniowej sieci z akumulacją metodą agregacji jej modelu, Raport ICT P.Wr. Nr 32/84, Wrocław 1984.

[8] J. Żeleźik; Optymalizacja pracy systemu zaopatrzenia w wodę, Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Automatyka Nr 69, Gliwice 1983.

OPTIMAL CONTROL OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM
BY AGGREGATION OF WATER NETWORK MODEL

S u m m a r y

We present the optimal control problem in a water distribution system. To solve this problem we worked up an algorithm based on the idea of aggregation of the mathematical model of water network. The final form of this model is the system of nonconvex quadratic forms. An aggregated model allows considerably to reduce an input problem. Finally we discuss the results of some numerical tests of the described algorithm. Some possible applications of the method presented in this paper are considered briefly.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АГРЕГАЦИИ МОДЕЛИ СЕТИ ДЛЯ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПРОВОДНОЙ СИСТЕМОЙ

Резюме

В работе определено задание оптимального управления водопроводной системой , содержащей резервуары. Представлен метод получения редуцированной модели сети в виде расположения квадратных форм. Использование редуцированной модели разрешает существенно упростить исходное задание. Даны результаты тестовых исследований модели а также алгоритм решения задания по оптимизации , сформулированного на основе редуцированной модели. Определён диапазон применений разработанных методов.