УДК 518.9

УРАХУВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЧАСУ ДОБІГАННЯ ВОДИ ВІД ЇЇ РІВНЯ І ВИТРАТ

В.В. ОСТАПЕНКО, О.С. ОСТАПЕНКО, Г.С. ФІНІН, А.П. ЯКОВЛЕВА

Розглядається модель руху води у каналах зрошувальної системи, яка враховує залежність часу добігання води від її рівня і витрат. Описуються методи знаходження оптимального керування зрошувальної системи.

Зрошувальна система являє собою складний гідромеліоративний комплекс, у який можуть входити відкриті канали, розділені перетинаючими спорудами на б'єфі, закриті водоводи, накопичувальні басейни та інші споруди. Загальна вимога до управління такими комплексами полягає у своєчасній подачі води споживачам. Один із шляхів виконання цієї вимоги — це утримання рівня води в каналах у заданих межах. Важливими критеріями якості управління є число змін режимів роботи гідротехнічних споруд і надійність функціонування зрошувальної системи.

У більшості випадків управління основними гідротехнічними спорудами на середніх і великих комплексах здійснюється з центрального диспетчерського пункту, а споруди водозабору керуються безпосередньо водоспоживачами. Тому природним є запропонований у даній роботі ігровий підхід, у якому всі гідротехнічні споруди розбиваються на дві групи. До першої віднесені об'єкти, що керуються з центрального диспетчерського пункту і забезпечують необхідний режим водопостачання (головна гідротехнічна споруда, насосні станції перекачування та перетинаючі споруди). До другої групи належать споруди, які виконують функцію водозабору із власними системами управління (насосні станції, що працюють на закриту мережу, внутрішньогосподарські водовідведення).

Приступаючи до формалізації проблеми управління гідротехнічним комплексом, будемо вважати, що першою групою гідротехнічних об'єктів керує гравець-союзник, другою — гравець-супротивник. Подібний поділ дозволяє застосовувати розроблені методи теорії диференціальних ігор для опису процесу функціонування зрошувальної системи. Водоспоживачі, які керують другою групою об'єктів, як правило, змінюють подані раніше замовлення, і в підсумку дія супротивника в майбутньому невідома або відома з деякою похибкою. Такий підхід викладено у роботах [1–4]. На відміну від цих досліджень, у даній роботі розглянуті моделі руху води в зрошувальних системах з урахуванням залежності часу добігання хвилі від рівня і витрат води.

Урахування залежності часу добігання води від її рівня у б'єфах. Для простоти викладу обмежимося розглядом випадку трьох б'єфів.

Розв'яжемо задачу утримання в заданих межах рівня води в кінці б'єфа. Оскільки середній рівень H_0 зв'язаний з рівнем наприкінці б'єфа H_{k} співвідношенням

$$H^0 = H^{\mathrm{k}} - \frac{1}{\alpha} l \ \mathrm{tg}\, \alpha ,$$

де α — кут нахилу дна; l — довжина б'єфа, то час добігання хвилі від початку до кінця б'єфа τ є деякою функцією H^{k}. Отже, вважаємо, що відома деяка залежність часу добігання в j-му б'єфі τ_j від рівня води наприкінці цього б'єфа H_j

$$\tau_j = \tau_j \left(H_j \right), \quad j = 1, 2, 3 . \tag{1}$$

В залежності від вимог задачі за функцію τ_j можна брати одну з функцій, описаних у роботі [5]. Наприклад, $\tau = l \left(e\sqrt{R\, i} + \sqrt{g\, H} \right)^{-1}$, де e — коефіцієнт Шези; R — гідравлічний радіус; i — коефіцієнт ухилу дна.

Визначимо вплив залежності (1) на вибір керування перетинаючими спорудами Q_j. Знехтуємо наявністю хвиль і припустимо, що в б'єфі сталий рух. Вважаємо, що відома залежність між об'ємом води V у б'єфі і рівнем H у його кінці, що задається функцією $H = H^*(V)$, а також відома зворотна функція $V = V^*(H)$. Тоді

$$H(\tau_0) = H^* \left[V^*(H(0)) + \int_{-\tau_0}^{0} Q(\tau)\, d\tau - \int_0^{\tau_0} q(\tau)\, d\tau \right]. \tag{2}$$

Рівень наприкінці j–го б'єфа обчислюється за формулою

$$h_j \left(l_j , t + \tau_j \right) = H_j(\tau_j) + \int_0^t e^{-k_j (t-\tau)} c_j \left[\alpha_j Q_j(\tau) - \right.$$

$$\left. - Q_{j+1}(\tau + \tau_j) + q_j(\tau + \tau_j) \right] d\tau \quad , \tag{3}$$

де

$$H_j(\tau_j) = H_j^* \left(V_j^* \left(H_j^*(0) \right) \right) + \int_{-\tau_j}^{0} Q_j(\tau)\, d\tau -$$

$$- \int_0^{\tau_j} \left[Q_{j+1}(\tau) + q_j(\tau) \right] d\tau . \tag{4}$$

У роботі [1] показано, що для розв'язання задачі утримання в трьох б'єфах досить, щоб виконувалися такі системи нерівностей (вважаємо, що $c_j = 1$):

$$k_1\left(H_1^- - H_2(\tau_1)\right) \le \alpha_1 Q_1(t) - Q_2(t+\tau_1) - q_1(t+\tau_1) \le k_1\left(H_1^+ - H_1(\tau_1)\right),$$

$$k_2\left(H_2^- - H_2(\tau_1+\tau_2)\right) \le \alpha_2 Q_2(t+\tau_1) + Q_3(t+\tau_1+\tau_2) -$$

$$- q_2(t+\tau_1+\tau_2) \le k_2\left(H_2^+ - H_2(\tau_1+\tau_2)\right),$$

$$k_3\left(H_3^- - H_3(\tau_1+\tau_2+\tau_3)\right) \le \alpha_3 Q_3(t+\tau_1+\tau_2) -$$

$$- q_3(t+\tau_1-\tau_2-\tau_3) \le k_3\left(H_3^+ - H_3(\tau_1-\tau_2-\tau_3)\right), \tag{5}$$

$$k_1\left(H_1^- - H_1(0)\right) \le \alpha_1 Q_1(t-\tau_1) - Q_2(t) - q_1(t) \le k_1\left(H_1^+ - H_1(0)\right),$$

$$k_2\left(H_2^- - H_2(\tau_2)\right) \le \alpha_2 Q_2(t) - Q_3(t+\tau_2) - q_2(t+\tau_2) \le k_2\left(H_2^+ - H_2(\tau_2)\right),$$

$$k_3\left(H_3^- - H_3(\tau_2+\tau_3)\right) \le \alpha_3 Q_3(t+\tau_2) -$$

$$- q_3(t+\tau_2+\tau_3) \le k_3\left(H_3^+ - H_3(\tau_2+\tau_3)\right), \tag{6}$$

$$k_1\left(H_1^- - H_1(-\tau_2)\right) \le \alpha_1 Q_1(t-\tau_1-\tau_2) - Q_2(t-\tau_2) -$$

$$- q_1(t-\tau_2) \le k_1\left(H_1^+ - H_1(-\tau_2)\right),$$

$$k_2\left(H_2^- - H_2(0)\right) \le \alpha_2 Q_2(t-\tau_2) - Q_3(t) - q_2(t) \le k_2\left(H_2^+ - H_2(0)\right),$$

$$k_3\left(H_3^- - H_3(\tau_3)\right) \le \alpha_3 Q_3(t) - q_3(t+\tau_3) \le k_3\left(H_3^+ - H_3(\tau_3)\right), \tag{7}$$

де H_j^- і H_j^- — нижнє і верхнє можливі значення рівнів у j-му б'єфі ($j = 1, 2, 3$).

Розглянемо спочатку систему нерівностей (7) для третього б'єфа і визначимо, як вона зміниться з урахуванням залежності часу добігання води від її рівня у б'єфі. У момент часу $t = 0$ хвиля, сформована біля третьої перегородки, буде поширюватися уздовж б'єфа, рівень води наприкінці якого в момент добігання хвилі відповідно до формули (2)

$$H_3\left(\tau_3\left(H_3(0)\right)\right) = H_3^*\left[V_3^*\left(H_3(0)\right) + \int\limits_{-\tau_3\left(H_3(0)\right)}^{0} Q_3(s)\,ds - \int\limits_{0}^{\tau_3\left(H_3(0)\right)} q_3(s)\,ds\right], \tag{8}$$

де $H_3(0)$ — рівень води наприкінці третього б'єфа в момент початку керування $t=0$; $\tau_3(H_3(0))$ - час добігання хвилі в б'єфі з рівнем $H_3(0)$ наприкінці, обчислений по формулі (1). Перший доданок у квадратних дужках означає об'єм води у третьому б'єфі в момент $t=0$ при сталому рівномірному русі, другий — об'єм води, що поширюється у б'єфі в момент початку керування, третій — об'єм води, що забере споживач, поки до нього дійде хвиля, пущена в момент $t=0$. Час добігання хвилі, пущеної в момент $t=0$ до споживача, позначимо ${}^2\tau_3(H_3)$ і обчислимо по формулі (1).

$$ {}^2\tau_3(H_3)=\tau_3(H_3(\tau_3(H_3(0)))). \tag{9}$$

У такий спосіб систему (7) можна записати у вигляді

$$\begin{gathered}
k_1\left(H_1^- - H_1(-\tau_2(H_2(0)))\right) \le \alpha_1 Q_1(t-\tau_1(H_1(0))-\tau_2(H_2(0)))- \\
-Q_2(t-\tau_2(H_2(0)))-q_2(t-\tau_2(H_2(0))) \le k_1\left(H_1^+ - H_1(-\tau_2(H_2(0)))\right), \\
k_2\left(H_2^- - H_2(0)\right) \le \alpha_2 Q_2(t-\tau_2(H_2(0)))-Q_3(t)-q_2(t) \le k_2\left(H_2^+ - H_2(0)\right), \\
k_3\left(H_3^- - H_3(\tau_3(H_3(0)))\right) \le \alpha_3 Q_3(t)-q_3\left(t+{}^2\tau_3(H_3)\right) \le \\
\le k_3\left(H_3^- - H_3(\tau_3(H_3(0)))\right),
\end{gathered} \tag{10}$$

де $\tau_2(H_2(0))$ — час добігання хвилі в другому б'єфі з рівнем $H_2(0)$ у його кінці; $\tau_1(H_1(0))$ — час добігання в першому б'єфі з рівнем $H_1(0)$ наприкінці в момент керування обчислено за формулою (1). Розв’язуємо систему нерівностей (10). Вважаємо $q_j(t),\ j=1,2,3$ відомими для досить великого t. Знаходимо t на деякому інтервалі $\left[0,\ t_3^*\right]$, довжину якого t_3^* вказано нижче.

Перейдемо до системи (6) для другого б'єфа. Для визначення другого рівняння системи необхідно обчислити прогнозне значення рівня води, який буде наприкінці б'єфа в момент добігання хвилі до споживача. За аналогією з формулою (8)

$$\begin{gathered}
H_2(\tau_2(H_2(0)))=H_2^*\Bigg[V_2^*(H_2(0))+\int_{-\tau_2(H_2(0))}^{0} Q_2(s)\,ds- \\
-\int_0^{\tau_2(H_2(0))}\left(Q_3(s)+q_2(s)\right)ds\Bigg].
\end{gathered} \tag{11}$$

Позначимо ${}^2\tau_2(H_2)$ час добігання хвилі в другому б'єфі з рівнем $H_2(\tau_2(H_2(0)))$ наприкінці та обчислимо його по формулі (1).

$$ {}^2\tau_2(H_2)=\tau_2(H_2(\tau_2(H_2(0)))). \tag{12}$$

Для написання третього рівняння системи (6) необхідно обчислити новий рівень наприкінці третього б'єфа в момент добігання хвилі від другої перегородки, тобто в момент часу ${}^2\tau_2(H_2)+\tau_3(H_3(0))$. Відповідно до формул (2)

$$H_3\left({}^2\tau_2(H_2)+\tau_3(H_3(0))\right)=H_3^*\Big[V_3^*(H_3(\tau_3(H_3(0)))+\int_0^{{}^2\tau_2(H_2)}Q_3(s)\,ds-$$

$$-\int_{\tau_3(H_3(0))}^{{}^2\tau_2(H_2)+\tau_3(H_3(0))}q_3(s)\;ds\Big]. \qquad (13)$$

За формулою (1) обчислимо час добігання хвилі від другої перегородки до третього споживача.

$${}^2\tau_{3,2}(H_2)=\tau_3\left(H_3\left({}^2\tau_2(H_2)+\tau_3(H_3(0))\right)\right). \qquad (14)$$

З урахуванням (12)–(14) система (6) перепишеться в такий спосіб:

$$k_1\left(H_1^- - H_1(0)\right)\le \alpha_1 Q_1(t-\tau_1(H_1(0)))-Q_2(t)-q_1(t)\le k_1\left(H_1^+ - H_1(0)\right),$$

$$k_2\left(H_2^- - H_2(H_2(0))\right)\le \alpha_2 Q_2(t)-Q_3(t+{}^2\tau_2(H_2))-$$

$$-q_2(t+{}^2\tau_2(H_2))\le k_2\left(H_2^+ - H_2(\tau_2(H_2(0)))\right),$$

$$k_3\left(H_3^- - H_3\left({}^2\tau_2(H_2(0))\right)\right)\le \alpha_3 Q_3\left(t+{}^2\tau_2(H_2)\right)-q_3\left(t+{}^2\tau_2(H_2)+\right.$$

$$\left.+{}^2\tau_{3,2}(H_2)\right)\le k_3\left(H_3^+ - H_3\left({}^2\tau_2(H_2)+\tau_3(H_3(0))\right)\right). \qquad (15)$$

З формули (12) видно, що для розв'язання системи нерівностей (15) потрібно знати $Q_3(t)$ на інтервалі часу $t_3^*=\max\left\{\tau_2(H_2(0)),\,{}^2\tau_2(H_2)\right\}$. Знаходимо його шляхом розв'язання системи нерівностей (10) для третього б'єфа. Переходимо до розв'язання системи (15) для другого б'єфа. Знаходимо $Q_2(t)$ і $Q_3(t)$ відповідно на інтервалах часу $\left[0, t_2^*\right]$ і $\left[t_3^*, t_3^{**}\right]$ (довжина цих інтервалів визначена нижче).

Перейдемо до системи нерівностей (5) для першого б'єфа. Аналогічно до розрахунків для 3-го і 2-го б'єфів обчислимо рівень води і час її добігання для 1-ї нерівності системи.

$$H_1(\tau_1(H_1(0)))=H_1^*\left(V_1^*(H_1(0))\right)+$$

$$+\int_{-\tau_1(H_1(0))}^{0}Q_1(s)\,ds-\int_0^{\tau_1(H_1(0))}\left(q_1(s)+Q_2(s)\right)ds, \qquad (16)$$

$$ {}^2\tau_1(H_1) = \tau_1\left(H_1\left(\tau_1\left(H_1(0)\right)\right)\right), \tag{17} $$

$$ H_2\left({}^2\tau_1 + \tau_2\left(H_2(0)\right)\right) = H_2^*\left(V_2^*\left(H_2\left(\tau_2\left(H_2(0)\right)\right)\right)\right) + \int\limits_0^{{}^2\tau_1(H_1)} Q_2(s)\,ds - $$

$$ - \int\limits_{\tau_2(H_2(0))}^{{}^2\tau_1(H_1)+\tau_2(H_2(0))} \left(q_2(s) + Q_3(s)\right)ds\,, \tag{18} $$

$$ {}^2\tau_{2,1}(H_1) = \tau_2\left(H_2\left({}^2\tau_1(H_1) + \tau_2\left(H_2(0)\right)\right)\right). \tag{19} $$

З урахуванням формул (16)–(19) перші дві нерівності системи (5) перепишуться у вигляді

$$ k_1\left(H_1^- - H_1\left(\tau_1\left(H_1(0)\right)\right)\right) \le \alpha_1 Q_1(t) - Q_2\left(t + {}^2\tau_1(H_1)\right) - q_1\left(t + {}^2\tau_1(H_1)\right) \le $$

$$ \le k_1\left(H_1^+ - H_1\left(\tau_1\left(H_1(0)\right)\right)\right). $$

$$ k_2\left(H_2^- - H_2\left({}^2\tau_1(H_1) + \tau_2(H_2(0))\right)\right) \le $$

$$ \le \alpha_2 Q_2\left(t + {}^2\tau_1(H_1)\right) - Q_3(t + {}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1)) - $$

$$ - q_2(t + {}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1)) \le k_2\left(H_2^+ - H_2\left({}^2\tau_1(H_1) + \tau_2(0)\right)\right). \tag{20} $$

За аналогією перетворимо третю нерівність системи (5).

$$ k_3\left(H_3^- - H_3\left({}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1) + \tau_3\left(H_3(0)\right)\right)\right) \le $$

$$ \le \alpha_3 Q_3\left(t + {}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1)\right) - q_3\left(t + {}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1) + {}^2\tau_{3,1}(H_1)\right) \le $$

$$ \le k_3\left(H_3^+ - H_3\left({}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1) + \tau_3\left(H_3(0)\right)\right)\right), \tag{21} $$

де, відповідно до формули (2),

$$ H_3\left({}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1) + \tau_3\left(H_3(0)\right)\right) = H_3^*\left(V_3^*\left(H_3(0)\right)\right) + $$

$$ + \int\limits_{-\tau_3(H_3(0))}^{{}^2\tau_1(H_1)+{}^2\tau_{2,1}(H_1)} Q_3(s)\,ds - \int\limits_0^{{}^2\tau_1(H_1)+{}^2\tau_{2,1}(H_1)+\tau_3(H_3(0))} q_3(s)\,ds\,, $$

$$ {}^2\tau_{3,1}(H_1) = \tau_3\left(H_3\left({}^2\tau_1(H_1) + {}^2\tau_{2,1}(H_1) + \tau_3\left(H_3(0)\right)\right)\right). $$

Для розв'язання системи (20), (21) знадобиться значення $Q_2(t)$ для $t \in \left[0, t_2^*\right]$, $t_2^* = \max\left\{\tau_2\left(H_2(0)\right), {}^2\tau_2\left(H_2\right)\right\}$ і $Q_3(t)$, $t \in \left[t_3^*, t_3^{**}\right]$, $t_3^{**} =$ $= \max\left\{{}^2\tau_1\left(H_1\right) + \tau_2\left(H_2(0)\right), {}^2\tau_1\left(H_1\right) + {}^2\,\tau_{2,1}\left(H_1\right)\right\}$.

Урахування залежності часу добігання води від величини її витрат на транспортування. Час добігання хвилі, яка поширюється в б'єфі, залежить не тільки від рівня води в ньому, але і від величини витрати, що формує цю хвилю. Розглянемо керування одним б'єфом. Вважаємо, що нам відома деяка функція $\tau = \tau(H, Q)$. Оскільки значення H обчислено, зафіксуємо його і будемо враховувати тільки залежність $\tau(Q)$, яку логічно вважати монотонно незростаючою функцією. Раніше керування $Q(t)$ знаходилося як розв'язок системи нерівностей

$$a \le Q(t) - q(t + \tau) \le b, \quad 0 \le Q(t) \le Q^{\max}, \tag{22}$$

де $a, b, Q^{\max}$ — визначені величини, а час добігання τ вважається постійним. Якщо враховувати залежність τ від Q, то потрібно знаходити Q із системи нелінійних нерівностей, розв'язання якої пов'язане із значними труднощами. Оскільки витрата Q в остаточному підсумку визначається замовленням q, то логічно допустити, що τ залежить не від Q, а від q. У системі (22) урахування часу добігання здійснюється шляхом заміни функції $q(t)$ деякою функцією $Aq = q(t+\tau)$. У випадку залежності τ від q пропонується визначати оператор запізнювання A у такий спосіб.

Розглянемо випадок, коли

$$q(t) = \begin{cases} q^1, \ t_1 \le t < t_2, \quad t_3 \le t \le t_4, \\ \qquad q^2, \ t_2 \le t < t_2. \end{cases} \tag{23}$$

Якщо

$$t_4 - \tau(q^1) \ge t_3 - \tau(q^1), \tag{24}$$

то вважаємо, що

$$Aq(t) = \begin{cases} q^1, \ \ t_1 - \tau(q^1) \ge t < t_2 - \tau(q^2), \\ q^2, \ \ t_3 - \tau(q^2) \ge t < t_4 - \tau(q^1), \\ q^1, \ \ t_2 - \tau(q^2) \le t < t_3 - \tau(q^2), \end{cases} \tag{25}$$

тобто верхня частина замовлення змінюється щодо нижньої на величину, рівну різниці між часами добігання $\tau(q^2)$ і $\tau(q^1)$ (рис. 1). Якщо нерівність (24) не виконується, верхня частина замовлення, що відповідає значенню q^2, немовби «відкидається». Якщо при цьому

$$t_2 - \tau(q^2) < t_4 - \tau(q^1), \tag{26}$$

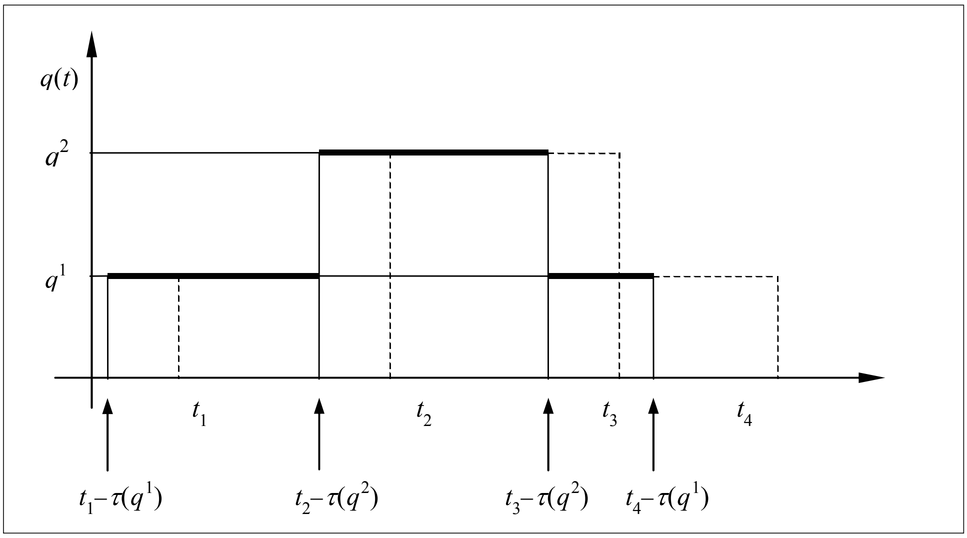

Рис. 1. Перетворення (25) функції замовлення

то вважаємо

$$Aq(t) = \begin{cases} q^1, & t_1 - \tau(q^1) \le t < t_2 - \tau(q^2), \\ q^2, & t_2 - \tau(q^2) \le t < t_3^*. \end{cases} \tag{27}$$

Як видно з рис. 2, значення t_1 і t_2 у формулі (27) змінюються так само, як і у (25). Об'єм виступаючої верхньої частини замовлення розподілимо по усій величині замовлення q^2, тобто

$$\Delta V = \left(q^2 - q^1\right)\left[t_3 - \tau(q^2) - \left(t_4 - \tau(q^1)\right)\right] = q^2\left[t_3^* - \left(t_4 - \tau\left(q^2\right)\right)\right].$$

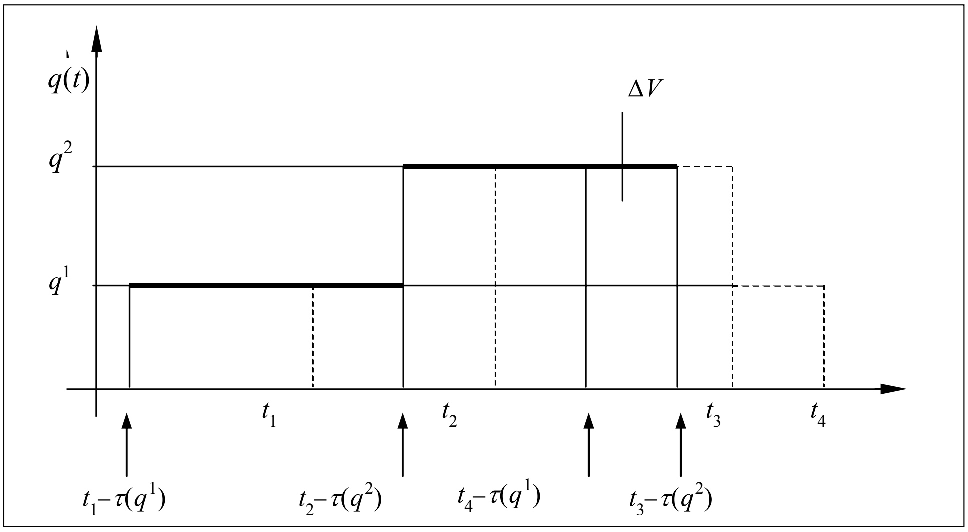

Рис. 2. Перетворення (27) функції замовлення

Звідси обчислимо значення t_3^*. Якщо нерівність (26) не виконується, то робимо наступне (рис. 3).

Використаємо об’єм ΔV верхньої частини замовлення для заповнення простору між точками $t_2 - \tau\left(q^2\right)$ і $t_4 - \tau\left(q^1\right)$, а саме

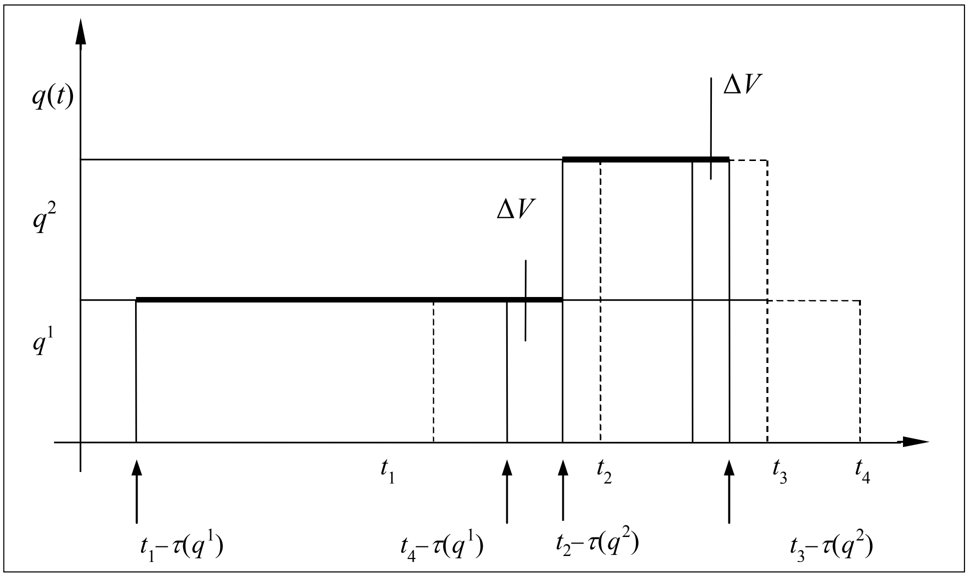

Рис. 3. Перетворення (28) функції замовлення

$$\Delta V = q^1\left[t_2 - \tau(q^2) - \left(t_4 - \tau(q^1)\right)\right] = \left(q^2 - q^1\right)\left[\left(t_3 - \tau\left(q^2\right)\right) - t^*\right].$$

Звідси знайдемо t^*, а далі діємо, як у попередньому випадку.

Таким чином

$$Aq(t) = \begin{cases} q^1,\ t_1 - \tau(q^1) \le t < t_2 - \tau(q^2), \\ q^2,\ t_2 - \tau(q^2) \le \left(\dfrac{q_2 - q_1}{q_1}\right)t^* + \left(t_2 - \tau(q^2)\right). \end{cases} \tag{28}$$

Це один з найпростіших видів замовлення типу (23). При розгляді більш складних випадків використовуються аналогічні міркування.

Розглянемо керування декількома б'єфами. Для простоти викладу зупинимося на випадку двох б'єфів. Керування $Q_1(t)$ знаходиться як розв’язок системи нерівностей

$$a_1 \le Q_1(t) - Q_2(t + \tau_1) - q_1(t + \tau_1) \le b_1,$$

$$a_2 \le Q_2(t + \tau_1) - q_2(t + \tau_1 + \tau_2) \le b_2,$$

$$0 \le Q(t) \le Q_1^{\max}.$$

З цієї системи визначимо значення $Q_1(t)$.

$$\max\left\{ 0, \max\left\{a_2 + q_1(t + \tau_1) + q_2(t + \tau_1 + \tau_2, q_1(t + \tau_1)\right\} + a_1\right\} \le Q_1(t) \le$$

$$\le \min\left\{\mathrm{Q}_1^{\max}, \min\left\{b_2 + q_1(t + \tau_1) + q_2(t + \tau_1 + \tau_2), q_1(t + \tau_1)\right\} + b_1\right\}. \tag{29}$$

Нехай A_1 і A_2 — оператори запізнювання відповідно для першого і другого б'єфів. Для урахування залежності часу добігання води від її витрат замість системи (29) використаємо при визначенні $Q_1(t)$ таку систему:

$$\max\{0, \max\{a_2 + A_1(A_2 q_2 + q_1), A_1(A_2 q_2 + q_1) - A_2 q_2(t + \tau_1)\} + a_1\} \le$$
$$\le Q_1(t) \le \min\Big\{Q_1^{\max}, \min\{b_2 + A_1(A_2 q_2 + q_1), A_1(A_2 q_2 + q_1) -$$
$$- A_2 q_2(t + \tau_1)\Big\} + b_1\ \Big\},$$

де $\tau_1 = \tau_1(H)$ — час добігання води, обчислений з урахуванням рівня води наприкінці каналу. Величина $Q_2(t)$ визначається аналогічно.

Зауваження і висновки. У даній роботі узагальнено метод прогнозу рівнів, який застосовується при різній інформованості про дії водоспоживачів. Він придатний як при довгостроковому плануванні, так і при раптовій зміні замовлень та аварійних ситуаціях.

Вибір оптимальних значень витрат води, що тече через гідротехнічні споруди, зводиться до розв'язання деяких систем лінійних нерівностей. Це дозволяє застосовувати запропонований метод для керування досить складними зрошувальними системами, які мають деревоподібну структуру і містять поряд з б'єфами накопичувальні басейни, а поряд з перетинаючими спорудами — насосні станції перекачування.

Метод засновано на різних моделях руху води (хвильових і балансових). У разі потреби можливе урахування залежності часу добігання хвиль від рівня і витрат води на транспортування. При обчисленнях використовується найбільш повна інформація про зрошувальну систему: дані про рівні у верхніх і нижніх б'єфах, інформація про майбутнє водоспоживання, ймовірнісна характеристика помилки в майбутніх замовленнях, дані про зміну замовлень і про поточний водорозподіл, інформація про попереднє керування зрошувальною системою.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Данильченко В.Е., Остапенко В.В., Яковлева А.П.* Математические вопросы моделирования и управления в задачах водораспределения / АН УССР. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. — Препр. — Киев, 1989. — 18 с.
2. *Данильченко В.Е., Остапенко В.В., Яковлева А.П.* Метод оперативного управления системой сложной структуры // Кибернетика и вычислительная техника. — 1986. — Вып.69. — С. 82–86.
3. *Ostapenko V.V., Jakovleva A.P.* Mathematical questions of modeling and control in water distribution problem // Control and Cybernetics. — 1991. — **20**, № 4. — P. 99–111.
4. *Остапенко В.В., Финин Г.С.* Системы линейных неравенств со структурой бесконечного графа// Проблемы управления и автоматики. — 2000. — № 3. — С. 86–90.
5. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. — Л.: Энергия, 1971. — 552 с.

Надійшла 27.12.2002