



УДК 504.064.3:634.21.634.25

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ “НАСОСНА СТАНЦІЯ – МЕРЕЖА – ДОЩУВАЛЬНА ТЕХНІКА”

Музика О.П., к.т.н.,

Войтович І.В., к.т.н.,

Стасюк Н.О., науковий співробітник

*Інститут водних проблем і меліорації НААНУ*

Тел.: 044-257-40-30

**Анотація** – запропоновано імітаційну модель вибору та оптимізації функціонування технологічного комплексу “насосна станція – мережа – дощувальна техніка”, яка може бути використана на стадії розроблення проектів реконструкції та модернізації зрошувальних систем.

**Ключові слова** – дощувальна техніка, мережа, насосна станція, модель функціонування технологічного комплексу.

*Постановка проблеми.* Сільськогосподарське виробництво на зрошуваних землях обумовлюється необхідністю постійного удосконалення технічних характеристик зрошувальних систем та інженерно-технічного забезпечення і переоснащення технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка” за рахунок використання нової сучасної техніки і обладнання та впровадження нових технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Відомо, що для нарощування та отримання гарантованих врожаїв зернових, технічних і кормових культур на зрошувальних системах України необхідно забезпечити зрошення на площі щонайменше 1,5 – 1,7 млн. га та впровадити близько 30 тис. шт. сучасної широкозахватної дощувальної техніки, як вітчизняного так і зарубіжного виробництва [1]. Відновлення зрошення в Україні

Одним із основних напрямків щодо відновлення зрошення є реконструкція та модернізація існуючих зрошувальних систем.

Побудовані в Україні в 1975–1990 рр. зрошувальні системи на площі 2,6 млн. га фізично і морально застарілі, забезпеченість їх дощувальною технікою становить не більше 16%. За останні 20 років кількість працездатних дощувальних машин зменшилась з 32 тис. шт. до 5 тис. шт., внаслідок чого фактична площа поливу в останні роки не перевищувала 600–700 тис. га. Основними причинами цього є незадовільний технічний стан внутрішньогосподарських мереж,

відсутність необхідної кількості дощувальних машин у сільгосптоваровиробників, які використовують зрошувані землі.

Таким чином, необхідність вирішення задачі вибору та оптимізації функціонування технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка” з метою відновлення зрошення є актуальним та необхідним.

*Аналіз останніх досліджень.* Вибір оптимального технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка” – задача математичного моделювання, вирішення якої потребує застосування традиційних методів або поєднання методів лінійного програмування, імітаційного моделювання, тощо [2].

При вирішенні задачі вибору та оптимізації функціонування такого технологічного комплексу нами застосовано імітаційну модель, яка враховує витрати на кожній із ланок системи, фіксує алгоритм управління подачі води насосною станцією та процеси роботи дощувальної техніки.

Слід відмітити, що сфера застосування подібних моделей не обмежується лише приведеною вище задачею оптимізації технологічного комплексу. Дані моделі можуть бути використані також на стадії розроблення проектів, в тому числі при реконструкції та модернізації зрошувальних систем [3].

*Формування цілей статті.* Розроблення імітаційної моделі вибору та оптимізації функціонування технологічного комплексу “насосна станція – мережа – дощувальна техніка”.

*Основна частина.* Для вирішення задачі вибору та оптимізації функціонування технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка” нами розроблено імітаційну модель в якій використовуються наступні допущення:

- перехідні процеси в мережі виключаємо;
- відключення дощувальної техніки пов’язано лише з виходом її із ладу;
- напірно-витратні характеристики насосних агрегатів апроксимуються параболою;
- час роботи і відновлення дощувальних машин підпорядковуються експоненціальному розподілу:

$$X=1- e^{-\lambda t}$$

- гідравлічний опір трубопроводної мережі описується квадратичним законом:

$$\Delta h=\zeta Q^2$$

(в подальшому величину  $\zeta$  називаємо гідравлічним опором).

Розроблену нами блок-схему алгоритму функціонування технологічного комплексу “насосна станція – мережа – дощувальна техніка” наведено на рисунку 1.

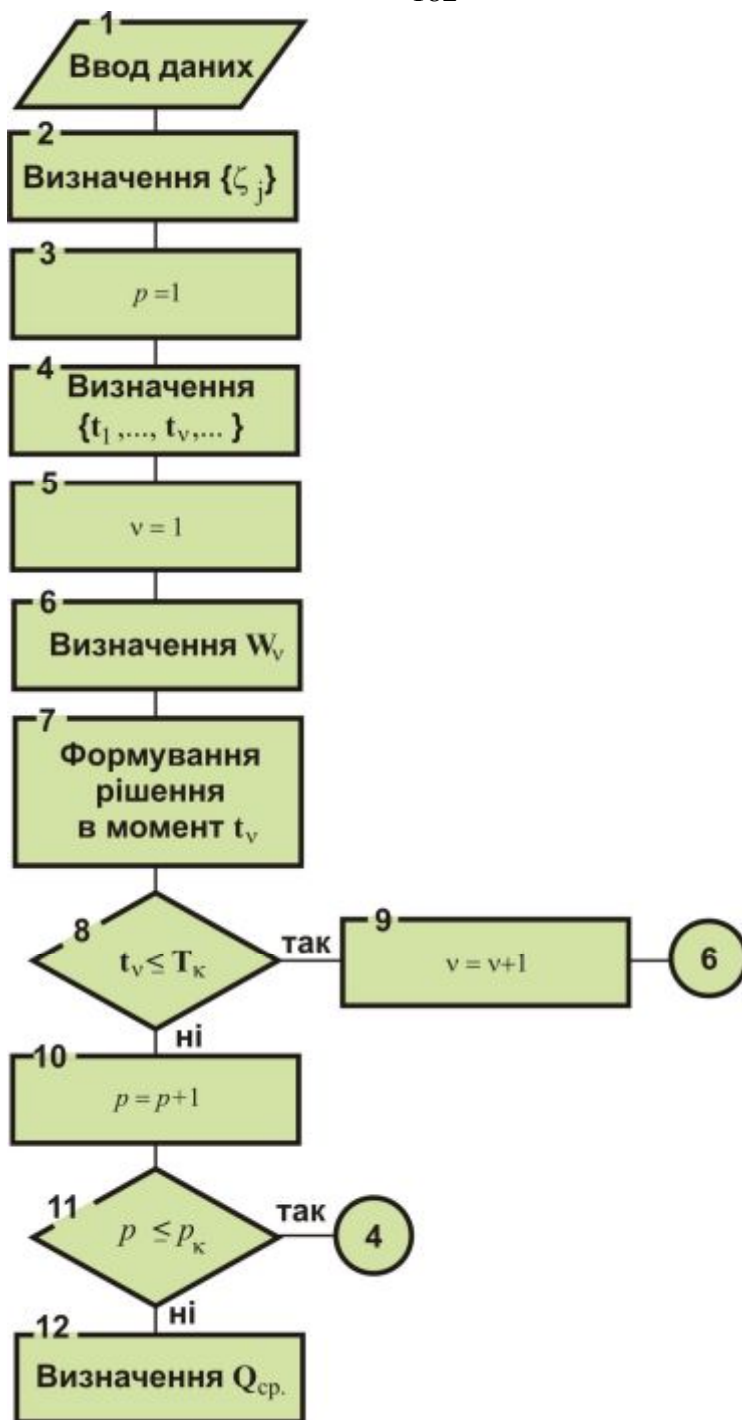


Рис. 1. Блок-схема алгоритму функціонування технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка”

**Опис алгоритму.** Блок 1. Вводяться наступні дані:

$T_n, T_k$  – термін спостереження (год);

$\eta$  – кількість стану насосної станції (НС) підкачки;

$\left. \begin{matrix} H\eta \\ S\eta \end{matrix} \right\}$  – параметри Q - H характеристики НС підкачки

$Q^*_{\eta}$  – витрати НС підкачки.

Масив чисел, який визначає граф мережі, формується таким чином: для підвищення ефективності алгоритму спочатку нумеруються гідранти  $1, \dots, I_1$ , а потім наступна арматура, що різко змінює падіння тиску (вставки, трійники, кутники, тощо)  $I_1+1, \dots, I_2$ ; номер ділянки трубопроводу  $j$  співпадає з номером арматури  $j$ , в межах яких подається вода.

Наприклад, для мережі, зображеній на рисунку 2, масив чисел, який визначає її граф наступний: 8, 1, 2, 9, 3, 8, 10, 11, 4, 5, 8, 10, 11, 6, 8, 10, 11, 7 1, 2, ..., 7 – гідранти, до яких підключені дощувальні машини, які мають ті ж самі номери, що і гідранти;

8, ..., 11 – інша арматура;

$d_j$  – діаметр  $j$ -го трубопроводу;

$l_j$  – довжина  $j$ -ї ділянки трубопроводу;

$r_j$  – код матеріалу, із якого виготовлено  $j$ -у ділянку трубопроводу;

$\zeta_j$  – гідравлічний опір  $j$ -ї арматури на  $j$ -й ділянці трубопроводу;

$\tau$  – тип дощувальної техніки, яка враховує якісні показники поливу (коефіцієнт ефективного поливу, середню інтенсивність дощу, витрати води, тощо);

$\xi_\tau$  – гідравлічний опір дощувальної техніки  $\tau$  типу;

$T_n$  – масив чисел, який характеризує роботу дощувальних машин на початковий момент ( $0$  – дощувальна машина не працює;  $1$  – дощувальна машина працює;  $1/\lambda_1$  – наробка на відмову дощувальної машини (год.));

$1/\lambda_2$  – час відновлення дощувальної машини, або її заміна (год);

$p_k$  – кількість реалізації виходу з ладу і відновлення або заміна дощувальних машин;

$p$  – номер реалізації.

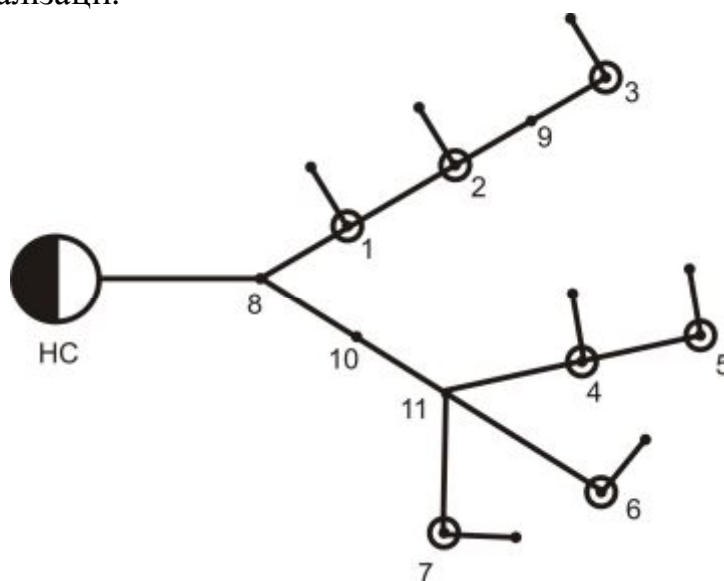


Рис.2. Мережа зрошувальної системи: 1, 2, ..., 7 – гідранти, до яких підключаються дощувальні машини.

Блок 2. Визначаємо гідравлічний опір ділянок трубопроводу  $\zeta_j$ :

– якщо  $r_j=1$  (не нова сталева або чавунна труба), то  $\zeta_j=0,001736 \frac{l_i}{d_j^{5,3}} + \zeta'_j$

– якщо  $r_j=2$  (азбестоцементна труба), то  $\zeta_j=0,001736 \frac{l_i}{d_j^{5,19}} + \zeta'_j$

Блок 3. Присвоюємо  $p$  значення  $l$ .

Блок 4. Визначаємо упорядковану по “зростанню” на інтервалі спостережень  $(T_n, T_k)$  послідовність моментів часу початку роботи і початку виходу з ладу дощувальних машин, і відповідно, кожному моменту часу підключення дощувальних машин.

Використовуючи генератор випадкових чисел на інтервалі  $(0;1)$ ; RND, визначаємо час виходу з ладу дощувальної машини:

$$t_v = t_{v-1} - \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln(1 - RND(v))$$

Аналогічно визначаємо час відновлення дощувальної машини ( $\lambda_1$  замінюємо на  $\lambda_2$ ):

$$t_v = T_n; \quad t_v \leq T_k$$

Блок 5. Присвоюємо змінній  $t$  початковий момент часу спостереження

$$t = t_0$$

Блок 6. Визначаємо витрату насосної станції підкачки (НС) на вході в мережу зрошувальної системи  $\tilde{Q}_p$ , яка є сумою витрат працюючих дощувальних машин. Ці витрати є рішенням системи квадратних рівнянь.

Для прикладу розглянемо мережу зрошувальної системи (рис. 2).

Система квадратичних рівнянь для такого випадку має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + \zeta_1 \left( \sum_{i=1}^3 Q_i \right)^2 + \zeta_1 Q_1^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + \zeta_1 \left( \sum_{i=1}^3 Q_i \right)^2 + \zeta_2 \left( \sum_{i=2}^3 Q_i \right)^2 + \zeta_2 Q_2^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + \zeta_1 \left( \sum_{i=1}^3 Q_i \right)^2 + \zeta_2 \left( \sum_{i=2}^3 Q_i \right)^2 + (\zeta_9 + \zeta_3 + \zeta_3) Q_3^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_{10} + \zeta_{11}) \left( \sum_{i=4}^7 Q_i \right)^2 + \zeta_4 \left( \sum_{i=4}^5 Q_i \right)^2 + \zeta_4 Q_4^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_{10} + \zeta_{11}) \left( \sum_{i=4}^7 Q_i \right)^2 + \zeta_4 \left( \sum_{i=4}^5 Q_i \right)^2 + (\zeta_5 + \zeta_5) Q_5^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_{10} + \zeta_{11}) \left( \sum_{i=4}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_6 + \zeta_6) Q_6^2 \\ H_{\eta} - S_{\eta} \tilde{Q}_p^2 = \zeta_8 \left( \sum_{i=1}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_{10} + \zeta_{11}) \left( \sum_{i=4}^7 Q_i \right)^2 + (\zeta_7 + \zeta_7) Q_7^2 \end{array} \right.$$

де,  $\tilde{Q}_p = \sum_{i=1}^7 Q_i$

Дана система квадратичних рівнянь вирішується наступним чином: формуємо матриці  $C, I, A$ .

Кожен рядок матриці  $C$  є напрямком подачі води від насосної станції до ближнього гідранту, до якого підключена дощувальна машина.

Кількість рядків матриці  $C$  дорівнює кількості гілок графа мережі, до яких підключені дощувальні машини.

Кожен рядок матриці  $I$  складається із номерів гідрантів на гілці, до якої підключені працюючі дощувальні машини. Першим елементом рядка матриці  $I$  є номер ближнього гідранту на відповідній гілці.

Рядки матриці  $I$  відповідають рядкам матриці  $C$ .

Матриця  $A$  – матриця коефіцієнтів, які визначають витрати води дощувальних машин на гілках графу мережі зрошувальної системи через витрати води дощувальних машин, які знаходяться у кінцевій точці відповідних гілок. Якщо дощувальна машина на  $k$ -ій гілці буде єдиною, то

$$a_{kI} = 0;$$

якщо дощувальних машин буде дві, то

$$a_{kI} = \sqrt{\frac{\xi_1}{\xi_{i+1} + \tilde{\zeta}_{i+1}}}$$

а у разі якщо їх більше двох, то

$$a_{kj} = \sqrt{\frac{\xi_i}{\tilde{\zeta}_{i+1} \left(1 + \sum_{n=j+1}^{j_k-1} a_{kn}\right)^2 + \xi_{i+1}}}, \quad j = 1 \div j_k - 1$$

де  $\xi_i$ ;  $\xi_{i+1}$  – опір дощувальних машин, підключених до гідрантів з номерами  $i$  та  $i+1$  ( $i \in I$ );

$\tilde{\zeta}_{i+1}$  – опір трубопроводу між  $i$  та  $i+1$  гідрантами ( $i \in I$ );

$j_k$  – кількість працюючих дощувальних машин на  $k$ -ій гілці.

Для мережі зрошувальної системи, яка зображена на рисунку 2, матриці  $C, I, A$  мають вигляд:

$$C = \begin{pmatrix} 8 & 1 & 0 & 0 \\ 8 & 10 & 11 & 4 \\ 8 & 10 & 11 & 6 \\ 8 & 10 & 11 & 7 \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} \frac{\xi_1}{\zeta_2 + \xi_2} & \frac{\xi_2}{\tilde{\zeta}_3(1+a_{11})^2 + \xi_3} \\ \frac{\xi_4}{\zeta_5 + \xi_5} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{де } a_{11} = \frac{\xi_1}{\zeta_2 + \xi_2} ; \quad \tilde{\zeta}_3 = \zeta_3 + \zeta_9.$$

Матрицю  $C$  перетворюємо в матрицю  $B$  перекодувавши граф мережі за точками розміщення трубопроводу, враховуючи тільки ті гілки трубопроводу, до яких підключені працюючі дощувальні машини.

$N$  – найбільший елемент матриці  $B$ .

Одночасно з матрицею  $B$  формуємо масив опору відповідних матриці  $B$  ділянок трубопроводу мережі зрошувальної системи  $\{z_i\}$ .

$z_i$  – розраховується як сума опору попередніх ділянок трубопроводу мережі зрошувальної системи.

Для мережі зрошувальної системи, яка зображена на рис. 3, матриця буде мати такий вигляд:

$$B = \begin{pmatrix} 8 & 1 & 0 \\ 8 & 9 & 4 \\ 8 & 9 & 6 \\ 8 & 9 & 7 \end{pmatrix},$$

а граф мережі в нових позначеннях мати вигляд:

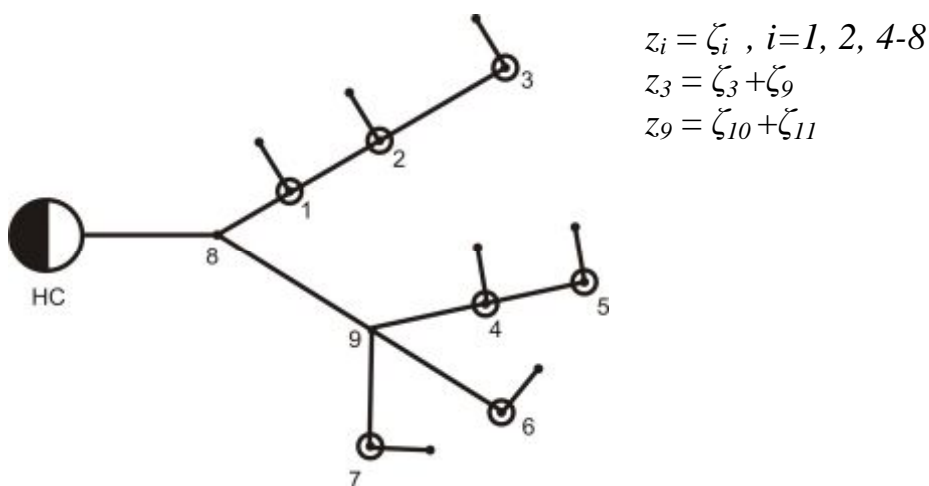


Рис. 3. Мережа зрошувальної системи в нових позначеннях.

Присвоюємо  $n=N$ . Визначаємо допоміжні коефіцієнти:

$$F_{1i} = 1 + \sum_{j=1}^{j_k} a_{kj};$$

$$F_{2i} = z_i (F_{1i})^2 + \zeta_i,$$

де  $i$  – номера гідрантів із першого стовпця матриці  $I$ .

Для випадку мережі зрошувальної системи, зображеної на рисунку 2,  $N = 9$ .

Для вирішення системи рівняння, наведеної вище, використовуємо допоміжні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} F_{11} &= 1 + a_{11} + a_{12}; & F_{21} &= z_1 (F_{11})^2 + \zeta_1 \\ F_{14} &= 1 + a_{21}; & F_{24} &= z_4 (F_{14})^2 + \zeta_4 \\ F_{16} &= 1; & F_{26} &= z_6 + \zeta_6 \\ F_{17} &= 1; & F_{27} &= z_7 + \zeta_7 \end{aligned}$$

Допоміжні коефіцієнти, які визначають витрати води дощувальних машин підключених до гідрантів з номерами  $i$  та  $i^*$ ,

маючих загальну ділянку трубопроводу з номером  $n$  визначаємо наступним чином:

$$l_i = \sqrt{\frac{F_{2i^*}}{F_{2i}}}$$

де  $i^*$  – номер гідранту, який має найменший номер рядка в матриці  $B$ .

Тоді допоміжний коефіцієнт зміниться:

$$F_{1i^*} = F_{1i^*} + F_{1i} + l_i - 1$$

Із елементів  $i$  та  $i^*$  формуємо масив  $M$ :

$$M_{1k} = i; \quad M_{2k} = i^*.$$

Для прикладу, який нами розглядається (рис. 3), коефіцієнти розраховуються наступним чином:

$$l_6 = \sqrt{\frac{F_{24}}{F_{26}}}; \quad i^* = 4; \quad F_{14} = 1 + a_{21} + \sqrt{\frac{F_{24}}{F_{26}}};$$

$$l_7 = \sqrt{\frac{F_{24}}{F_{27}}}; \quad i^* = 4; \quad F_{14} = 1 + a_{21} + \sqrt{\frac{F_{24}}{F_{26}}} + \sqrt{\frac{F_{24}}{F_{27}}};$$

$$M_1 = (6,4);$$

$$M_2 = (7,4).$$

Якщо гідрант  $i$  – останній з розглянутих гідрантів, то розраховуємо коефіцієнт:

$$F_{2i^*} = z_n \cdot F_{1i^*}^2 + F_{2i^*}.$$

Змінюємо  $n$  на одиницю:  $n = n - 1$ .

Аналогічно розраховуємо інші коефіцієнти до того часу поки значення  $n$  не стане рівне найменшому елементу матриці  $B$ .

В такому випадку:

$$F_{2i^*} = (z_n + S_\eta) \cdot F_{1i^*}^2 + F_{2i^*}.$$

Використовуючи масив  $M$  розраховуємо невідомі витрати води для дощувальних машин:

Для першої гілки:

$$Q_{i1} = \sqrt{\frac{H_\eta}{F_{2i^*}}}$$

$$Q_{ij+1} = a_{1j} \cdot Q_{ij}; \quad j=1, \dots, j_1-1$$

Для  $k$ -ї гілки

$$Q_{ik} = l_{M1k} \cdot Q_{M2k}$$

$$Q_{ij+1} = a_{kj} \cdot Q_{ij}; \quad j=1, \dots, j_k-1$$

Визначаємо суму цих витрат  $\tilde{Q}_v$ . При цьому  $\tilde{Q}_v$  є витратою на вході в мережу. Визначаємо об'єм  $W_v$  за час між початком періоду спостережень і наступним моментом часу  $t_{v+1}$ , закінчуючи конфігурацію підключення дощувальних машин:

$$W_v = W_{v-1} + \tilde{Q}_v (t_{v+1} - t_v)$$



Якщо  $t_v$  – останній момент зміни конфігурації підключення дощувальних машин на мережі, то  $t_{v+1}=T_k$ .

Блок 7. В залежності від того яка величина витрати, приймається рішення: чи включити додатково один насосний агрегат, або, навпаки, виключити один працюючий насосний агрегат, чи залишити все без зміни.

Блок 8. Якщо термін спостереження  $t_v$  закінчився, то переходимо до блоку 10.

Блок 9. Визначаємо наступний момент часу  $t_v$  – час зміни конфігурації підключення дощувальних машин на мережі. Переходимо до блоку 6.

Блок 10. Визначаємо значення середньої витрати НС для  $p$ -го набору за формулою:

$$Q_p = \frac{W_v}{T_k - T_H} \cdot$$

Змінюємо  $p$ :  $p = p + 1$ .

Блок 11. Якщо  $p \leq p_k$ , то переходимо до блоку 4.

Блок 12. Визначаємо  $Q_{cp}$  за формулою:

$$Q_{cp} = \frac{\sum_{p=1}^{p_k} Q_p}{p_k} \cdot$$

Таким чином, наведено алгоритм функціонування технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка”, який дає змогу на стадії прийняття проектних рішень змодельовати різні варіанти та визначитись з оптимальним рішенням щодо вибору технологічного комплексу.

*Висновок.* Розроблена імітаційна модель дасть можливість здійснити оптимізацію функціонування технологічного комплексу “насосна станція–мережа–дощувальна техніка” на етапі розроблення проектів реконструкції та модернізації зрошувальних систем. Виконання технологічного процесу буде забезпечено раціональним вибором сучасної дощувальної техніки різного типу та насосного обладнання насосних станцій.

*Література.*

1. Комплексна реконструкція і модернізація зрошувальних систем / М.І. Ромащенко, О.В. Шевченко, С.А. Балюк, О.П. Музика // Наукові основи охорони та раціонального використання зрошуваних земель України (за науковою редакцією: С.А. Балюка, М.І. Ромащенко, В.А. Старука). – Київ, Аграрна наука – 2009. – С. 246 – 251.
2. Перехов А.П. Цифровое моделирование механизированных процессов сельскохозяйственного производства / А.П. Перехов. – М. Машиностроение, 1971. – 243 с.
3. Златник А.А. Композиционный метод эволюционного моделирования в проектных задачах / А.А. Златник. – Черкассы, 2002. – 7 с.

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА «НАСОСНАЯ СТАНЦИЯ-СЕТЬ-  
ДОЖДЕВАЛЬНАЯ ТЕХНИКА»**

*Музыка А.П., Войтович И.В., Стасюк Н.О.*

**Аннотация** – предложено имитационную модель выбора и оптимизации функционирования технологического комплекса «насосная станция-сеть-дождевальная техника», которая может быть использована на стадии разработки проектов реконструкции и модернизации оросительных систем.

**SIMULATION MODEL FOR FUNCTIONING OPTIMIZATION OF  
“PUMPING FACILITY – NETWORK- SPRINKLING  
EQUIPMENT” TECHNOLOGICAL COMPLEX**

*O. Muzyka, I. Voytovych, N. Stasuk*

**Summary**

It is proposed a simulation model for the selection and functioning optimization of “pumping facility – network- sprinkling equipment” technological complex which can be used at the project development stage on reconstruction and modernization of irrigation systems.