

# Аналітична Підсистема Оптимального Управління Розвитком і Функціонуванням Систем Водопостачання

Андрій Тевяшев  
кафедра прикладної математики  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки  
Харків, Україна  
tad45ua@gmail.com

Ольга Матвієнко  
кафедра прикладної математики  
Харківський національний  
університет радіоелектроніки  
Харків, Україна  
olga\_mat@ukr.net

Гліб Нікітенко  
заступник директора департаменту  
інформаційних технологій  
Комунальне підприємство  
«Харківводоканал»  
Харків, Україна  
gvnikitenko@gmail.com

## Analytical Subsystem of Optimal Management of Development and Operation of Water Supply Systems

Andrei Tevyashev  
Department of Applied Mathematics  
Kharkiv National University  
of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
tad45ua@gmail.com

Olga Matviyenko  
Department of Applied Mathematics  
Kharkiv National University  
of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
olga\_mat@ukr.net

Glib Nikitenko  
deputy director  
Department of Information  
Technology Municipal Enterprise  
«KharkivVodokanal»  
Kharkiv, Ukraine  
gvnikitenko@gmail.com

**Анотація**—Дана робота присвячена розробці інструментальних засобів і методик їх використання для розв'язання комплексу задач оптимального управління розвитком і функціонуванням систем водопостачання та водовідведення.

**Abstract**—This work is devoted to the development of tools and techniques for using them to solve the complex tasks of optimal management of the development and operation of water supply and drainage systems.

**Ключові слова**—система водопостачання, гідравлічне моделювання, стохастична модель, оптимальне управління.

**Keywords**—water supply system, hydraulic modeling, stochastic model, optimal control.

### I. БІЗНЕС-ВИМОГИ ДО ГІДРАВЛІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

#### Бізнес – вимоги до гідравлічних моделей

Математичною основою розроблюваних інструментальних засобів є математичні моделі технологічних елементів систем водопостачання та процесів водовідведення стічних вод і скидів.

- Базова детермінована модель сталого потоку розподілу (СПР) у водопровідній мережі (ВМ) [1], на основі якої розроблені практично всі відомі комплекси гідравлічного моделювання потокорозподілу в системах водопостачання (СВ) забезпечує адекватність розрахунків потокорозподілу ВМ тільки для фіксованого моменту часу  $t$ , при точно заданих детермінованих значеннях граничних умов -напорів і витрат у вузлах ВМ, і при точно відомих



Інформаційні системи та технології ICT-2019  
Секція 3. Інформаційні технології сталого розвитку.  
Геоінформаційні системи та технології.

детермінованих значеннях параметрів технологічного обладнання ВМ (параметрів насосних агрегатів (НА), параметрів ділянок трубопроводів (ДТ), регулюючої (РА) і відтиваючої арматури (ВА), параметрів резервуарів чистої води (РЧВ), водопровідних насосних станцій (НС) і приймальних резервуарів каналізаційних насосних станцій (КНС)). Гідравлічне моделювання поточкорозподілу у ВМ на основі моделі СПР використовується при вирішенні задач проектування та реконструкції водопровідних мереж та КНС, які працюють на напірні трубопроводи.

- Стохастична модель квазістаціонарних режимів (СМКР) роботи ВМ [2] є більш адекватною математичною моделлю фактичних режимів роботи ВМ і каналізаційних мереж (КМ) на деякому інтервалі часу, на якому випадкові процеси споживання води у ВМ та припливу стічних вод у КМ є стаціонарними. У цих моделях фактичні параметри технологічного обладнання ВМ замінюються їх оцінками, отриманими в результаті обробки експериментальних даних за вибірками кінцевої довжини, і розглядаються як випадкові величини з відомими математичними сподіваннями і дисперсіями. Ці моделі використовуються для вирішення задач оперативного планування режимів роботи систем водопостачання і водовідведення з упередженням 24 години (1 доба), а також для тестування проектних рішень.

- Детерміновані моделі несталого поточкорозподілу (НПР) у ВМ і КМ дозволяють адекватно описувати перехідні процеси (гідравлічні удари) у водопровідних мережах і на КНС в аварійних ситуаціях, пов'язаних з розривами напірних трубопроводів, некерованим відключенням НА унаслідок їх відмови, або відключення електроенергії. Ці моделі використовуються для налаштування і тестування систем захисту від гідравлічних ударів ВМ, НС і КНС.

#### **Бізнес–вимоги до моделей процесів водоспоживання у СВ**

Основним цільовим призначенням СВ є забезпечення населення і підприємств міст і населених пунктів необхідними обсягами питної води, що подаються під необхідними напорами, якість якої має відповідати вимогам СНП. Відомо [3], що процеси водоспоживання різними категоріями споживачів є випадковими процесами, що залежать від трьох основних груп факторів: хронологічних (час доби, день, тиждень); метеорологічних (температура навколишнього середовища, опади); організаційних (тарифи на воду, територіальна структура та план її розвитку (забудова), планово-профілактичні та ремонтно-відновлювальні роботи).

Вплив усіх цих факторів на процеси водоспоживання різними категоріями споживачів істотно відрізняється, проте, в загальному випадку, їх комплексний вплив призводить до їх нестационарності, тобто до наявності у них поліноміальних, полігармонічних і стохастичних трендів. Відомо [1], що найбільш адекватний опис цих процесів можна отримати в класі взаємопов'язаних

мультиплікативних моделей авторегресії проінтегрованого змінного середнього (АРІЗС). Ці моделі дозволяють отримати найбільш адекватні значення прогнозів фактичного водоспоживання і дисперсії прогнозів. Для оперативного управління прогнози обчислюються з упередженням 24 години (на одну добу), для управління розвитком СВ - з упередженням 12 місяців (на один рік). Наявність таких моделей і їх використання для обчислення прогнозів водоспоживання є необхідною умовою побудови систем оптимального управління розвитком і функціонуванням СВ [3].

#### **Бізнес–вимоги до методів гідравлічного моделювання**

Детермінована модель СПР у ВМ будується на основі детермінованих моделей технологічних елементів СВ і являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь в одній із наступних модифікацій моделі у вигляді:

- моделі вузлових потенціалів;
- моделі контурних потоків.

У моделі вузлових потенціалів кількість рівнянь збігається з кількістю вузлів ВМ, що для реальних ВМ міст і населених пунктів може становити десятки тисяч.

У моделі контурних потоків кількість рівнянь моделі СПР збігається з кількістю незалежних циклів ВМ, яка, як правило, на порядок менша за кількість її вузлів.

Час розв'язання системи управління моделі СПР, як правило, пропорційний кількості розв'язуваних рівнянь. Тому, для гідравлічного моделювання поточкорозподілу у ВМ з урахуванням детермінованої моделі СПР доцільно використовувати її в формі моделі контурних потоків.

Для розв'язання системи рівнянь моделі СПР у ВМ повинні бути задані наступні оперативні дані:

Варіант 1. У всіх вузлах ВМ, до яких підключені споживачі, повинні бути задані чисельні значення витрат води, а також значення мінімально допустимих напорів.

Варіант 2. У кожному вузлі ВМ має бути задано чисельне значення або витрати, або напору води, при цьому хоча б в одному з вузлів ВМ обов'язково повинно бути задано чисельне значення напору.

Варіант 3. У всіх вузлах ВМ, до яких підключені споживачі, повинні бути задані чисельні значення витрат води, і в одному з вузлів ВМ (як правило, на одному із входів ВМ) задано чисельне значення напору.

В результаті розв'язання системи рівнянь моделі СПР за варіантом 1, отримуємо:

1. місце розташування «диктуючих точок» (ДТ) ВМ, де ДТ — це вузол, в якому розрахунковий напір строго дорівнює мінімально допустимому напору (у всіх інших вузлах ВМ він буде більше);

2. чисельні значення витрат і перепади напорів на кожній ділянці ВМ;

3. напрямок та швидкість руху води на кожній ділянці;



4. чисельні значення надлишкового тиску в кожному вузлі ВМ;

5. чисельні значення надлишкового тиску і витрати води на кожному вході ВМ.

У результаті розв'язання системи рівнянь моделі СПР за варіантом 2 отримуємо чисельні значення змінних, що характеризують поточкорозподіл у ВМ, що зазначені в пунктах 2 — 5 для варіанту 1. При цьому чисельні значення надлишкових тисків пункту 4 можуть бути від'ємними.

Для розв'язання системи рівнянь моделі СПР у ВМ з активними елементами і приймальними РЧВ, повинні бути задані:

- у всіх вузлах ВМ, до яких підключені споживачі, - чисельні значення витрат води;
- на входах НС — рівень води в приймальному резервуарі кожної НС, що працює на ВМ;
- кількість, типи, обороти приводу всіх включених НА, ступінь відкриття регулюючих засувок на кожній з НС, що працюють на ВМ.

У результаті розв'язання системи рівнянь моделі СПР з активними елементами отримуємо:

1. чисельні значення змінних, що характеризують СПР у ВМ, що зазначені в пунктах 2 — 5 для варіанту 1. При цьому чисельні значення надлишкових тисків у пункті 4 можуть бути від'ємними.

2. чисельні значення подачі (витрати) води, ККД НА, миттєвої потужності кожного НА, ККД і миттєві значення витраченої електроенергії на кожному електроприводі НА, а також сумарне значення обсягів подачі води і напору на кожному виході кожної НС, що працює на ВМ.

#### **Стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи ВМ**

Розв'язання задач оперативного планування режимів роботи СВ на заданому інтервалі часу  $[0, T]$  з використанням детермінованих моделей СПР вимагає точного завдання значень оцінок усіх параметрів математичних моделей технологічного обладнання СВ і точного завдання значень граничних умов. Отримане оптимальне рішення в точності відповідає тільки цим оцінкам і граничним умовам. Для реальних СВ параметри моделей технологічного обладнання СВ апіорі невідомі, а оцінки цих параметрів по вибірках експериментальних даних кінцевої довжини самі є випадковими величинами. Більш того, основними збуджуючими факторами СВ є стохастичні процеси споживання води різними категоріями споживачів. Ці процеси є нестационарними випадковими процесами, які мають надзвичайно складну кореляційну структуру і залежать від трьох основних груп факторів: хронологічних, метеорологічних і організаційних. При розв'язанні завдань оперативного планування режимів роботи СВ значення прогнозів процесів водоспоживання використовуються як граничні умови. Це призводить до того, що навіть незначні варіації

параметрів моделей або граничних умов не тільки істотно змінюють оптимальне рішення, але можуть вивести його з допустимої області. Природно, що такі «оптимальні» розв'язки не можуть бути використані диспетчерськими службами для ефективного управління режимами роботи СВ. Для постановки і ефективного розв'язання задач оперативного планування режимів роботи СВ необхідно використовувати стохастичні моделі квазістаціонарних режимів роботи СВ, які більш адекватно і в більш широкому діапазоні описують фактичні режими. Стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи СВ дозволяє представити реальний, істотно нестационарний режим роботи СВ у вигляді послідовності квазістаціонарних режимів, параметри яких змінюються стрибкоподібно кінцеве число разів на заданому інтервалі часу  $[0, T]$  [4, 5].

Стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи ВМ будується на основі стохастичних технологічних елементів СВ, які отримані з детермінованих моделей шляхом заміни в них всіх параметрів і змінних на випадкові величини. Передбачається, що всі випадкові величини, що входять в моделі, мають нормальний розподіл з відомими статистичними характеристиками - математичними сподіваннями (МС) і дисперсіями (ДИС).

При гідравлічному моделюванні квазістаціонарних режимів роботи СВ для стохастичної моделі будується її детермінований еквівалент у вигляді системи нелінійних алгебраїчних рівнянь в формах, аналогічних моделі СПР в СВ, в якій невідомі параметри замінені їх оцінками — МС і ДИС. Граничні умови також задаються у вигляді випадкових величин, що мають нормальний розподіл, і також задаються своїми параметрами — МС напорів або витрат води на входах і виходах ВМ і їх ДИС. Таке завдання граничних умов дозволяє звести рішення системи рівнянь математичної моделі до розрахунку статистичних характеристик (МО і ДИС) залежних змінних в залежності від статистичних властивостей параметрів і незалежних змінних стохастичної моделі.

#### **Детерміновані моделі несталоного поточкорозподілу (НПР) у ВМ**

При проектуванні, реконструкції та аналізі аварій у СВ і напірних трубопроводах необхідно мати інструментальні засоби, що дозволяють проводити розрахунок зміни тиску і швидкості руху води в напірних трубопроводах при гідравлічному ударі, який часто є однією з основних причин виникнення аварійних ситуацій в СВ. Гідравлічні удари відбуваються при закритті і відкритті засувки, клапанів, відтинаючих кранів, а також при нештатних режимах пуску і зупинки НА. Відомо, що гідравлічний удар є причиною пошкодження труб і насосів, а тривалі коливання тиску при гідравлічному ударі поступово руйнують стикові з'єднання і порушують показання вимірювальних приладів. При гідравлічному ударі і деяких умовах, тиск в напірних трубопроводах може знижуватися до вакуумметричного, що викликає процес інфільтрації і засмокування всередину трубопроводів різних забруднень через свищі, нещільності в стиках труб,



внаслідок чого погіршується якість води, що транспортується. Гідравлічний удар, що супроводжується зниженням тиску нижче атмосферного, являє собою найбільш складний розрахунковий випадок. Оскільки при подальшому зниженні тиску в трубопроводі може відбутися утворення в них кавітаційної каверни, що в свою чергу веде до розривів суцільності потоку води в одній або в декількох точках по довжині трубопроводу.

На магістральних водоводах гідравлічні удари найчастіше відбуваються внаслідок відключення електроенергії, що живить електродвигуни НА. Часто результатом таких збоїв електропостачання є гідравлічний удар, що супроводжується зниженням тиску нижче атмосферного в усьому трубопроводі або в будь-якій його частині. У таких випадках величина максимального ударного тиску в більшій мірі залежить від характеру падіння величини тиску у насоса при його поступовій зупинці і від профілю трубопроводу. На ліквідацію наслідків зазначених аварій витрачаються величезні кошти.

Для захисту трубопроводів від гідравлічних ударів вирішальне значення мають досконалі методи гідравлічного розрахунку напірних трубопроводів і надійна конструкція протиударних пристроїв, а також правильна їх експлуатація. Метод розрахунку гідравлічних ударів в напірних трубопроводах повинен дозволяти отримати досить точні значення ударних тисків на протязі всього трубопроводу.

Детермінована модель несталої поточкорозподілу в СВ, що дозволяє досить адекватно описувати процеси поширення хвиль стиснення і розрядження в напірних трубопроводах, описується двома взаємопов'язаними системами рівнянь: системою диференціальних рівнянь першого порядку в приватних похідних для кожної ділянки трубопроводу і системою лінійних алгебраїчних рівнянь, що визначає умови узгодження параметрів потоків води у всіх вузлах ВМ. Для розв'язання цих систем вони до визначаються початковими і граничними умовами. В якості вихідних умов використовуються результати моделювання СПР в нульовий момент часу, а в якості граничних умов повинні бути задані чисельні значення зміни напорів і витрат як функцій часу на всіх входах і виходах ВМ. В якості методу вирішення отриманих систем використовуються методи кінцевих елементів або кінцевих різниць.

## II. БІЗНЕС–ВИМОГИ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ АНАЛІТИЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ

Аналітична підсистема використовує статичну інформацію геоінформаційної та динамічну інформацію SCADA- системи для вирішення функціонально повного комплексу наступних задач.

1. Комплекс задач прогнозування процесів водоспоживання та збросу стічних вод:

- побудова стохастичних моделей процесів водоспоживання різними категоріями споживачів ВМ

в залежності від хронологічних, метеорологічних, організаційних факторів;

- побудова стохастичних моделей процесів збросу стічних вод різними категоріями споживачів в системах водовідведення в залежності від хронологічних, метеорологічних, організаційних факторів;

- оперативне прогнозування процесів водоспоживання (збросу стічних вод) з упередженням 24 години (доба);

- стратегічне прогнозування процесів водоспоживання (збросу стічних вод) з упередженням 12 місяців (рік).

2. Комплекс задач побудови та сертифікації гідравлічних моделей:

- побудова та сертифікація гідравлічної розрахункової моделі СПР у ВМ за технологічними схемами та експериментальними даними;

- побудова та сертифікація стохастичної гідравлічної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ за технологічними схемами та експериментальними даними;

- побудова та сертифікація стохастичної гідравлічної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ з прихованими витоками.

3. Комплекс задач використання гідравлічних моделей для реконструкції та розвитку ВМ:

- багатоваріантне гідравлічне моделювання поточкорозподілу у ВМ на основі детермінованої моделі СПР і визначення «вузьких місць» для фіксованих моментів часу;

- гідравлічне моделювання та повірені розрахунки ВМ на основі стохастичної гідравлічної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ на заданому інтервалі часу;

- обчислення оцінок технічних та економічних показників фактичних режимів роботи технологічного обладнання систем водопостачання та водовідведення;

- конструкторський гідравлічний розрахунок систем водопостачання та водовідведення та обчислення оцінок потенціалу ресурсо- та енергозбереження;

- багатоваріантне гідравлічне моделювання поточкорозподілу у ВМ та видача технічних умов на підключення нових абонентів, розрахунок резерву пропускну здатності ВМ;

- багатоваріантне гідравлічне моделювання поточкорозподілу у ВМ, аналіз варіантів зонування ВМ та видача рекомендацій щодо встановлення регуляторів тиску;

- розробка технічних завдань на реконструкцію ВМ та заміну обладнання;



- формування обґрунтування для інвестиційних програм на заміну ділянок трубопроводів або обладнання.

4. Комплекс задач використання гідравлічних моделей для управління планово-упереджувальними та аварійно-відновлювальними роботами:

- побудова ефективних рекомендацій з оперативної локалізації аварійних ділянок ВМ та КМ з урахуванням технічного стану запірної арматури; організація служби аварійно-відновлювальних робіт та планово попереджувальних робіт;
- планування та контроль виконання планово-упереджувальних робіт;
- побудова та сертифікація детермінованої моделі нестационарних режимів транспорту води та її використання для систем захисту від гідравлічного удару.

5 Комплекс задач оперативно-диспетчерського управління режимами роботи систем водопостачання та водовідведення:

- оперативне планування режимів подачі та розподілу води у ВМ з упередженням 24 години (доба);
- стабілізація вільних напорів у «диктуючих точках» ВМ для кожного контрольованого моменту часу.

6. Комплекс задач візуалізації результатів:

- візуалізація п'єзометричних профілів і поверхонь вільних напорів у ВМ для будь-якого моменту часу;
- візуалізація результатів гідравлічних розрахунків систем водопостачання та водовідведення.

### III. БІЗНЕС–ВИМОГИ ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Інструментальні засоби аналітичної підсистеми мають вигляд взаємопов'язаної системи стандартизованих

програмних комплексів на американському стандарті EPANET та на наступних стандартах організації України (COU):

- COU Системи водопостачання. Гідравлічний розрахунок водопровідних мереж;
- COU Системи водопостачання. Гідравлічний розрахунок багатониткових магістральних водоводів;
- COU Системи водопостачання. Зонування водопровідних мереж;
- COU Системи водопостачання. Оперативне планування режимів роботи систем водопостачання;
- COU Системи водопостачання. Стабілізація напорів в «диктуючих» точках водопровідної мережі;
- COU Системи водопостачання. Прогнозування процесів водоспоживання різними категоріями споживачів в залежності від хронологічних, метеорологічних, організаційних факторів.

### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Евдокимов А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 144 с.
- [2] Tevyashev A. D. About One Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems / A. D. Tevyashev, O. I. Matvienko / Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2014. – Vol. 3, № 3. – P. 61–76.
- [3] Tevyashev A. About one Problem of Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of Water Mains / A. Tevyashev, O. Matviyenko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2015. –Vol. 4, № 3. – P. 3–12.
- [4] Tevyashev A. Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of the Sewage Pumping Station / A. Tevyashev, G. Nikitenko, O. Matviyenko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2015. – Vol. 4, № 3. – P. 47–55.
- [5] Tevyashev A. About One Class of the Problems of Optimal Stochastic Control of Hybrid Dynamical Systems / A. Tevyashev, O. Matviyenko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2016. –Vol. 5, № 3. – P. 3–10.

