

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.74.482-498>

УДК 628.1.2.3

Потапенко Світлана Павлівна,

аспірантка кафедри водопостачання та водовідведення

Київського національного університету будівництва і архітектури

potapenko_sp-2022@knuba.edu.ua

<http://orcid.org/0009-0000-4221-4048>

МОДЕЛІ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Анотація: у статті розроблено концептуальну багатокритеріальну модель підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, що є критично важливим в умовах зростаючих техногенних, екологічних, соціальних та військових загроз для інфраструктури України. Запропоновано комплексну методологічну основу для прийняття управлінських рішень, яка враховує повний життєвий цикл об'єктів, системний вплив внутрішніх і зовнішніх факторів, а також імовірні ризики та сценарії втрат. Методологія дослідження поєднує системний аналіз для виявлення вразливостей, логіко - математичне моделювання для формалізації завдань, ризик - орієнтоване планування для ідентифікації загроз та математичну оптимізацію для пошуку найкращих рішень. Для визначення пріоритетності критеріїв застосовано метод аналізу ієрархій, а для структурування причинно - наслідкових зв'язків - діаграму Ісікави. Стійкість формалізована через інтегральний показник $R(S)$, який максимізується за допомогою цільової функції, що агрегує зважені критерії, такі як мінімізація втрат води, енерговитрат та експлуатаційних витрат. Створена ієрархічна структура управління дозволяє адаптувати рішення на державному, регіональному та муніципальному рівнях, що продемонстровано на конкретних прикладах для України. Модель трансформує стратегічні цілі у практичні плани дій для реагування на надзвичайні ситуації, зокрема на руйнування інфраструктури чи хімічне забруднення джерел водопостачання. Практична реалізація моделі, що підтверджується розрахунковим зростанням інтегрального показника стійкості, слугує науково обґрунтованою основою для розробки схем оптимізації. Застосування цього підходу дозволяє зменшити вразливість систем, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити безперервність надання послуг населенню.

Ключові слова: оптимізація; метод; модель; ризики; стійкість; системи питного водопостачання та водовідведення; управління; формула.

Постановка проблеми. У сучасних умовах функціонування критичної інфраструктури України системи питного водопостачання та водовідведення перебувають під тиском низки дестабілізуючих факторів. Це і високий рівень фізичного зносу обладнання, і складна енергетична ситуація, і загрози, пов'язані з воєнними діями. Ризики виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, а також цілеспрямовані атаки на елементи інженерної інфраструктури вимагають нових підходів до управління її стійкістю.

Підвищення надійності та безперебійності надання послуг з централізованих водопостачання та водовідведення стає не лише технічним, але й стратегічним завданням державної безпеки. У цьому контексті зростає значення моделей, які дозволяють враховувати багатофакторний вплив, ієрархічність рішень, а також сценарний характер загроз [1, 17, 18].

Аналіз останніх досліджень. В даний час в Київському національному університеті будівництва і архітектури та ТОВ «Інститут комунальної інфраструктури» здійснюються наукові дослідження із розробки нових моделей вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення у вигляді проєктів Порядків розроблення схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення. За цими напрямками видані наукові публікації (О.Кравченко, С.Потапенко) та ін.

Мета дослідження: Метою дослідження є розроблення концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, яка дозволить ефективно приймати управлінські рішення в умовах невизначеності та багатофакторного впливу. Особлива увага приділяється формалізації стійкості як комплексної системної характеристики, що враховує технічні, організаційно - економічні, екологічні, правові та соціальні аспекти.

У процесі дослідження використано комплексний підхід, що включає:

- логіко - математичне моделювання - розробку багатокритеріальної моделі оцінювання та оптимізації стійкості, з урахуванням множини цілей, обмежень, управлінських рішень і ймовірних ризиків,
- математичну оптимізацію - для пошуку кращих варіантів управлінських рішень, що забезпечують максимізацію стійкості при заданих ресурсних та нормативних обмеженнях,
- метод аналізу ієрархій - для визначення вагових коефіцієнтів цільових критеріїв за допомогою експертного оцінювання,
- ризик - орієнтоване планування - для ідентифікації та кількісної оцінки впливу ймовірних негативних подій на функціонування систем питного водопостачання та водовідведення,

- системний аналіз - для виявлення структурних зв'язків і закономірностей у функціонуванні систем питного водопостачання та водовідведення, а також для визначення ключових елементів впливу та вразливостей систем.

Запропоноване поєднання якісних та кількісних методів дозволяє забезпечити наукову обґрунтованість прийняття рішень у сфері підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення на різних рівнях управління.

Основна частина. Забезпечення надійного функціонування систем питного водопостачання та водовідведення є критично важливим завданням у контексті зростаючих ризиків техногенного, екологічного та соціального характеру. Для досягнення цієї мети необхідно розробити цілісну концептуальну модель, яка б дозволяла формувати, впроваджувати й координувати заходи, спрямовані на підвищення стійкості систем. Розглянемо ключові вектори такої концепції.

Так, перший вектор - це стійкість як системна категорія. Стійкість розглядається як здатність систем питного водопостачання та водовідведення протистояти зовнішнім та внутрішнім впливам, адаптуватися до змінних умов функціонування та забезпечувати безперервне надання послуг населенню.

Другий вектор - ієрархічність управління. Така модель передбачає багаторівневий підхід до управління: на державному, регіональному та муніципальному рівнях з урахуванням ролі суб'єктів господарювання та споживачів.

Третій вектор - це орієнтація на життєвий цикл. Управлінські рішення щодо систем питного водопостачання та водовідведення повинні прийматися з урахуванням повного життєвого циклу інфраструктури - від проєктування та будівництва до експлуатації, модернізації та утилізації.

І четвертий вектор - комплексність впливів. Ця модель враховує взаємодію технічних, організаційно - економічних, правових, екологічних та соціальних чинників, що формують загальний рівень стійкості систем.

Логіко - математична формалізація концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення включає: постановку задачі, вхідні параметри, систему цілей, множину альтернатив і обмежень, а також інтеграцію ризиків і впливів.

Зробимо загальний підхід. Сформулюємо модель як багатокритеріальну оптимізацію з урахуванням факторів ризику, технічного стану, економіки та екології. Прийнемо ланцюг прийнятих понять і зв'язків, які визначають зміст структури предметної області, що розглядається:

S - система питного водопостачання та водовідведення,

R (S) - цільова функція, що характеризує рівень стійкості системи,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор управлінських рішень (модернізація, інвестиції, резервування тощо),

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ - вектор зовнішніх і внутрішніх факторів впливу (технічний стан, ризики, енергозалежність),

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ - вектор цільових функцій,

$C(X, P)$ - система обмежень.

Цільова функція стійкості характеризується формулою:

$$\max_x R(S) = f(Z(X, P)) \quad (1)$$

де функція f - агрегуюча функція, що оцінює рівень стійкості як композицію цільових критеріїв.

Множина цілей Z характеризується матрицею:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1(X, P) \\ z_2(X, P) \\ z_3(X, P) \\ \vdots \\ z_k(X, P) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} z_1 - \text{мінімізація втрат води} \\ z_2 - \text{мінімізація енергоспоживання} \\ z_3 - \text{максимізація надійності (кількість відмов)} \\ z_4 - \text{мінімізація витрат на обслуговування} \\ z_5 - \text{мінімізація ризику надзвичайних ситуацій} \end{cases} \quad (2)$$

Вплив параметрів на цілі характеризується матрицею:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial z_1}{\partial p_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial z_k}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial z_k}{\partial p_m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ця матриця показує, як зміна кожного параметра (наприклад, зношення труб, вартість енергії) впливає на кожну цільову функцію.

Система обмежень C характеризується формулою:

$$C(X, P) = \begin{cases} g_1(X, P) \leq B_{\text{budget}} & (\text{бюджетне обмеження}) \\ g_2(X) \leq T_{\text{time}} & (\text{терміни виконання}) \\ g_3(X, P) \in \text{нормативне поле (ДБН, ISO)} \end{cases} \quad (4)$$

Агрегована функція корисності (зважене середнє) характеризується формулою:

$$R(S) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot z_i(X, P) \quad (5)$$

де w_i - вагові коефіцієнти цілей (визначаються методом експертного опитування, аналітичної ієрархії або ентропії).

Система піддається впливу ймовірних ризиків R_i , кожен з яких має ймовірність настання q_i :

$$\mathbb{E}[R(S)] = \sum_{i=1}^n q_i \cdot R_i(S) \quad (6)$$

або ж:

$$\min_X \sum_{i=1}^n q_i \cdot \text{Loss}_i(X) \quad (7)$$

де Loss_i - втрати при реалізації ризику i (наприклад, прорив труб, відмова насосної станції).

Для кращої ілюстрації взаємозв'язків між вхідними параметрами, етапами аналізу та кінцевими управлінськими рішеннями розроблено узагальнену блок - схему концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, яка приведена нижче на рис. 1.

Блок - схема включає:

- збір та попередню обробку даних про технічний стан об'єктів і зовнішні впливи;
- формування множини цілей та обмежень;
- визначення вагових коефіцієнтів методом аналізу ієрархій;
- математичну оптимізацію з урахуванням сценаріїв ризиків;
- формування переліку пріоритетних заходів;
- впровадження рішень та зворотний зв'язок у вигляді моніторингу результатів [16, 22, 23].

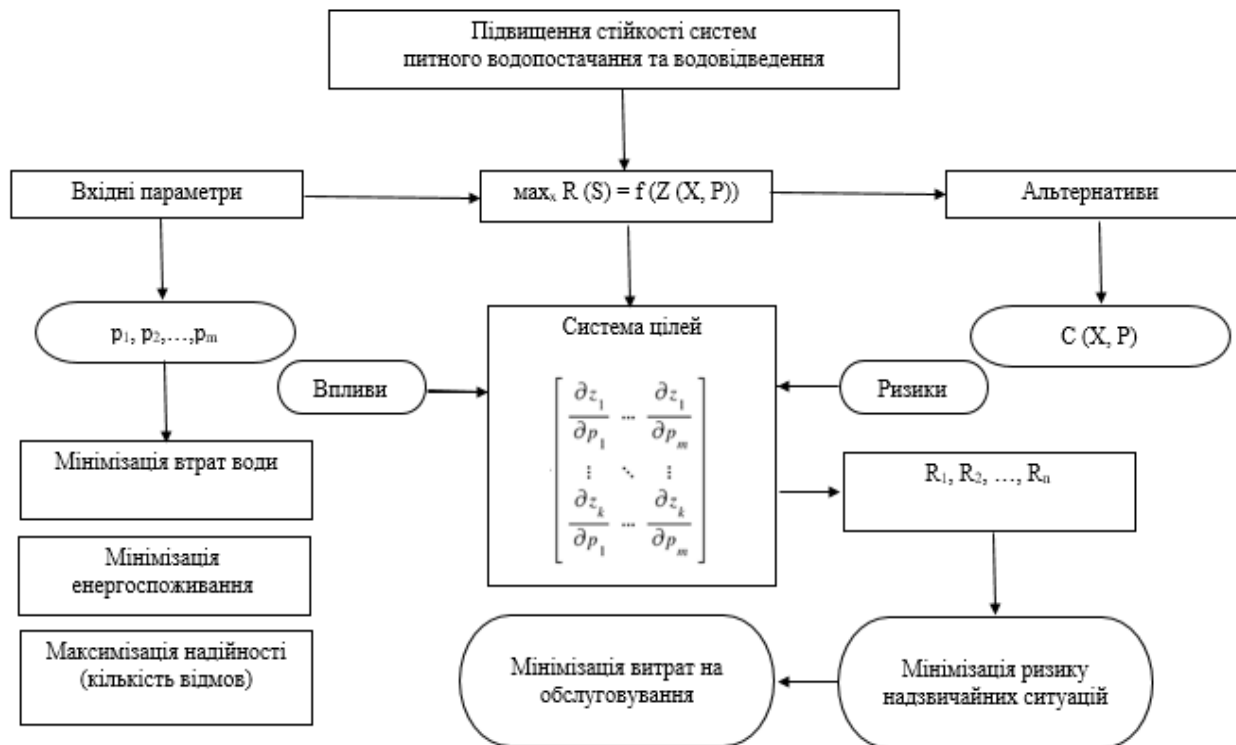


Рис 1. Блок - схема концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

В рамках сформованого логіко - математичного формулювання було застосовано математичну оптимізацію.

Так, математична модель стійкості включає множину цільових функцій $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_k\}$, таких як мінімізація втрат води, енерговитрат, експлуатаційних витрат, ризику відмов та максимізація надійності послуг. Метою є знаходження такого вектору рішень $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, при якому цільова функція $R(S)$ набуває максимального значення, яке визначено у формулі (1) за умов впливу системи обмежень $C(X, P)$ [2, 3, 7, 8, 10, 11].

Тобто, застосовано метод зваженої суми, де значущість кожної мети визначається ваговим коефіцієнтом w_i , а також введено функції втрат у разі реалізації сценаріїв ризиків (наприклад, прорив магістралі, знеструмлення насосної станції).

Метод аналізу ієрархій було використано для визначення пріоритетності цільових критеріїв, які враховуються у загальній функції корисності. Процедура включає:

- формування ієрархічної структури (мета - критерії - підкритерії - альтернативи);
- експертне попарне порівняння критеріїв за шкалою Сааті;
- розрахунок ваг w_i , які використовуються у формулі (5) для оцінки цільової функції $R(S)$ [9, 12, 15].

Таким чином, враховується як кількісна, так і якісна значущість факторів, а також відображаються особливості конкретних регіональних систем.

Ризик - орієнтовне планування дозволило перехід від реактивного управління до прогнозування загроз і превентивного моделювання сценаріїв. Кожен ідентифікований ризик R_i характеризується ймовірністю настання q_i та функцією втрат $Loss_i$. Очікуване зниження ефективності системи оцінюється через математичне сподівання, яке визначене у формулі (7) [4, 5, 14].

Системний аналіз дає змогу цілісно охопити всі підсистеми, які утворюють функціональну структуру систем питного водопостачання та водовідведення. Застосування системного підходу забезпечує:

- виявлення критичних вузлів та «вузьких місць» у мережі,
- ідентифікацію причинно - наслідкових зв'язків між технічним станом інфраструктури, фінансовими обмеженнями та якістю надання послуг,
- розроблення альтернативних сценаріїв реагування на виклики [13].

Таким чином, інтегровану модель управління можна описати через логічну схему:

1. Управлінський блок (методологія та моделювання).
2. Екологічний блок.
3. Соціальний блок.
4. Регуляторно - інституційний блок.
5. Організаційно - економічний блок.
6. Технічний блок.

Запропонований підхід, що базується на аналізі чинної нормативної бази, наукових розробках, концептуальному та математичному моделюванні, дозволяє систематизувати процес збору, обробки та інтерпретації даних.

Для систематизації впливу різних груп чинників на підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення доцільно застосовувати метод діаграми причинно - наслідкових зв'язків (діаграму Ісікави). Це дозволяє виявити ключові напрями оптимізації, спрямовані на підвищення стійкості систем, якості послуг та ефективності управління. Тобто, використання діаграми Ісікави в цьому контексті дозволяє візуалізувати вплив різних груп чинників (ресурси, персонал, технології, нормативне середовище тощо) на ефективність системи.

Нижче наведено узагальнену діаграму Ісікави, де основною проблемою виступає низький рівень стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а гілки діаграми репрезентують головні групи факторів, що на неї впливають. Тобто, накреслений взаємозв'язок стійкості систем питного водопостачання та водовідведення із заходами щодо її комплексного покращення, оптимізації [19-20].

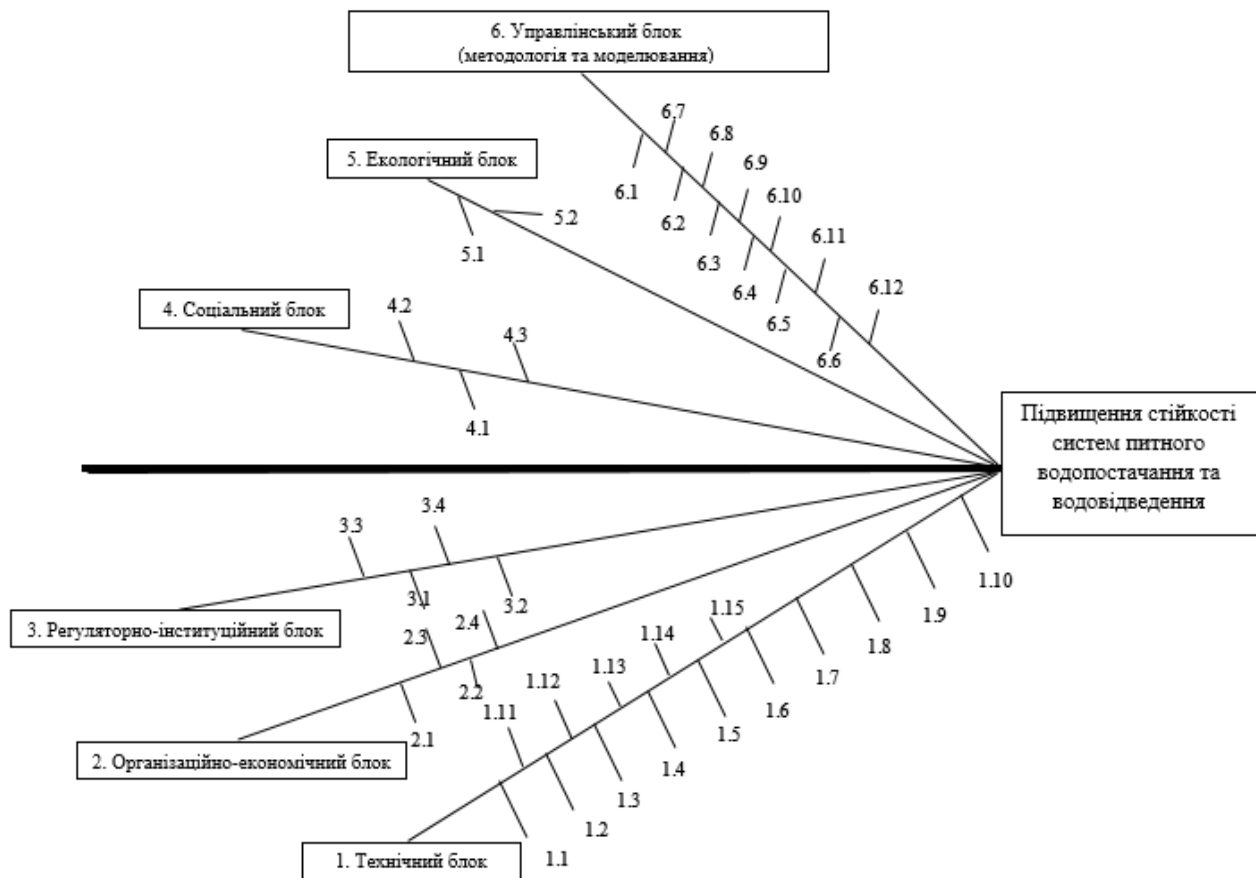


Рис 2. Взаємозв'язок стійкості систем питного водопостачання та водовідведення із заходами щодо її комплексного покращення, оптимізації,

- де 1.1 Високий рівень фізичного зносу обладнання
- 1.2 Ризики техногенного та природного характеру
- 1.3 Цілеспрямовані атаки на елементи інженерної інфраструктури
- 1.4 Мінімізація втрат води
- 1.5 Зниження енерговитрат
- 1.6 Максимізація надійності послуг
- 1.7 Втрати при реалізації ризику (наприклад, прорив труб, відмова насосної станції)
- 1.8 Прорив магістралі, знеструмлення насосної станції
- 1.9 Кількість ремонтів на 1 км (як індикатор життєвого циклу)
- 1.10 Середній вік труб (як індикатор життєвого циклу)
- 1.11 Втрати в системі (як індикатор життєвого циклу)
- 1.12 Частка резервованих джерел подачі (як індикатор життєвого циклу)
- 1.13 Впровадження резервних джерел енергії (дизель-генератори, сонячні панелі)
- 1.14 Зонування систем за рівнем вразливості
- 1.15 Впровадження автоматизованих систем моніторингу втрат води
- 2.1 Мінімізація експлуатаційних витрат
- 2.2 Фінансові обмеження
- 2.3 Тарифи
- 2.4 Інвестиції
- 3.1 Нормативне середовище
- 3.2 Нормативи
- 3.3 Повноваження
- 3.4 Контроль
- 4.1 Безперервне надання послуг населенню

- 4.2 Якість надання послуг
- 4.3 Кількість споживачів
- 5.1 Техногенні та природні ризики
- 5.2 Ризики ХБРЯ-забруднень
- 6.1 Багатокритеріальна модель оцінювання та оптимізації стійкості
- 6.2 Метод аналізу ієрархій
- 6.3 Ризик-орієнтоване планування
- 6.4 Системний аналіз
- 6.5 Логіко - математичне моделювання
- 6.6 Математична оптимізація
- 6.7 Формування ієрархічної структури (мета - критерії - підкритерії - альтернативи)
- 6.8 Експертне попарне порівняння критеріїв за шкалою Сааті
- 6.9 Розрахунок ваг w_i
- 6.10 Прогнозування загроз та превентивне моделювання сценаріїв
- 6.11 Сценарне планування на випадок повторних атак
- 6.12 Інтегрована система пріоритизації інвестицій

Зробимо прикладну реалізацію моделі в умовах України. Для переведення запропонованої моделі в площину практичної реалізації доцільно розглянути приклади на рівні державного, регіонального та муніципального управління. У межах України впровадження концептуальної моделі забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення може базуватись на існуючих викликах і потребах регіонів.

На національному рівні прикладом застосування моделі може стати Державна цільова програма модернізації об'єктів централізованого водопостачання та водовідведення в умовах війни. В рамках цієї програми необхідна розробка і подальше впровадження схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів країни. Наприклад, для зменшення залежності від електропостачання вразливих насосних станцій пропонується впровадження резервних джерел енергії (дизель - генератори, сонячні панелі). В моделі це відображається як управлінське рішення x_1 , яке зменшує ризик відключення ($Loss_1$) і підвищує цільову функцію $R(S)$ через зростання надійності.

На регіональному рівні після масштабних руйнувань у 2022 - 2024 роках прикладом може бути регіональна стратегія області, яка адаптована під ризик - орієнтовану модель. В рамках цієї стратегії необхідна розробка і подальше впровадження схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів області. Для впровадження необхідно:

- зонування систем питного водопостачання та водовідведення за рівнем вразливості,
- впровадження автоматизованих систем моніторингу втрат води,
- реалізація сценарного планування на випадок повторних атак.

На муніципальному рівні прикладом може бути розробка та впровадження схем оптимізації централізованих систем водопостачання та водовідведення населеного пункту. В рамках цих схем буде заплановано і, в подальшому, реалізовано впровадження в місті інтегрованої системи пріоритизації інвестицій, яка базується на методі аналізу ієрархій. Для оцінки доцільності модернізації окремих ділянок мереж застосовується експертне опитування за критеріями: ризик прориву, енергоспоживання, кількість споживачів. Розраховані вагові коефіцієнти дозволяють обґрунтувати черговість реконструкції об'єктів - насосної станції, ділянки магістрального водогону тощо.

Прикладом агрегованої оцінки стійкості ($R(S)$) може бути практичний розрахунок інтегральної стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в місті, де можуть бути використані такі вагові коефіцієнти:

- $w_1 = 0,3$ (мінімізація втрат води),
- $w_2 = 0,25$ (зниження енерговитрат),
- $w_3 = 0,2$ (надійність послуг),
- $w_4 = 0,15$ (мінімізація експлуатаційних витрат),
- $w_5 = 0,1$ (ризик надзвичайних ситуацій).

Після оптимізації вектору рішень X система досягає збільшення показника $R(S)$ з 0,61 до 0,79, що відповідає значному підвищенню функціональної стійкості.

Під час формування індикаторів за життєвим циклом у місті в межах схеми оптимізації систем централізованого водопостачання можуть бути впроваджені показники для всіх стадій життєвого циклу водопровідних мереж: кількість ремонтів на 1 км, середній вік труб, втрати в системі, частка резервованих джерел подачі. Це дозволяє формалізувати цілі технічного блоку та вбудувати їх у інтегровану модель оцінки стійкості.

Зробимо приклад практичного наповнення схеми оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення, який буде побудований на вищеписаних концептуальних та математичних моделях, що трансформуються в конкретні заходи, спрямовані на підвищення стійкості інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій та у воєнний час.

На основі ризик - орієнтованого планування проведемо аналіз потенційних подій, які можуть призвести до часткового або повного припинення надання послуг.

Визначимо основні фактори та відповідні негативні сценарії:

1. Зупинка централізованого водопостачання та/або водовідведення:

1.1 Часткове або повне руйнування об'єктів систем (водозаборів, очисних споруд, насосних станцій, магістральних трубопроводів).

1.2 Часткове або повне знеструмлення об'єктів, що унеможливилює роботу насосного обладнання та очисних систем.

1.3 Блокування доступу персоналу до ключових об'єктів для проведення ремонту та обслуговування.

1.4 Відсутність достатньої кількості води у джерелі водопостачання внаслідок природних або техногенних причин.

2. Неможливість забезпечення гарантованої якості питної води:

2.1 Погіршення якості води у джерелі через антропогенні, техногенні чи кліматичні фактори.

2.2 Хімічне, біологічне, радіаційне або ядерне забруднення джерела водопостачання або безпосередньо в системі.

2.3 Недоступність основного джерела водопостачання, що вимагає переходу на резервне.

Нижче у таблиці 1 для кожного ідентифікованого ризику розробимо детальний план дій, що буде практичним втіленням моделі управління. План включає заходи реагування, порядок інформування та альтернативні рішення.

Таблиця 1

Орієнтовний план дій підприємства питного водопостачання та водовідведення під час виникнення надзвичайних ситуацій та/або у воєнний час

Можливий негативний сценарій	Заходи реагування та попередження	Особи, яких необхідно повідомити, та метод оповіщення	Альтернативний/резервний спосіб забезпечення послуг
1	2	3	4
Сценарій 1: Руйнування або знеструмлення насосної станції першого підйому	1. Негайна активація плану дій у надзвичайних ситуаціях. 2. Оцінка масштабів пошкодження та можливості відновлення. 3. Впровадження резервних джерел енергії (дизель - генератори, сонячні панелі) для живлення критично важливого обладнання.	<i>Кого повідомити:</i> • Керівник підприємства питного водопостачання та водовідведення. • Місцеві органи влади (військова адміністрація). • Територіальний підрозділ ДСНС. • Місцевий відділ охорони здоров'я. <i>Метод оповіщення:</i> • Через офіційні канали місцевої влади (сайт, соцмережі). • SMS-інформування, радіо, телебачення. • Залучення голів ОСББ/квартальних для адресного інформування.	1. Організація підвозу питної води водовозами до визначених пунктів роздачі. 2. Використання резервних/альтернативних джерел водопостачання (свердловини, бювети) за умови підтвердження безпечності води. 3. Створення складу пакетованої/бутильної води для вразливих груп населення.

1	2	3	4
<u>Сценарій 2:</u> Хімічне, біологічне, радіаційне або ядерне забруднення джерела питного водопостачання	1. Негайне припинення забору води із забрудненого джерела. 2. Терміновий відбір проб води для лабораторного аналізу у співпраці з органами нагляду. 3. Посилення режиму знезараження на водоочисних спорудах (якщо це технічно можливо і доцільно). 4. Проведення моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в мережі.	<i>Кого повідомити:</i> - Негайно: органи нагляду, ДСНС, місцеві органи влади. <i>Метод оповіщення:</i> - Сигнали цивільного захисту. - Термінове інформування населення усіма доступними каналами про категоричну заборону використання води з-під крана для пиття та приготування їжі. - Надання чітких інструкцій щодо подальших дій.	1. Перехід на резервне (дублююче) джерело водопостачання, якщо таке передбачено схемою оптимізації. 2. Організація централізованого забезпечення населення питною водою гарантованої якості (бутильованою, привізною). 3. Розгортання мобільних установок для очищення води у визначених безпечних місцях.
<u>Сценарій 3:</u> Масштабний прорив магістрального водогону або каналізаційного колектора	1. Локалізація аварійної ділянки шляхом перекриття засувок. 2. Оцінка часу, необхідного на проведення ремонтних робіт. 3. Проведення дезінфекції ділянки мережі після завершення ремонту. 4. Для каналізаційних мереж: вжиття заходів для мінімізації екологічної шкоди від витоку стічних вод.	<i>Кого повідомити:</i> - Аварійно-диспетчерська служба підприємства. - Споживачі, які потрапили у зону відключення. - У разі витоку стічних вод - екологічна інспекція. <i>Метод оповіщення:</i> - Інформування про тимчасове припинення надання послуг та орієнтовні терміни відновлення.	1. Забезпечення тимчасового водопостачання за рахунок переключення на інші ділянки мережі (якщо дозволяє гідравлічна модель). 2. Організація тимчасового підвозу води для споживачів, що залишилися без водопостачання. 3. Для водовідведення: використання мобільних насосних станцій для перекачування стоків в обхід аварійної ділянки.

Представлений у таблиці 1 приклад демонструє, як загальна концептуальна модель підвищення стійкості, що базується на системному аналізі, ризик - орієнтованому плануванні та математичній оптимізації, може бути декомпозована до рівня конкретних, практичних та документованих планів дій. Така деталізація в межах схем оптимізації є обов'язковою умовою для переходу

від теоретичних розробок до реального підвищення безпеки та стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, особливо в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій.

Висновки. Таким чином, у статті було досліджено та успішно вирішено завдання розробки концептуальної багатокритеріальної моделі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, що є критично важливим в умовах зростаючих техногенних, екологічних та військових загроз для інфраструктури України.

Створено комплексний інструмент управління. Розроблена модель є не просто теоретичною конструкцією, а цілісною методологічною основою для прийняття управлінських рішень на державному, регіональному та муніципальному рівнях. Її сила полягає в інтеграції системного аналізу, логіко - математичного моделювання, ризик - орієнтованого планування та методу аналізу ієрархій, що дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні фактори впливу.

Формалізовано поняття стійкості. Ключовим результатом є формалізація стійкості через систему цільових функцій, обмежень та сценаріїв втрат. Введення інтегрального показника стійкості $R(S)$ та його максимізація за допомогою зважених коефіцієнтів дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність управлінських рішень. Практичний приклад показав можливість значного підвищення функціональної стійкості.

Доведено практичну цінність моделі. Модель трансформує стратегічні цілі у конкретні, документовані плани дій для реагування на надзвичайні ситуації та/або у воєнний час. Наведені у статті сценарії (руйнування насосної станції, хімічне забруднення, прорив магістралі) та відповідні заходи є прямим практичним втіленням моделі, готовим для імплементації у схеми оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів.

Як результат, запропонований підхід дозволяє перейти від реактивного реагування на кризи до проактивного, науково обґрунтованого управління ризиками. Адаптація схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів згідно з представленою моделлю є дієвим інструментом для забезпечення безперебійності надання відповідних послуг, ефективного розподілу інвестицій та збереження життєво необхідної інфраструктури, що є пріоритетом у періоди війни та надзвичайного стану. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію моделі з автоматизованими системами моніторингу для динамічної оцінки стійкості в режимі реального часу.

Список літератури

1. Ait-Kadi M. Water for development and development for water: realizing the sustainable development goals (SDGs) vision. *Aquatic Procedia*. 2016. Vol. 6. P. 106–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2016.06.013>
2. Балтовський О. О., Форос Г. В., Сіфоров О. І. Основи математичного моделювання / за заг. ред. д.т.н., доц. О. А. Балтовського. Одеса: Одеський державний університет внутрішніх справ, 2023. 125 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058302.pdf>
3. Гусев А. В., Гусев С. В. Математичне моделювання в техніці. Київ: Юрайт, 2023. 352 с.
4. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). Чинний від 01.01.2019. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 (дата звернення: 08.08.2025).
5. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). Чинний від 01.07.2014. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2013. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723 (дата звернення: 08.08.2025).
6. Plakas K. V., Georgiadis A. A., Karabelas A. J. Sustainability assessment of tertiary wastewater treatment technologies: a multi-criteria analysis. *Water Science & Technology*. 2016. Vol.73, No.7. P.1532–1540. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.630>
7. Лебедев О. М. Моделювання у науково-технічних дослідженнях. Київ: Вища школа, 2019. 224 с.
8. Молодід О. К. Математичні методи оптимізації: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 204 с.
9. Метод аналізу ієрархій // Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_аналізу_ієрархій (дата звернення: 08.08.2025).
10. Гайна Г. А. Методи оптимізації: алгоритми, приклади, задачі: навч. посіб. для студ. усіх спец. напряму підгот. «Комп'ютерні науки». Київ: КНУБА, 2005. 144 с.
11. Ногін В. Ю., Протодьяконів І. О., Євlampієв І. І. Основи теорії оптимізації. Київ: Вища школа, 2018. 384 с.
12. Shin S., Lee S., Judi D. R., Parvania M., Goharian E., McPherson T., Burian S. J. A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems // *Water*. 2018. Vol. 10, no. 2. Art. 164. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020164>
13. Катренко А. В. Системний аналіз: підручник. Львів: Новий Світ - 2000,

2011. 396 с.

14. Dweedar S. K., Mobasher A., Al-Ashry O., Hamed M. Framework for integrated sustainability, reliability and resilience risk assessment in water supply systems // *Journal of Engineering Research*. 2023. Vol. 7, no. 2. Art. 42. P. 153–160. URL: <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/erjeng/vol7/iss2/42>
15. Ткачова О. К. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень // *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2015. № 4 (85). С. 92–96. URL: http://www.econom.stateandregions.zp.ua/journal/2015/4_2015/17.pdf
16. Franco L. A., Montibeller G. Problem structuring for multicriteria decision analysis interventions // *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0683>
17. Ismail S., Dawoud D. W., Ismail N., Marsh R., Alshami A. S. IoT-based water management systems: Survey and future research direction // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 35942–35952. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3163742>
18. Loucks D. P., van Beek E. Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Cham: Springer, 2017. 624 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
19. Makropoulos C., Butler D. Framework for the assessment of resilience in urban water systems: report. Report No. 06/RG/05/1. London: UK Water Industry Research, 2006.
20. Rousso B. Z., Lambert M., Gong J. Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 410. Art. 137193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193>

References

1. Ait-Kadi, M. (2016). Water for development and development for water: Realizing the sustainable development goals (SDGs) vision. *Aquatic Procedia*, 6, 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2016.06.013> (in English).
2. Baltovskiy, O. O., Foros, H. V., & Siforov, O. I. (2023). Fundamentals of mathematical modeling (edited by O. A. Baltovskiy) [Textbook]. Odesa State University of Internal Affairs. <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058302.pdf> (in Ukrainian).
3. Husev, A. V., & Husev, S. V. (2023). Mathematical modeling in engineering. Yurait. (in Ukrainian).
4. State Enterprise “Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality”. (2018). Risk management — Principles and guidelines (DSTU ISO 31000:2018, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 (in Ukrainian).
5. State Enterprise “Ukrainian Research and Training Center for Standardization,

Certification and Quality”. (2013). Risk management — Risk assessment techniques (DSTU IEC/ISO 31010:2013, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723 (in Ukrainian).

6. Plakas, K. V., Georgiadis, A. A., & Karabelas, A. J. (2016). Sustainability assessment of tertiary wastewater treatment technologies: A multi-criteria analysis. *Water Science & Technology*, 73(7), 1532–1540. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.630> (in English).

7. Lebediev, O. M. (2019). Modeling in scientific and technical research. *Vyshcha Shkola*. (in Ukrainian).

8. Molodid, O. K. (2012). Mathematical methods of optimization (Textbook). National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. (in Ukrainian).

9. Wikipedia. (2025, August 2). Analytic hierarchy process. In Wikipedia. https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_аналізу_ієрархій (in Ukrainian).

10. Haina, H. A. (2005). Optimization methods: Algorithms, examples, problems. Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture. (in Ukrainian).

11. Nogin, V. Y., Protodiakonov, I. O., & Yevlampiev, I. I. (2018). Fundamentals of optimization theory. Kyiv: Vyshcha Shkola. (in Ukrainian).

12. Shin, S., Lee, S., Judi, D. R., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., & Burian, S. J. (2018). A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. *Water*, 10(2), 164. <https://doi.org/10.3390/w10020164>

13. Katrenko, A. V. (2011). System analysis [Textbook]. Lviv: Novyi Svit–2000. (in Ukrainian).

14. Dweedar, S. K., Mobasher, A., Al-Ashry, O., & Hamed, M. (2023). Framework for integrated sustainability, reliability and resilience risk assessment in water supply systems. *Journal of Engineering Research*, 7(2), Article 42, 153–160. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/erjeng/vol7/iss2/42> (in English).

15. Tkachova, O. K. (2015). The Saaty method in managerial decision-making. *State and Regions. Series: Economics and Entrepreneurship*, (4), 92–96. http://www.econom.stateandregions.zp.ua/journal/2015/4_2015/17.pdf (in Ukrainian).

16. Franco, L. A., & Montibeller, G. (2011). Problem structuring for multicriteria decision analysis interventions. In *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0683> (in English).

17. Ismail, S., Dawoud, D. W., Ismail, N., Marsh, R., & Alshami, A. S. (2022). IoT-based water management systems: Survey and future research direction. *IEEE Access*, 10, 35942–35952. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3163742> (in English).

18. Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1> (in English).
19. Makropoulos, C., & Butler, D. (2006). Framework for the assessment of resilience in urban water systems (Report No. 06/RG/05/1). UK Water Industry Research. (in English).
20. Roussio B. Z., Lambert M., Gong J. Smart water networks: A systematic review of applications using high-frequency pressure and acoustic sensors in real water distribution systems // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 410. Art. 137193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137193> (in English).

Abstract

Svitlana Potapenko, Postgraduate Student of the Department of Water Supply and Wastewater Management. Kyiv National University of Construction and Architecture

Models for solving the problem of enhancing the resilience of drinking water supply and sewerage systems

This article develops a conceptual multi-criteria model for enhancing the resilience of drinking water supply and sewerage systems, which is critically important amid the growing technogenic, environmental, social, and military threats to Ukraine's infrastructure. A comprehensive methodological framework for managerial decision-making is proposed, which considers the full life cycle of assets, the systemic impact of internal and external factors, as well as probable risks and loss scenarios. The research methodology combines systems analysis for vulnerability detection, logical-mathematical modeling for task formalization, risk-oriented planning for threat identification, and mathematical optimization for finding the best solutions. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to prioritize criteria, and the Ishikawa diagram is applied to structure cause-and-effect relationships. Resilience is formalized through an integral indicator, $R(S)$, which is maximized using an objective function that aggregates weighted criteria, such as the minimization of water losses, energy consumption, and operational costs. The established hierarchical management structure allows for the adaptation of decisions at the national, regional, and municipal levels, as demonstrated with specific examples for Ukraine. The model transforms strategic goals into practical action plans for responding to emergencies, particularly infrastructure destruction or the chemical contamination of water sources. The practical implementation of the model, validated by the calculated increase in the integral resilience indicator, serves as a scientifically-grounded basis for developing optimization schemes. The application of this approach makes it possible to reduce the vulnerability of the systems, increase the efficiency of resource utilization, and ensure the continuity of service delivery to the population.

Keywords: optimization; method; model; risks; resilience; drinking water supply and sewerage systems; management; formula.