
Холархічна модель вибору технології еколого-безпечного водовідведення

Олена Дмитрієва

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
Україна

ORCID 0000-0002-7494-0674

Наталья Цапко

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
Україна

ORCID 0000-0003-2480-3636

Людмила Мельнік

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
Україна

ORCID 0000-0001-8631-5035

Вячеслав Браткевич

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків,
Україна

ORCID 0000-0002-7217-7767

Ирина Друлева

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»,
Україна

ORCID 0000-0002-5885-4557

Анотація: Досліджено процес обґрунтування кількісної оцінки пріоритетних технологій водовідведення, що сприятиме екологічному оздоровленню водних об'єктів, зменшенню ступеня їх евтрофованості та покращення водного ресурсу держави. Предметом дослідження є холархічна модель, яка включає механізми зворотного зв'язку між критеріями оцінювання окремих технологій екологічно безпечного водовідведення. Подано огляд існуючих підходів та досліджень щодо вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення. Відзначено переваги та недоліки відомих методів, особливо підкреслено обмеження традиційних ієрархічних моделей, які не здатні враховувати зворотні зв'язки між критеріями оцінювання. Для обґрунтування вибору конкретної технології пропонувані показники, які об'єднані в наступні групи: еколого-соціально-економічні; фактори стану, які деталізують критерії безпеки в частині розвитку процесу евтрофування водного об'єкту як джерела питного водопостачання або використовується в рекреаційних цілях; техніко-економічні показники, що характеризують систему водовідведення; заходи, спрямовані на поліпшення оціночних ознак техніко-економічних показників окремих технологій систем водовідведення; необхідність дотримання умов прийняття та транспортування дощових, талих та дренажних вод у системі дощової каналізації; технологічні заходи екологічно безпечного водовідведення; перелік альтернативних варіантів рішення. У запропонованій моделі, крім ієрархічних, пропонується розглядати зворотні (холархічні) зв'язки як між критеріями всередині кластерів, так і між критеріями, розташованими на різних рівнях ієрархії. Для врахування зворотних зв'язків обрано метод системного аналізу (MAC). Практичним результатом дослідження є: побудова в інструментальному середовищі Super Design комп'ютерної холархічної моделі для

кількісної оцінки альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення; розрахунок глобальних пріоритетів альтернативних варіантів вибору екологічно безпечних технологій водовідведення; аналіз чутливості результату моделювання до можливого розкиду експертних висновків щодо попарного порівняння відповідних критеріїв.

Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання різних сценаріїв модернізації систем водовідведення, планування природоохоронних заходів та оптимізації управління водними ресурсами на місцевому і регіональному рівнях.

Ключові слова: екологічно безпечне водовідведення; багатокритеріальна оцінка; холархічна модель; метод MAC; SuperDecisions; стан водних екосистем; аналіз чутливості; технології очищення.

1. Вступ

Рациональний вибір екологічно безпечних технологій відведення та очищення стічних вод є ключовою умовою забезпечення належної якості водних ресурсів та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Застосування відповідних моделей дозволяє проводити обґрунтоване порівняння можливих технологічних рішень з урахуванням специфіки водних об'єктів, типів забруднення, вимог до якості води, технічних обмежень та економічних витрат. Використання таких моделей дає змогу мінімізувати негативні наслідки водного забруднення та сприяти сталому використанню водних ресурсів.

Україна характеризується різноманітними природними та техногенними умовами, зумовленими особливостями клімату, геологічної будови, рівнем промислового розвитку та структурою міських територій. Саме ці фактори обумовлюють необхідність адаптації технологій водовідведення до конкретних умов регіону й ускладнюють процес вибору раціонального рішення.

Для обґрунтування технологічних рішень використовуються різні методичні підходи. Зокрема, матричні методи дозволяють проводити порівняння технологій за низкою показників (ефективністю очищення, вартістю впровадження, екологічними ризиками, особливостями експлуатації). Методи математичної оптимізації забезпечують пошук найкращої комбінації технологій відповідно до заданих технічних та економічних критеріїв.

У сучасних дослідженнях значну поширеність отримали методи, засновані на багатокритеріальному аналізі, серед яких провідне місце займає метод аналізу ієрархій (MAI). Його перевагою є можливість врахування значного спектра факторів, зокрема й тих, що характерні для різних природних зон України. Водночас обмеженням MAI є неможливість коректного опису зворотних, або холархічних, зв'язків між критеріями, які відіграють суттєву роль у системах водовідведення.

З огляду на це у роботі запропоновано удосконалений підхід на основі холархічної моделі, яка ґрунтується на методі системного аналізу (MAC). Така модель дає змогу врахувати взаємний вплив критеріїв та здійснити більш повне й об'єктивне оцінювання альтернативних технологій екологічно безпечного водовідведення.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес обґрунтування кількісної оцінки альтернативних варіантів технологій екологічно безпечного водовідведення.

Предметом дослідження є холархічна модель вибору пріоритетних методів технологій екологічно безпечного водовідведення.

Гіпотеза дослідження – між критеріями/факторами, які визначають доцільність вибору конкретного варіанту технологічного процесу технологій екологічно безпечного

водовідведення стічних вод, завжди існують не тільки прямі, а й зворотні залежності. Однак у відомих ієрархічних моделях зворотні зв'язки не враховуються, що є їх істотним недоліком.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка моделі кількісної оцінки альтернативних варіантів вибору технологічних прийомів (методів) технологій екологічно безпечного водовідведення стічних вод, яка враховує зворотні зв'язки як між ієрархічними рівнями моделі, так і вузлами всередині рівнів. Такі моделі (холархічні моделі) більшою мірою відображають реальні процеси в предметній галузі.

Практичним результатом досягнення мети є:

- побудова в інструментальному середовищі Super Design комп'ютерної холархічної моделі для кількісної оцінки альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення стічних вод;
- розрахунок глобальних пріоритетів альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення стічних вод;
- аналіз чутливості результату моделювання до можливого розкиду експертних висновків щодо попарного порівняння відповідних критеріїв.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання.

Завдання 1. Розробити холархічну модель вибору технологій екологічно безпечного водовідведення. Для чого необхідно визначити:

критеріальну базу відносно оцінки та обґрунтувати альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення ;

найбільш суттєві зв'язки між критеріями з урахуванням особливостей поточної предметної галузі дослідження.

Завдання 2. В інструментальному середовищі Super Design виконати програмну реалізацію отриманої моделі та розрахувати глобальні пріоритети альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення.

Завдання 3. Дослідити чутливість моделі шляхом побудови графіків зміни пріоритетів альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення відносно можливого розкиду експертних висновків при попарному порівнянні відповідних критеріїв.

4. Аналіз літератури

Технологічні заходи екологічно безпечного водовідведення повинні відповідати вимогам екологічної безпеки, надійності функціонування та здатності мінімізувати негативний вплив антропогенних факторів на стан водних об'єктів. Розглядаєма мета полягає у зменшенні ризиків для здоров'я населення та забезпеченні стабільного екологічного стану водойм, що використовуються як джерела питного водопостачання.

У роботі [1] наведено систематизовану характеристику типових технологічних заходів екологічно безпечного водовідведення. Питання екологічних та соціальних аспектів сталого розвитку населених пунктів України висвітлено в публікації [2].

У статті [3] детально описані сучасні методи очищення стічних вод різних типів, включно з використанням інноваційних екологічно орієнтованих технологій. Аналіз стану систем водовідведення та перспектив їх розвитку з позицій екологічної безпеки наведено в роботі [4]. Інноваційні технологічні підходи до водопостачання та водовідведення, а також особливості їх упровадження в Україні, розглядаються у статті [5]. Матеріали збірника [6] узагальнюють результати досліджень щодо сучасного стану довкілля, екологічних проблем різних регіонів та можливих шляхів їх розв'язання, зокрема із застосуванням біотехнологій очищення води, ґрунту та повітря.

У наведених роботах [1]–[6] приділено значну увагу екологічним аспектам функціонування систем водовідведення та їх технічним характеристикам, проте питання вибору оптимальної технології за формалізованими критеріями розглядається фрагментарно.

Важливою складовою сучасних досліджень є використання математичних моделей для оцінювання альтернативних технологій водопостачання та водовідведення. У роботах [7]–[9] представлено приклади застосування багатокритеріального аналізу для вибору технологій очищення води. Зокрема, у дослідженні [7] запропоновано комплексну методику вибору технології водопідготовки питної води на основі багатофакторного оцінювання. У роботі [8] розроблено модель прийняття рішень, що враховує економічні, соціальні та екологічні показники для визначення оптимальної системи очищення стічних вод. Аналогічний підхід до оцінки технологій водопостачання малих населених пунктів викладено в статті [9], де також наведено перелік релевантних критеріїв.

Найбільш близькими до методології даного дослідження є роботи [10] та [11], у яких застосовано метод аналізу ієрархій (MAI) для вибору технологічних заходів водовідведення [10] та стратегічних альтернатив розвитку інформаційної інфраструктури [11]. Однак, у зазначених дослідженнях не враховуються зворотні (холархічні) зв'язки між рівнями та вузлами моделі, що обмежує можливість їх використання у складних системах, де взаємозалежність критеріїв відіграє суттєву роль.

Проведений аналіз літератури засвідчує актуальність розроблення моделі, здатної інтегрувати багатокритеріальні оцінки та зворотні зв'язки між елементами системи, що й визначило напрям поточного дослідження.

5. Методи досліджень

Для побудови моделі вибору технологій екологічно безпечного водовідведення застосовано метод системного аналізу (МАС), який є розвитком класичного підходу аналізу ієрархій.

Переваги та обмеження ієрархічних моделей.

Ієрархічні моделі широко застосовують для аналізу систем, у яких взаємозв'язки між елементами є переважно лінійними або односторонніми. Їх ключова особливість полягає у поетапному поділі складного процесу на послідовні рівні — від загальної мети до окремих показників. Така структура робить модель легкою для інтерпретації та дозволяє чітко відстежувати внесок кожного критерію.

Переваги ієрархічного підходу:

- логічно зрозуміла побудова, що спрощує роботу експертів;
- можливість детального структурування складних задач;
- ефективність у випадках, коли вплив між критеріями є чітко визначеним і має односпрямований характер;
- зручність для використання у традиційних системах підтримки прийняття рішень.

Основні обмеження:

- жорстка структура, яка не дозволяє враховувати перехресні або циклічні зв'язки між критеріями;
- втрата частини інформації про взаємний вплив факторів різних рівнів;
- неможливість моделювати ситуації, де зміни в нижніх рівнях можуть впливати на верхні (відсутність механізму зворотного зв'язку);
- недостатня адаптивність у складних динамічних системах, характерних для імергентних екологічних процесів.

МАС передбачає представлення системи у вигляді сукупності кластерів та елементів, які не тільки підпорядковуються загальній меті, але й можуть впливати один на одного незалежно від свого рівня в структурі. Завдяки цьому зникає жорстка багаторівнева ієрархія, а модель

набуває властивостей, притаманних холархічним системам: взаємодія між елементами стає більш гнучкою та багатовекторною, що дає змогу врахувати ефекти зворотного зв'язку.

Холархічний підхід ґрунтується на уявленні про те, що кожен компонент системи може функціонувати як самостійна одиниця і водночас як частина розгалуженої структури. Така модель не обмежується лише вертикальними зв'язками між рівнями, а включає горизонтальні та перехресні впливи, що дозволяє описати реальні процеси з їх складною взаємодією та внутрішньою динамікою.

Переваги та обмеження холархічних моделей.

Холархічні моделі створені для опису систем, у яких існують багатовекторні, часто нелінійні зв'язки між елементами. У такому підході кожен елемент може одночасно впливати на інші та самостійно реагувати на зворотні зв'язки. Це робить холархічні моделі близькими до реальних природних та соціально-технічних систем.

Переваги холархічного підходу:

- можливість урахування взаємного та багаторівневого впливу критеріїв;
- здатність відображати циклічні, нелінійні та багатовекторні залежності;
- підвищена гнучкість моделі при зміні умов або коригуванні вхідних даних;
- адекватне представлення поведінки складних систем, де зворотні зв'язки відіграють ключову роль (наприклад, у процесах екологічного моніторингу та прийняття управлінських рішень).

Основні обмеження:

- зростання обчислювальної складності при збільшенні кількості критеріїв;
- складність побудови та вимоги до обґрунтованості експертних оцінок;
- потреба в більшій кількості даних для формування достовірної структури зв'язків;
- складніше інтерпретувати моделі без спеціалізованих програмних засобів.

Отже, ієрархічні моделі забезпечують простоту, але можуть бути недостатньо інформативними у складних екологічних системах. Холархічні моделі, навпаки, дають можливість глибше відобразити структуру взаємодій, проте вимагають більше ресурсів та експертної уваги.

Для автоматизації моделювання використано спеціалізоване середовище SuperDecisions, яке підтримує побудову моделей на основі аналітичних мереж та холархічних структур.

Програмне забезпечення дає можливість:

- задавати структуру моделі у вигляді кластерів та елементів;
- визначати напрямки впливів і зворотних зв'язків між критеріями;
- формувати матриці парних порівнянь для кожного елемента;
- автоматично обчислювати локальні та глобальні пріоритети;
- проводити аналіз чутливості моделі шляхом варіювання значень окремих критеріїв.

SuperDecisions виконує нормалізацію матриць, обчислення власних векторів, перевірку узгодженості експертних оцінок та формує повну таблицю глобальних пріоритетів альтернатив. Особливо цінною є можливість досліджувати поведінку моделі у разі зміни певних параметрів, що дозволяє оцінити стійкість рішення та вплив експертної похибки.

Використання MAC і SuperDecisions є доцільним для задач екологічної безпеки, оскільки класичні ієрархічні моделі не враховують складних перехресних залежностей між:

- чинниками антропогенного навантаження;
- технічними характеристиками систем водовідведення;
- економічними та соціальними показниками;
- елементами інфраструктури, здатними впливати один на одного.

У випадку водних екосистем такі взаємодії є визначальними, тому холархічний підхід дозволяє побудувати більш реалістичну модель прийняття рішень. Таким чином, MAC у поєднанні з SuperDecisions забезпечує достатню гнучкість і точність для формування комплексної оцінки альтернативних технологій.

6. Результати досліджень

6.1. Формування критеріальної бази для обґрунтування вибору технологій екологічно безпечного водовідведення.

Для побудови холархічної моделі необхідно визначити систему критеріїв, які найбільш повно описують чинники, що впливають на вибір технологій екологічно безпечного водовідведення. Аналіз наукових джерел та практичних підходів показав, що оцінювання таких технологій доцільно здійснювати на основі кількох груп (кластерів) параметрів, які охоплюють екологічні, соціальні, економічні та технічні аспекти функціонування систем водовідведення.

Кластер 1. Еколого-соціально-економічні показники (К).

Ця група параметрів відображає вплив технології на загальний стан водного середовища, рівень комфорту населення та можливі економічні наслідки. Зокрема враховуються:

К-1. Стан поверхневих вод; Екологічна складова.

К-2. Умови життєдіяльності населення; Соціальна складова.

К-3. Економічні наслідки зміни якості води у водному об'єкті – джерелі водопостачання НП.

Такі критерії визначають стратегічний рівень оцінювання, оскільки вони формують загальне уявлення про екологічну та соціальну доцільність впровадження конкретної технології.

Кластер 2. Фактори, що характеризують стан водних об'єктів (ФС).

Ця група критеріїв деталізує процеси, пов'язані з розвитком евтрофування, а також відображає потенційні наслідки використання водних ресурсів у рекреаційних або питних цілях. До ключових аспектів належать:

ФС-1. Стадії процесів евтрофування водних об'єктів.

ФС-2. Небезпека для стану здоров'я при питному та рекреаційному водокористуванні з ЕВО.

ФС-3. Обґрунтованість фінансування для впровадження екологічно безпечного водокористування.

Ці параметри дають змогу прив'язати технічні рішення до реального стану водних об'єктів.

Кластер 3. Техніко-економічні характеристики системи водовідведення (ТЕП).

На цьому рівні оцінюються властивості самої інженерної інфраструктури, які можуть впливати на ефективність вибору технологій:

ТЕП-1. Стан систем водовідведення.

ТЕП-2. Площа водозбірної території.

ТЕП-3. Наявність вільних територій для будівництва нових очисних споруд, КНС, ємкостей.

ТЕП-4. Благоустроєність території водозбору.

Вказані фактори дають можливість зіставити можливості існуючої інфраструктури з вимогами до впровадження певних технологічних рішень.

Кластер 4. Показники, спрямовані на підвищення ефективності техніко-економічних рішень (ПСВ).

Цей кластер містить критерії, що стосуються заходів, необхідних для забезпечення стабільної роботи системи та доповнення її функціональних можливостей. До таких належать:

ПСВ-1. Необхідність дотримання умов прийняття та транспортування дощових, талих та дренажних вод у системі дощової каналізації.

ПСВ-2. Необхідність впровадження біологічної очистки поверхнев стічних та дренажних вод.

ПСВ-3. Необхідність забезпечення стабільної роботи комунальних біологічних очисних споруд.

Фактично цей кластер описує основні умови, що впливають на ефективність реалізації технологічних заходів.

Кластер 5. Альтернативні технологічні рішення (ТЗ).

Остання група містить безпосередні технологічні альтернативи (заходи), серед яких здійснюється вибір. До них належать:

ТЗ-1: Очищення поверхневих стічних вод (ПСВ) на біоінженерних спорудах (БІС).

ТЗ-2: Очищення ПСВ на комунальних спорудах біологічної очистки стічних вод (БОС).

ТЗ-3: Будівництво двох акумулюючих ємкостей на БОС для регулювання ПСВ і перехоплення залпових скидів стічних вод.

ТЗ-4: Очищення ПСВ з окремих територій, що мають самостійний випуск у ВО на локальних очисних спорудах; ТЗ-5: застосування дощоприймачів з приямком для осаду.

ТЗ-5: Локальна очистка ПСВ з території автостоянок, заправних станцій, торгових центрів з подальшим скидом в зливову каналізацію НП.

ТЗ-6. Організаційно-технічні заходи щодо скорочення кількості винесених домішок поверхневим стоком або поліпшення санітарного стану водозбірних територій.

ТЗ-7: Збільшення площ каналізування територій НП.

Ці альтернативи формують набір практично здійснених рішень, пріоритетність яких визначається моделлю.

Зв'язки між критеріями.

Для опису структури моделі вибору технологій екологічно безпечного водовідведення важливо не лише визначити склад критеріїв, а й встановити характер взаємозв'язків між ними. У цьому дослідженні застосовано підхід, який поєднує елементи ієрархічної організації та холярхічної взаємодії, що є необхідним для відтворення реальної багатофакторної природи екологічних систем.

У таких випадках ієрархія дозволяє зберегти логічну структурованість, відокремити стратегічні пріоритети від операційних та уникнути надмірної складності у тих фрагментах моделі, де взаємодія критеріїв є однозначною.

Між критеріями кластера 1 (К-1, К-2, К-3), які розташовані на верхньому рівні ієрархії, та критеріями другого рівня ієрархії кластера 2 (ФС-1, ФС-2, ФС-3) у предметній області спостерігаються такі зв'язки:

К-1 → ФС-1;

К-1 → ФС-2;

К-1 → ФС-3.

Наведений вище запис означає, що критерій К-1 (Стан поверхневих вод; Екологічна складова) залежить від:

ступень процесів евтрофування водних об'єктів (ФС-1);

ступень небезпеки для стану здоров'я при питному та рекреаційному водокористуванні (ФС-2);

обґрунтованість фінансування для впровадження екологічно безпечного водокористування (ФС-3).

Або стисло: К-1 → (ФС-1, ФС-2, ФС-3). Іншими словами, критерії ФС-1, ФС-2, ФС-3 впливають на критерій К-1.

Наступні рівні (кластери) ієрархії можуть бути представлені подібним чином.

Кластер 2.

ФС-1 → (ТЕП-1, ТЕП-2, ТЕП-3, ТЕП-4);

ФС-2 → (ТЕП-1, ТЕП-2, ТЕП-3, ТЕП-4);

ФС-3 → (ТЕП-1, ТЕП-2, ТЕП-3, ТЕП-4).

Кластер 3.

ТЕП-1 → (ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3);

ТЕП-2 → (ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3);

ТЕП - 3 → (ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3);

ТЕП- 4 → (ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3).

Кластер 4.

ПСВ-1 → (ТЗ-5, ТЗ-6, ТЗ-7);

ПСВ-2 → (ТЗ-1, ТЗ-4, ТЗ-5, ТЗ-6, ТЗ-7,);

ПСВ-3 → (ТЗ-2, ТЗ-3, ТЗ-7).

У запропонованій моделі, крім ієрархічних, пропонується розглядати зворотні (холархічні) зв'язки як між критеріями всередині кластерів, так і між критеріями, розташованими на різних рівнях ієрархії.

Холархічні зв'язки використовуються там, де системні взаємодії є двосторонніми, циклічними або не можуть бути відображені лінійним підпорядкуванням. Такі зв'язки є характерними для екологічних систем, у яких зміна одного параметра може впливати як на пов'язані з ним критерії, так і на фактори вищих рівнів.

У моделі холархічні зв'язки відображають:

- взаємний вплив екологічних критеріїв на технічні характеристики (наприклад, стан водних об'єктів визначає технічні вимоги до очищення, але й вибір технології впливає на якість води);

- зворотні зв'язки між соціальними та економічними параметрами (підвищення рекреаційної цінності території може збільшити потребу в інвестиціях, тоді як фінансові обмеження впливають на можливість реалізації відповідних екологічних заходів);

- взаємозв'язки між елементами кластеру техніко-економічних характеристик та кластером організаційно-технічних рішень (погіршення стану інфраструктури підвищує потребу у додаткових заходах, а правильний вибір заходів може компенсувати технічні обмеження системи).

Холархічна структура дозволяє моделі реагувати на зміни будь-якого елемента не лише локально, а й у ширшому контексті.

Всередині кластерів співвідношення критеріїв визначається наступним чином.

Кластер 1.

К-3 → (К-1, К-2);

К-2 → К-1.

Кластер 2.

ФС-3 → ФС-1;

ФС-2 → ФС-1.

Кластер 3.

ТЕП-1 → (ТЕП-2; ТЕП-3, ТЕП-4).

Також проаналізовано зв'язки між критеріями різних кластерів.

ТЕП-4 (кластер 3) → К-3 (кластер 1);

ТЗ-1 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-2 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-3 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-4 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-5 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-6 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1;

ТЗ-7 (кластер 5) → (К-1, К-2, К-3), кластер 1.

Поєднання двох типів зв'язків у моделі дає змогу:

- врахувати стратегічну підпорядкованість критеріїв (ієрархія);
- одночасно відобразити складні перехресні взаємозалежності (холархія);
- забезпечити адекватність моделі реальним умовам функціонування систем водовідведення;

- підвищити точність оцінки альтернатив завдяки можливості врахування зворотних зв'язків.

Такий підхід є особливо важливим для екологічних систем, де відсутність циклічних взаємодій у моделі призводить до втрати частини інформації та спрощення реальної картини впливів.

6.2. Програмна реалізацію холархічної моделі в інструментальному середовищі Super Design та розрахунок глобальних пріоритетів альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення

Після формування структури моделі та визначення взаємозв'язків між її елементами наступним етапом стало заповнення матриць попарних порівнянь у середовищі SuperDecisions. Цей процес є ключовим, оскільки саме на його основі формуються локальні та глобальні пріоритети критеріїв, а також виконується узагальнена оцінка альтернативних технологічних рішень.

У SuperDecisions модель представлена у вигляді кількох кластерів (рис.1), що відповідають групам критеріїв, описаним у розділі 6.1. Кожен кластер містить вузли, які пов'язані між собою ієрархічними та зворотними зв'язками. Окремим кластером сформовано перелік альтернатив технологічного водовідведення, що є кінцевими об'єктами оцінювання.

Так, між кластерами 1–5 відповідні стрілки (див. рис.1) показують ієрархічні (зверху вниз) зв'язки, деталі яких обговорювалися в розділі 6.1. Також подібним чином реалізуються зворотні зв'язки (див. розділ 6.1), де ознаками внутрішніх зворотних зв'язків є дугоподібні стрілки над відповідними кластерами.

На практиці застосування МАС полягає у формуванні матриць парних порівнянь для кожного критерію та кожного зв'язку між елементами моделі. Експерти порівнюють вплив одного критерію на інший за шкалою відносної важливості, після чого розраховуються локальні та глобальні пріоритети. Важливою особливістю МАС є те, що підсумкові пріоритети формуються не окремо для кожного рівня, а з урахуванням усіх зворотних взаємодій, що дозволяє моделі наближатись до реальних багатофакторних екосистем.

Інформаційне наповнення моделі здійснювалася на основі демонстраційного прикладу шляхом формування групою експертів відповідних матриць парних порівнянь.

Процедура експертної оцінки на основі холархічної моделі має суттєві відмінності. Так, в ієрархічній моделі першим кроком роботи з експертом було би визначення пріоритетів К-1, К-2 і К-3.

Для заповнення відповідної матриці експерту необхідно було би послідовно надавати три питання такого типу: за шкалою Сааті [14] оцініть, який із двох порівнюваних критеріїв (наприклад, К-1 і К-2) має більший вплив на вибір пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення.

Тут важливо зазначити, що мова йде про комплексну оцінку всіх альтернативних варіантів ТЗ-1, ..., ТЗ-7, при цьому експерт повинен інтуїтивно (виходячи зі свого досвіду) виділяти ознаки, загальні для всіх варіантів технології, в залежності від двох порівнюваних критеріїв.

В разі холархічної моделі (рис. 1) наявність зворотних зв'язків між вузлами ТЗ-1, ..., ТЗ-7 кластера 5 і вузлами К-1, К-2, К-3 кластера 1 істотно спрощує роботу експерта. У цьому випадку кожен з пріоритетів вузлів К-1, К-2, К-3 формується в результаті узагальненого аналізу але дев'яти відповідних (для кожної технології) матриць. При цьому щодо кожного альтернативного варіанту Т-3_1, ..., Т-3_7 експерту ставиться питання типу: за шкалою Сааті оцініть, який із двох порівнюваних критеріїв (наприклад, К-1 і К-2) більше впливає на вибір конкретної технології екологічно безпечного водовідведення

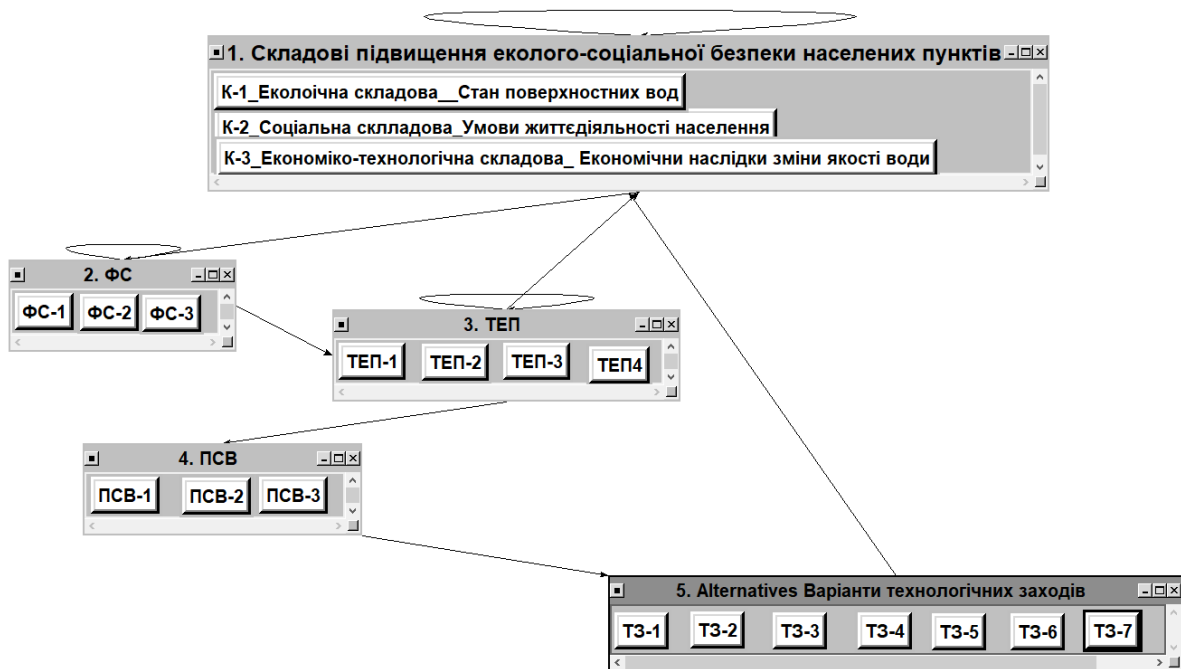


Рис.1. Реалізацію холархічної моделі вибору альтернативних варіантів вибору пріоритетних технологій екологічно безпечного водовідведення (середовище Super Design).

На рис. 2 наведено приклад матриці і відповідних локальних пріоритетів, що демонструє вплив критеріїв К-1, К-2, К-3 кластера 1 «Складові підвищення екологічної та соціальної безпеки населених пунктів» на альтернативний варіант технології ТЗ-1 (кластер 5) «Очищення поверхневих стічних вод (ПВВ) з використанням біоінженерних споруд (БІС)».

Відповідно до методу МАС [12] для формування відповідей у діапазоні 1-9 експерти використовували 5-бальну шкалу (шкала Сааті [14]) з 4 проміжними значеннями.

З рис. 2 випливає, що соціальна складова (критерій К-2) має найбільший вплив (0.49795) на технологію ТЗ-1, а найменший (0.13516) – на технологію (критерій К-3). При цьому збіг відповідей експерта (0,09040) не перевищує допустимих значень (0,1 – 0,15) [14].

1. Choose		2. Node comparisons with respect to T3_1		3. Results	
Node	Cluster	Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire
Choose Node		Comparisons wrt "T3_1" node in "1. Складові_Підвищення еколого-соціальної безпеки на К-1_Екологічна складова_Стан поверхневих вод is 1 times more important than K-2_Soцiал~"			
T3_1		Inconsistency	K-2_Соціал~	K-3_Економ~	
Cluster: 5. Alternatives~		K-1_Еколог~	← 1	← 2	
Choose Cluster		K-2_Соціал~		← 5	
1. Складові_П~					
				Normal	Hybrid
				Inconsistency: 0.09040	
				K-1_Еколог~	0.36689
				K-2_Соціал~	0.49795
				K-3_Економ~	0.13516

Рис.2. Матриця, впливу критеріїв К-1, К-2, К-3 кластера 1 на варіант альтернативної технології ТЗ-1 кластера 5 (середовище Super Design).

Як зазначалося вище, холархічні моделі також дозволяють враховувати зв'язки між вузлами окремих кластерів. У моделі, що розглядається (див. рис. 1) – це зв'язки між вузлами всередині кластерів 1, 2 і 3 (див. розділ 6.1).

В якості прикладу, на рисунку 3 наведено матрицю залежності ТЕР-1 → (ТЕР-2, ТЕР-3, ТЕР-4) та відповідні локальні пріоритети критеріїв ТЕР-2, ТЕР-3, ТЕР-4 всередині кластера 3.

1. Choose	2. Node comparisons with respect to ТЕП-1	3. Results
Node Cluster	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct	Normal Hybrid
Choose Node	Comparisons wrt "ТЕП-1" node in "3. ТЕП" cluster	Inconsistency: 0.69829
ТЕП-1	ТЕП-3 is 3 times more important than ТЕП-2	ТЕП-2 0.28943
Cluster: 3. ТЕП	Inconsistency ТЕП-3 ~ ТЕП4 ~	ТЕП-3 0.37926
Choose Cluster	ТЕП-2 ~ 3.0000 2	ТЕП4 0.33131
3. ТЕП	ТЕП-3 ~ 2	

Рис.3. Матриця залежності критерію ТЕП-1 від критеріїв ТЕП-2, ТЕП-3, ТЕП-4 всередині кластера 3. (середовище Super Design).

Водночас (див. розділ 6.1) цей самий критерій також залежить від критеріїв нижчого рівня ТЕП-1 → (ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3) кластера 4. Відповідна матриця наведена на рис. 4.

1. Choose	2. Node comparisons with respect to ТЕП-1	3. Results
Node Cluster	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct	Normal Hybrid
Choose Node	Comparisons wrt "ТЕП-1" node in "4. ПСВ" cluster	Inconsistency: 0.05156
ТЕП-1	ПСВ-2 is 4 times more important than ПСВ-1	ПСВ-1 0.10852
Cluster: 3. ТЕП	Inconsistency ПСВ-2 ~ ПСВ-3 ~	ПСВ-2 0.54693
Choose Cluster	ПСВ-1 ~ 4 4	ПСВ-3 0.34454
4. ПСВ	ПСВ-2 ~ 2	

Рис. 4. Матриця ієрархічної залежності критерію ТЕП-1 від критеріїв ПСВ-1, ПСВ-2, ПСВ-3. (середовище Super Design).

Аналогічним чином заповнюються інші відповідні матриці відносно кожного вузла моделі.

Після заповнення усіх матриць проводиться розрахунок локальних і глобальних пріоритетів на основі програмного забезпечення, вбудованого в систему Super Design [13], у ході якого враховуються всі взаємозв'язки між критеріями. Як результат -- формується глобальний вектор пріоритетів, що містить вагові коефіцієнти для кожної альтернативної технології

На рис. 5 надано нормалізовані та граничні глобальні пріоритети вузлів моделі для кластерів 1,2,3,4.

З результату моделювання випливає, що при поточної інформаційній наповненості моделі, в кластері 1 найбільшу вагу має «Економіко-технологічна складова» (критерій К-3). В кластері 2 — критерій ФС-1 «Стадії процесів евтрофування водних об'єктів». В кластері 3 — критерій ТЕП-1 «Стан систем водовідведення». В кластері 4 — критерій ПСВ-3 «Необхідність забезпечення стабільної роботи комунальних біологічних очисних споруд».

Here are the priorities.

Name		Normalized by Cluster	Limiting
К-1_Екологічна складова_Стан поверхневих вод		0.31082	0.082103
К-2_Соціальна складова_Умови життєдіяльності на~		0.28917	0.076384
К-3_Економіко-технологічна складова_Е~		0.40000	0.105659
ФС-1		0.77716	0.151417
ФС-2		0.10648	0.020745
ФС-3		0.11636	0.022671
ТЕП-1		0.43833	0.097185
ТЕП-2		0.26102	0.057872
ТЕП-3		0.17912	0.039715
ТЕП4		0.12153	0.026946
ПСВ-3		0.52171	0.083292
ПСВ-1		0.20686	0.033026
ПСВ-2		0.27142	0.043333

Рис. 5. Нормовані та граничні глобальні пріоритети вузлів моделі для кластерів 1,2,3,4 (середовище Super Design).

Кінцевий результат моделювання у вигляді глобальних пріоритетів для альтернативних технологічних заходів екологічно безпечного водовідведення надано на рис. 6.

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
ТЗ-1		0.338246	0.095224	0.01520
ТЗ-2		1.000000	0.281522	0.04494
ТЗ-3		0.302853	0.085260	0.01361
ТЗ-4		0.179098	0.050420	0.00805
ТЗ-5		0.411312	0.115793	0.01848
ТЗ-6		0.494873	0.139318	0.02224
ТЗ-7		0.825734	0.232463	0.03711

Рис. 6. Глобальні пріоритети вузлів моделі для альтернативних технологічних заходів екологічно безпечного водовідведення (середовище Super Design).

Результати моделювання показали, що найбільшу вагу має технологія ТЗ-2, яка передбачає очищення поверхневих стічних вод на комунальних біологічних очисних спорудах. Це рішення отримало найвищий глобальний пріоритет завдяки поєднанню стабільних екологічних показників та технічної надійності.

Нижчі пріоритети отримали технології, які залежать від більш мінливих природних умов або потребують суттєвих інвестицій у модернізацію інфраструктури. Це підкреслює важливість врахування технічного стану водовідвідних систем і специфіки території при виборі відповідного рішення.

Таким чином, при заданій інформаційній наповненості моделі, найбільш дотичною до застосування є технологія (ТЗ-2): «Очищення ПСВ на комунальних спорудах БОС».

6.3. Аналіз чутливості і стійкості результату моделювання до можливого діапазону розкиду відповіді експерта.

Обов'язковим атрибутом моделювання є перевірка того, наскільки змінюються пріоритети рішень, якщо експертні думки зазнають незначних змін. Тому стійкість вектору пріоритету є одним із значущих показників результату моделювання. Однак існує зворотна залежність між чутливістю і стійкістю. Висока чутливість часто означає низьку стійкість, оскільки швидкі зміни викликають нестабільність. Низька чутливість, навпаки, підвищує стабільність, але погіршує відгук на реальні сигнали. Таким чином, оптимізація моделі полягає в пошуку балансу між цими двома характеристиками.

Нижче в середовищі Super Design пропонується шаблона процедура аналізу чутливості та стійкості альтернативних рішень на прикладі одного з вузлів моделі.

На рисунку 7 наведено приклад загального результату аналізу стійкості і чутливості вектору пріоритетів прийняття технологічних заходів ТЗ-1,..., ТЗ-7 при розбігу (похибки) $\pm 50\%$ діапазону експертного висновку щодо критерія ПСВ-3.

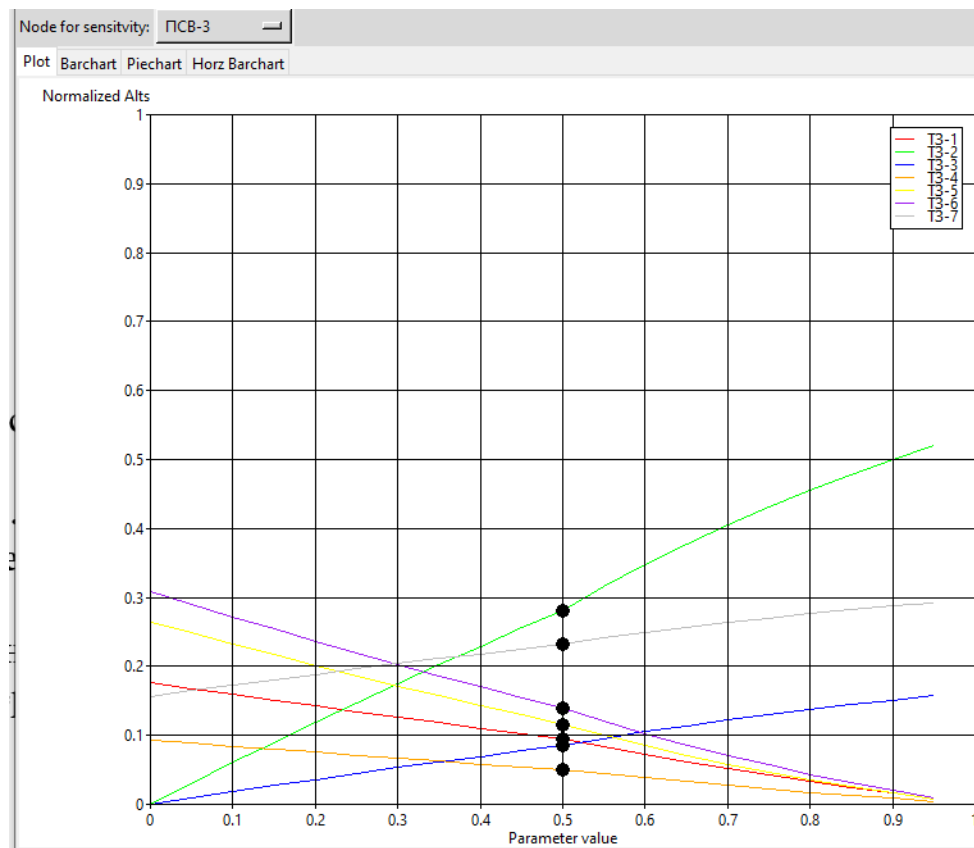


Рис.7. Результат загального аналізу стійкості і чутливості вектору пріоритетів прийняття технологічних заходів ТЗ-1,..., ТЗ-7 відносно вузла ПСВ-3 при розбігу $\pm 50\%$ експертного висновку (середовище Super Design).

Виділені точки на графіках відповідають глобальним значенням пріоритетів прийняття рішень ТЗ-1,..., ТЗ-7, а значення 0,5 на осі «Параметри» відповідає глобальному значенню (0,083292, див. рис.5) критерію ПСВ-3. З графіка випливає, що модель є високочутливою відносно критерію, що розглядається.

Ідеальною моделлю можна назвати систему, що володіє хорошою чутливістю і в той же час достатньою стійкістю в заданих межах. Розробки ідеальної моделі полягає саме в досягненні оптимального компромісу між чутливістю та стабільністю, щоб забезпечити стабільну роботу системи в реальних умовах експлуатації.

Очевидно, що діапазон неточності відповідей експерта суттєво залежатиме від його компетентності в предметній галузі. Якщо обмежити можливий діапазон відповіді значенням $\pm 10\%$, то подальший більш детальний аналіз можна надати у вигляді графіків, які наведені на рис. 8 та рис. 9.

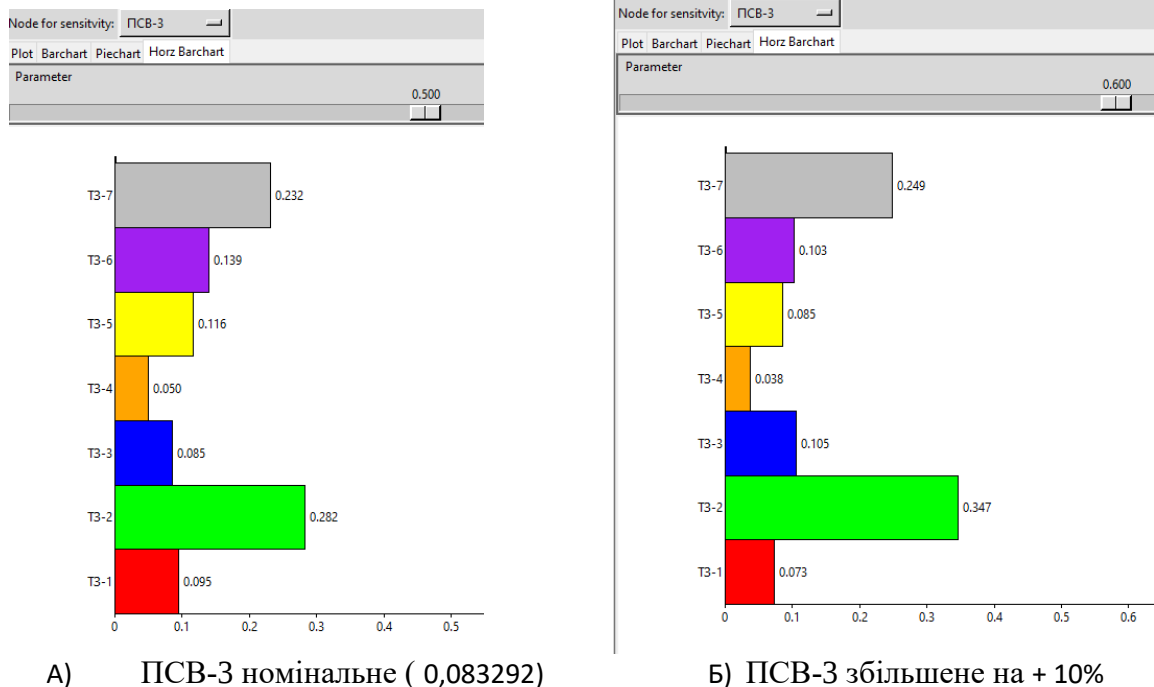


Рис.8 . Результат порівняльного аналізу стійкості і чутливості вектору пріоритетів прийняття технологічних заходів ТЗ-1,..., ТЗ-7 відносно вузла ПСВ-3 при збільшенні номінального глобального пріоритету вузла на 10% (середовище Super Design).

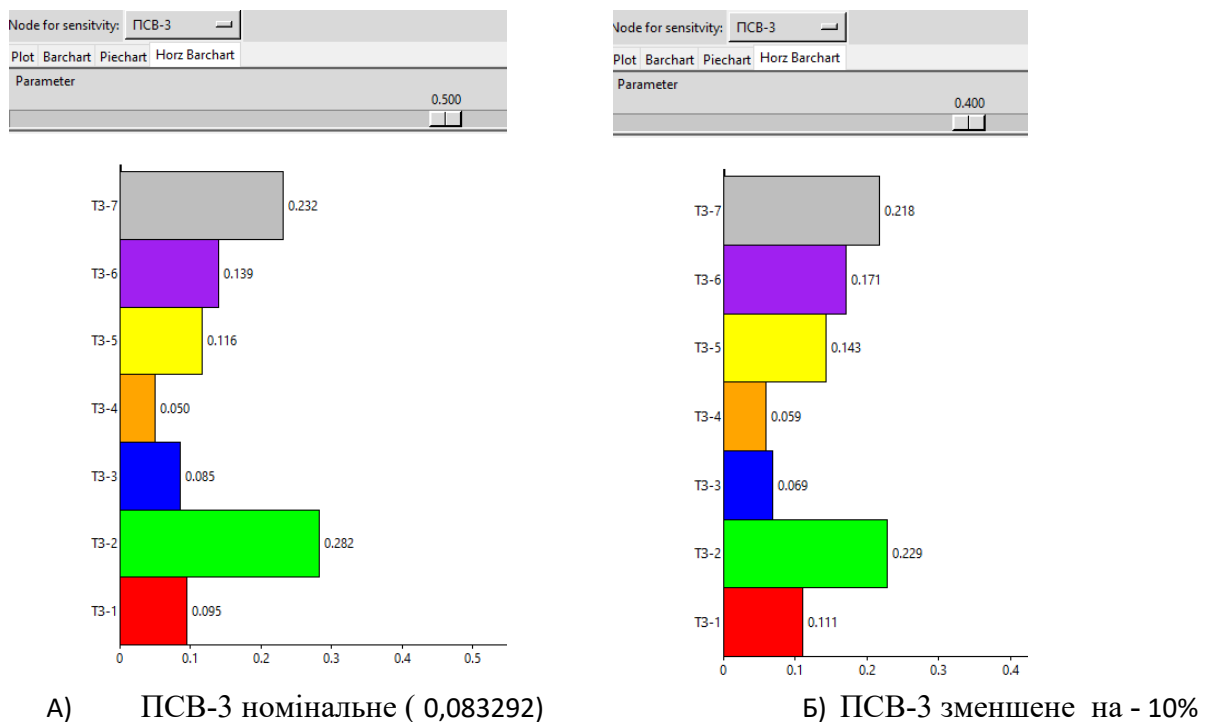


Рис. 9 . Результат порівняльного аналізу стійкості і чутливості вектору пріоритетів прийняття технологічних заходів ТЗ-1,..., ТЗ-7 відносно вузла ПСВ-3 при зменшенні номінального глобального пріоритету вузла на 10% (середовище Super Design).

На обох рисунках графіки з літерою А) однакові, вони наведенні для зручного порівняння і відповідають глобальним значенням пріоритетів прийняття рішень ТЗ-1,..., ТЗ-7 (див. рис. 6) при номінальному значенні глобального пріоритету ПСВ-3 = 0,083292 (див. рис. 5).

Літерою Б) на рис. 8 і рис.9 означено результат порівняльного аналізу стійкості і чутливості вектору пріоритетів прийняття технологічних заходів ТЗ-1,..., ТЗ-7 відносно вузла ПСВ-3, але при збільшенні номінального глобального пріоритету вузла на 10% (рис. 8) і при зменшенні номінального глобального пріоритету вузла на 10% (рис. 9).

Подальше порівняння обох графіків з літерою Б) дозволяє зробити висновок, що ранговий пріоритет розглянутих технологій порушується лише у випадку збільшення номінального глобального пріоритету вузла ПСВ-3 на 10%. При цьому змінюються ранги технології ТЗ-1, ТЗ-3, ТЗ-5 і ТЗ-6 (див. рис. 8, Б), а ранги технології ТЗ-2, ТЗ-4 і ТЗ-7 залишається постійним (таблиця 1).

З таблиці 1 витікає, що якщо похибка експертної оцінки для вузла ПСВ-3 перебуває в межах $\pm 10\%$, це не спричиняє суттєвого впливу на результат вибору технології ТЗ-2 — «Очищення поверхневих стічних вод на комунальних спорудах біологічного очищення».

Аналогічна процедура для визначення впливу можливих відхилень експертних оцінок на загальний результат ранжування альтернатив може бути застосована і до інших вузлів холархічної моделі.

Таким чином, побудована модель забезпечує можливість:

- враховувати багатовекторні взаємозв'язки між екологічними, технічними та соціально-економічними факторами;
- здійснювати комплексну оцінку альтернатив у єдиному інформаційному середовищі;
- гарантувати відтворюваність результатів завдяки автоматизованим алгоритмам розрахунку;
- проводити детальний аналіз чутливості та стійкості рішень.

Таблиця 1. Зміни пріоритетів (рангів) альтернативних технологій при розкиду $\pm 10\%$ діапазону експертного оцінювання пріоритету вузла ПСВ-3

Ранг технологій	Альтернативні технології		
	ПСВ-3 номінальне	ПСВ-3 збільшене на 10%	ПСВ-3 зменшена на 10%
1	ТЗ-2	ТЗ-2	ТЗ-2
2	ТЗ-7	ТЗ-7	ТЗ-7
3	ТЗ-6	ТЗ-3	ТЗ-6
4	ТЗ-5	ТЗ-6	ТЗ-5
5	ТЗ-1	ТЗ-5	ТЗ-1
6	ТЗ-3	ТЗ-1	ТЗ-3
7	ТЗ-4	ТЗ-4	ТЗ-4

Отже, реалізація холархічної моделі у середовищі SuperDecisions дала змогу отримати обґрунтовані результати, які можуть бути ефективно використані для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері екологічно безпечного водовідведення.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням холархічної моделі та розширенням її практичного застосування. Доцільним є включення до моделі додаткових екологічних параметрів, що характеризують довгострокові зміни у стані водних екосистем, а також розроблення сценарних моделей для оцінювання ефективності технологій у різних кліматичних і техногенних умовах. Для підвищення інформативності результату моделювання та кількісної оцінки показників, що мають нечітке уявлення, може бути запропоновано подальший розвиток існуючої методології на основі теорії нечітких множин. Це дозволить особі, яка приймає рішення, розширити варіанти прогнозованих альтернативних рішень.

8. Висновки

У ході дослідження розроблено та реалізовано багатокритеріальну модель вибору технологій екологічно безпечного водовідведення, яка ґрунтується на поєднанні принципів системного аналізу та холархічного опису взаємозв'язків між критеріями. Такий підхід дозволив сформулювати структурно гнучку модель, здатну враховувати не лише прямі залежності, але й зворотні та перехресні зв'язки між екологічними, технічними, соціальними та економічними параметрами.

На основі аналізу наукових джерел сформовано комплексну критеріальну базу, що відображає ключові аспекти впливу технологій водовідведення на стан водних екосистем і якість життєвого середовища. Включення до моделі факторів, пов'язаних із процесами евтрофування, технічним станом інфраструктури, умовами території та характеристиками поверхневого стоку, забезпечило всебічність оцінювання.

Створення моделі у середовищі SuperDecisions дало змогу реалізувати метод МАС, врахувавши всі необхідні зв'язки між елементами та обчисливши локальні й глобальні пріоритети альтернативних технологій. Результати моделювання показали, що відносно демонстраційного прикладу, найвищий глобальний пріоритет має технологія очищення поверхневих стічних вод на комунальних біологічних очисних спорудах (ТЗ-2). Її висока ефективність пояснюється оптимальним поєднанням екологічних переваг, технічної надійності та прийнятних умов впровадження.

Проведений аналіз чутливості підтвердив стійкість отриманих результатів до експертної невизначеності. Навіть за умови варіювання ваг значущих критеріїв у межах реалістичних інтервалів, ранжування ключових альтернатив практично не змінюється. Це свідчить про надійність моделі та обґрунтованість прийнятого рішення.

Список літератури:

- 1) Дмитрієва, О. О., & Хоренжая, І. В. (2013). *Екологічно безпечне водовідведення з території м. Одеса в аварійних ситуаціях* [Монографія]. Харків: Вид-во Іванченко.
- 2) Дмитрієва, О. О., Телюра, Н. О., & Василенко, В. П. (2018). Впровадження екологічно безпечного водовідведення як елемент сталого розвитку населених пунктів України. *Комунальне господарство міст*, 7(146), 174–179. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-174-179> (дата звернення: 10/01/2026)
- 3) Бояринова, К., & Бичковська, А. (2020). Проблеми та перспективи впровадження екологічних інновацій на підприємствах. *Підприємництво та інновації*, (14), 19–24. <http://ejournal.in.ua/index.php/journal/article/view/361> (дата звернення: 10/01/2026)
- 4) Телюра, Н. О., & Іващенко, Ю. І. (2023). Спосіб вибору технологічного заходу екологічно безпечного водовідведення в населених пунктах України, розташованих на евтрофованих водних об'єктах. *Екологічна та радіаційна безпека*, 1(1), 57–62.
- 5) Шаманський, С. Й., & Бойченко, С. В. (2018). *Інноваційні екологічно безпечні технології у водовідведенні* [Монографія]. Київ: Центр учбової літератури.

6) *Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування* (2020). Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна.

7) Kim, Y.-H., et al. (2018). Selection criteria for drinking water treatment technologies. *Journal of Environmental Science & Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*.

8) Tahir, F., et al. (2020). Sustainable decision-making framework for wastewater treatment plant selection. *Sustainability*.

9) Multi-criteria analysis in the selection of appropriate technologies for small-scale water supply systems. (2019). *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*.

10) Дмитрієва, О. О., Хоренжая, І. В., Василенко, В. П., та ін. (2022). Розробка методичного підходу до вибору технології фіторемедіації для очищення різних видів стічних вод. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* (Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 15–16 вересня 2022 р.). Харків: УкрНДІЕП.

11) Y. Leha & S. Liashenko (2023). *Methods and algorithms for assessing the digital infrastructure of higher education institutions*. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.090> (дата звернення: 10/01/2026)

12) Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process: Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks*. Springer.

13) SuperDecisions. (n.d.). *SuperDecisions manuals*. Retrieved January 10, 2026, from <https://www.superdecisions.com/manuals/> (дата звернення: 10/01/2026)

14) Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. RWS Publications.

15) Saaty, T. L., & Ergu, D. (2015). When is a decision-making method trustworthy? Criteria for evaluating multi-criteria decision-making methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14(6), 1171–1187. <https://doi.org/10.1142/S021962201550025X> (дата звернення: 10/01/2026)

Holarchic model of choice of environmentally safe drainage technology

Olena Dmytriieva

Research Institution “Ukrainian Research Institute of Environmental Problems”, Ukraine
ORCID: 0000-0002-7494-0674

Nataliia Tsapko

Research Institution “Ukrainian Research Institute of Environmental Problems”, Ukraine
ORCID 0000-0003-2480-3636

Liudmyla Melnik

Research Institution “Ukrainian Research Institute of Environmental Problems”, Ukraine
ORCID 0000-0001-8631-5035

Viacheslav Bratkevych

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-7217-7767

Irina Drouleva

Research Institution “Ukrainian Research Institute of Environmental Problems”, Ukraine
ORCID 0000-0002-5885-4557

Abstract: The process of justifying the quantitative assessment of priority water drainage technologies, which will contribute to the ecological improvement of water bodies, reducing the

degree of eutrophication and improving the water resources of the state, has been studied. The subject of the study is a holarchic model, which includes feedback mechanisms between the evaluation criteria of individual technologies of environmentally safe drainage. An overview of existing approaches and research on the selection of priority technologies for ecologically safe drainage is given. The advantages and disadvantages of known methods are noted, especially the limitations of traditional hierarchical models, which are unable to take into account the feedback between evaluation criteria, are emphasized. To justify the choice of a specific technology, indicators are proposed, which are combined into the following groups: ecological, social and economic; state factors that detail the safety criteria in terms of the development of the process of eutrophication of the water body as a source of drinking water supply or used for recreational purposes; technical and economic indicators characterizing the drainage system; measures aimed at improving the evaluation characteristics of technical and economic indicators of certain technologies of drainage systems; the need to comply with the conditions of acceptance and transportation of rain, melt and drainage water in the storm sewer system; technological measures of environmentally safe drainage; a list of alternative solutions. In the proposed model, in addition to hierarchical ones, it is proposed to consider inverse (holarchic) relationships both between criteria within clusters and between criteria located at different levels of the hierarchy. The method of system analysis (MAC) was chosen to take feedback into account. The practical result of the research is: construction in the Super Design tool environment of a computer holarchic model for quantitative evaluation of alternative options for choosing priority technologies for environmentally safe drainage; calculation of global priorities of alternative options for choosing environmentally safe drainage technologies; analysis of the sensitivity of the modeling result to the possible dispersion of expert opinion regarding the pairwise comparison of the relevant criteria.

The proposed approach can be used to evaluate various scenarios for the modernization of drainage systems, planning environmental protection measures, and optimizing water resources management at the local and regional levels.

Keywords: ecologically safe drainage; multi-criteria evaluation; holarchic model; MAC method; SuperDecisions; state of water ecosystems; sensitivity analysis; cleaning technologies.
