

АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ДИНАМІКОЮ ПОХИБОК І ЗАГАЛЬНИМ РІВНЕМ РИЗИКУ У ФУНКЦІОНУВАННІ СИСТЕМ ВОДООЧИЩЕННЯ

Інга Уряднікова

Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна
канд. техн. наук, uryadnikova.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3750-876X

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.50.75-82

Анотація. На сьогодні забезпечення надійної та безпечної роботи систем водоочищення, що входять до складу критичної інфраструктури, є одним із ключових завдань екологічної та техногенної безпеки. Незважаючи на досконалість сучасних технологій, жодна складна інженерна система не функціонує в умовах повної стабільності – постійна змінність параметрів вихідної води, коливання активності реагентів, інерційність процесів та інші фактори зумовлюють виникнення похибок у роботі окремих функціональних блоків. Ці похибки, навіть за умов штатної експлуатації, формують відхилення, що можуть негативно впливати на результуючу якість очищеної води. Їх накопичення або недооцінка потенційної шкоди підвищує ризики порушення санітарно-технічних норм та створює загрозу для довкілля. З метою дослідження науково-методологічного підходу до аналізу взаємозв'язку між динамікою похибок у функціонуванні систем водоочищення та формуванням загального рівня ризику, у роботі поетапно проаналізовані похибки в системах водоочищення та їх прямий зв'язок з ризиками, зв'язок з передаточними функціями та часом відновлення і розроблений математичний апарат для кількісної оцінки та управління ризиками. Аналіз отриманих результатів показав, що похибки, які виникають на кожному технологічному етапі, не є ізольованими, а підсумовуються та трансформуються по всьому ланцюгу водоочищення, що призводить до формування результуючої похибки ($\delta_{рез}$) і безпосередньо впливає на відповідність якості води нормативам. Встановлено, що ймовірність перевищення критичних показників якості води ($f(\delta_{рез} > X_{крит})$) прямо залежить від результуючої похибки ($\delta_{рез}$), яка, у свою чергу, є функцією від стандартних відхилень похибок окремих блоків (σ_n) та довірчого коефіцієнта (t). Доведено, що масштаб наслідків (C) є функціонально залежним від тривалості проблеми ($T_{проблеми}$), яка охоплює час виявлення ($T_{виявлення}$), час реагування ($T_{реагування}$) та, що особливо важливо, час відновлення ($T_{відновлення}$) функціональності системи водоочищення. Застосування передаточних функцій ($G_i(s)$) у поєднанні з перетворенням Лапласа забезпечує можливість динамічного моделювання передачі та накопичення похибок у часовій області, а також їх впливу на параметри $T_{проблеми}$. Розроблена інтегрована формула ризику надає математичний апарат для кількісної оцінки та управління ризиками, що поєднує статистичні характеристики похибок блоків та операційні параметри реагування системи на відхилення.

Ключові слова: надійність, похибки, передаточні функції, техногенні ризики, безпека, системи водоочищення.

ВСТУП

Будь-яка складна інженерна система, включно з критично важливою інфраструктурою водоочищення, функціонує в умовах неминучих відхилень від ідеальних параме-

трів. Природна інерційність робочих процесів, постійна зміна вхідних параметрів вихідної води, коливання активності реагентів та низка інших факторів неперервно генерують похибки у функціонуванні окремих блоків системи. Ці похибки, що виникають

навіть при штатній роботі системи водоочищення, є об'єктивною реальністю, яка вимагає глибокого аналізу та розуміння. Ігнорування або недооцінка їхнього впливу може призвести до значного погіршення не лише ключових показників якості очищеної води, але й до створення серйозних загроз для екологічної безпеки довкілля. Таким чином, дослідження природи, механізмів накопичення та впливу цих похибок на результуючу ефективність системи водоочищення є нагальним науковим завданням, спрямованим на підвищення надійності, стійкості та безпеки водопостачання.

Актуальність цього дослідження особливо зростає в умовах воєнних дій, що спричиняють значне техногенне навантаження на водні ресурси. Це призводить до критичного зростання складності вихідної води, яка містить не лише звичайні домішки, а й нові види забруднень (наприклад, продукти горіння, вибухові речовини, залишки металів). Така складність вимагає екстремального підвищення адаптивності та якості очищення. В умовах воєнних дій ризик похибок та аварій багаторазово збільшується, що робить повне їх усунення важкодосяжним. Тому, першочергове завдання – не лише виявлення, а й оперативна кількісна оцінка кумулятивного впливу цих складних факторів на кінцевий продукт, що життєво важливо для безпеки водопостачання в умовах підвищених загроз.

Метою дослідження є розробка науково-методологічного підходу до аналізу взаємозв'язку між динамікою похибок у функціонуванні систем водоочищення та формуванням загального рівня ризику, з метою прогнозування результуючої якості води й обґрунтування ефективних стратегій мінімізації загроз для водопостачання та екологічної безпеки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

1. Похибки в системах водоочищення та їх прямий зв'язок з ризиками

У складних технологічних системах, таких як системи водоочищення, досягнення абсолютної бездоганності функціонування є

теоретично складним завданням. Кожен окремий блок – від етапу коагуляції та флокуляції до процесів фільтрації, адсорбції та кінцевого знезараження – є джерелом певних похибок. Ці похибки не є лише незначними відхиленнями, що ізольовані в межах одного технологічного вузла. Навпаки, вони мають кумулятивний характер і в остаточному підсумку впливають на кінцеву якість очищеної води. Це створює нерозривний та прямий зв'язок між накопиченими похибками та рівнем ризику – як для кінцевих споживачів води, так і для операторів самої системи та навколишнього середовища.

В основу дослідження покладено технологічну схему електрокоагуляційної установки для пом'якшення та очищення стічних вод, яка є предметом попередніх досліджень і представлена в роботі [1].

Фундаментальне розуміння цього взаємозв'язку ґрунтується на загальноприйнятій в інженерії та управлінні безпекою концепції ризику (R) [2,3]. Ризик традиційно визначається як комбінація двох ключових параметрів: ймовірності (P) виникнення небажаної події та масштабу її наслідків (C) у разі реалізації такої події. Математично це виражається класичною формулою:

$$R = P \times C. \quad (1)$$

У контексті систем водоочищення, небажаною подією є виробництво води, якість якої не відповідає встановленим санітарно-гігієнічним нормам та стандартам безпеки. Коливання та накопичення похибок у роботі окремих блоків безпосередньо впливають на обидва компоненти цієї формули – як на ймовірність виникнення такої події, так і на потенційний масштаб її наслідків. Таким чином, аналіз природи та динаміки цих похибок стає центральним елементом стратегії управління ризиками у сфері водопостачання.

Збільшення сумарної похибки в системі водоочищення прямо підвищує ймовірність того, що якість очищеної води не відповідатиме встановленим нормативам (наприклад, перевищення допустимої концентрації домішок).

Нехай $\delta_{\text{рез}}$ – це результуюча похибка (відхилення концентрації домішок від цільового значення), що виникає в системі водоочищення. Ми знаємо, що $\delta_{\text{рез}}$ може бути розрахована за наступними формулами.

Лінійне сумування (для систематичних похибок або простого наближення):

$$\delta_{\text{рез}} = \sum_{n=1}^N \delta_n, \quad (2)$$

де δ_n – похибка n -го блоку.

Сумування для випадкових некорельованих похибок (для оцінки невизначеності):

$$\delta_{\text{рез}} = t \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2}. \quad (3)$$

Цей вираз використовується, коли похибки δ_n є випадковими та некорельованими, а σ_n представляє стандартне відхилення (або середньоквадратичне відхилення) похибки n -го блоку. Якщо похибки однакові, то $\delta_{\text{рез}} = t \cdot \sigma \cdot \sqrt{N}$. Множник t – це коефіцієнт, пов'язаний з довірчою ймовірністю (наприклад, t -розподілу Стюдента або нормального розподілу), який дозволяє оцінити максимальне можливе відхилення з певною ймовірністю.

Якщо похибки окремих блоків є випадковими та некорельованими, то стандартне відхилення результуючої похибки $\sigma_{\delta_{\text{рез}}}$ розраховується як корінь квадратний із суми квадратів стандартних відхилень похибок кожного блоку:

$$\sigma_{\delta_{\text{рез}}} = t \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2}. \quad (4)$$

А оцінка результуючої похибки $\delta_{\text{рез}}$ для заданого рівня довіри (з використанням коефіцієнта t) буде:

$$\delta_{\text{рез}} = t \cdot \sigma_{\delta_{\text{рез}}} = t \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2}, \quad (5)$$

де $\delta_{\text{рез}}$ – результуюча похибка системи; t – коефіцієнт, що залежить від обраної довірчої ймовірності та типу розподілу похибок (наприклад, t – критерій Стюдента або Z – фактор для нормального розподілу); σ_n – стандартне відхилення (середньоквадратичне відхилення) похибки, що виникає при роботі n -го блоку; N – загальна кількість блоків у системі водоочищення.

Саме ця результуюча похибка $\delta_{\text{рез}}$ є безпосереднім фактором, що визначає ймовірність (P) того, що якість очищеної води вийде за допустимі межі. Ймовірність небажаної події (P) – це ймовірність того, що значення фактичної концентрації домішок (яка відрізняється від цільового значення на $\delta_{\text{рез}}$) перевищить певний критичний поріг $X_{\text{крит}}$ (наприклад, гранично допустиму концентрацію (ГДК) для конкретної домішки). Математично це можна показати як:

$$P = f(\delta_{\text{рез}} > X_{\text{крит}}), \quad (6)$$

де f – це функція ймовірності, яка відображає, як зростає ймовірність перевищення критичного порогу зі збільшенням $\delta_{\text{рез}}$. Наприклад, якщо припустити, що результуюча концентрація домішок підпорядковується нормальному розподілу, то f буде кумулятивною функцією цього розподілу, а ймовірність зростатиме зі збільшенням $\delta_{\text{рез}}$ відносно $X_{\text{крит}}$.

Крім безпосереднього впливу на ймовірність виникнення події, похибки функціонування системи водоочищення також відіграють ключову роль у формуванні масштабу її наслідків (C). Наслідки небажаної події, такої як постачання неякісної води, не обмежуються лише фактом перевищення нормативу; їхня тяжкість значною мірою залежить від тривалості періоду, протягом якого проблема залишається невирішеною, а вода з відхиленнями подається споживачам.

Якщо похибки у функціонуванні системи виникають, залишаються невиявленими та не усуваються протягом тривалого часу, це призводить до систематичного накопичення забруднень у мережі та виникнення суттєвих негативних наслідків. Таким чином, масштаби наслідків є функцією від тривалості проблеми ($T_{\text{проблеми}}$), яка включає час від моменту виникнення похибки до її повного усунення та відновлення нормального функціонування системи:

$$C = f(T_{\text{проблеми}}), \quad (7)$$

де f – це функція, що описує залежність наслідків від тривалості проблеми, і її характер

може бути нелінійним (наприклад, наслідки можуть зростати експоненціально з часом).

Тривалість $T_{\text{проблеми}}$ у свою чергу залежить від цілої низки факторів, включаючи швидкість виявлення похибки (ефективність моніторингу), оперативність реагування системи та, що найважливіше, час відновлення функціональності блоку або системи в цілому.

2. Зв'язок з передаточними функціями та часом відновлення

У цьому контексті особливо актуальною постає необхідність врахування динамічних характеристик процесів водоочищення. Кожен технологічний блок, що має власні інерційність та час відгуку, може бути описаний за допомогою передаточних функцій [4,5]. Ці функції дозволяють не тільки прогнозувати, як вхідні параметри перетворюються на вихідні в ідеальних умовах, але й моделювати, як похибки, що виникають у певних блоках, передаються та трансформуються в часі, впливаючи на подальші етапи очищення та, відповідно, на загальну тривалість $T_{\text{проблеми}}$. Швидкість, з якою система водоочищення здатна виявляти та коригувати похибки, є критичною для мінімізації

$$C_{\text{вих,сист}}(s) = G_N(s) \cdot \left(G_{N-1}(s) \cdot \left(\dots \left(G_1(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s) \right) \dots \right) + E_{N-1}(s) \right) + E_N(s), \quad (8)$$

де, s – змінна Лапласа.

Використання перетворення Лапласа перекладає диференціальні рівняння, що описують динаміку процесів у часі, у алгебраїчні рівняння в «частотній» (комплексній) області s . Це значно спрощує аналіз послідовних систем; $C_{\text{вх}}(s)$ – зображення Лапласа вхідної концентрації домішок до першого блоку системи. Це "сигнал" забруднень, що надходить у систему; $G_i(s)$ – ідеальна (номінальна) передаточна функція i -го блоку системи водоочищення. Це математична модель, що описує, як i -й блок повинен ідеально (без похибок) зменшувати концентрацію домішок. Вона може враховувати динаміку процесу (затримки, інерцію). Якщо $G_i(s)$ дорівнює константі k_i , це означає, що блок просто зменшує концентрацію в k_i разів; $E_i(s)$ – зображення (образ) Лапласа похибки, що генерується або додається в i -му

$T_{\text{проблеми}}$. Це безпосередньо пов'язано з часом відновлення ($T_{\text{відновлення}}$) функціональності блоків, що вийшли з ладу або працюють з відхиленнями, а також з ефективністю систем моніторингу та управління.

Для аналізу цих динамічних взаємозв'язків та кількісного опису розповсюдження сигналів (концентрацій домішок) і похибок у часі, зручно використовувати перетворення Лапласа [6]. Цей математичний апарат дозволяє перетворити складні диференціальні рівняння, які описують динаміку процесів у часовій області, на більш прості алгебраїчні вирази в так званій s -області (або частотній області). Тут s є комплексною змінною Лапласа, яка інкапсулює як інформацію про швидкість зміни процесів (через дійсну частину), так і про їхні частотні характеристики (через уявну частину).

Використання перетворення Лапласа дозволяє представити вихідну концентрацію домішок з усієї системи водоочищення ($C_{\text{вих,сист}}(s)$) як функцію вхідної концентрації та похибок кожного блоку. Це є більш строгою та динамічною моделлю порівняно з простим сумуванням похибок:

блоці. Ця похибка представляє відхилення від ідеальної роботи блоку (наприклад, пропуск домішок, неточність дозування реагентів, збій у роботі). Вважається, що ця похибка додається на виході i -го блоку; N – загальна кількість послідовно з'єднаних блоків у системі водоочищення.

Припустимо, ми маємо систему з N послідовних блоків: Блок 1, Блок 2, ..., Блок N .

Вихід з першого блоку (блок 1): концентрація домішок на вході блоку 1 – $C_{\text{вх}}(s)$. Цей блок ідеально очищає воду згідно зі своєю передаточною функцією $G_1(s)$, але додає похибку $E_1(s)$.

$$C_{\text{вих,1}}(s) = G_1(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s). \quad (9)$$

Входом для блоку 2 є вихід блоку 1, тобто $C_{\text{вих,1}}(s)$. Блок 2 застосовує свою ідеальну передаточну функцію $G_2(s)$ до цього входу і додає власну похибку $E_2(s)$.

$$C_{\text{вих},2}(s) = G_2(s) \cdot C_{\text{вих},1}(s) + E_2(s). \quad (10) \quad \text{Підставляємо } C_{\text{вих},1}(s):$$

$$C_{\text{вих},2}(s) = G_2(s) \cdot (G_1(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s)) + E_2(s); \quad (11)$$

$$C_{\text{вих},2}(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s) \cdot G_2(s) + E_2(s). \quad (12)$$

Вихід з третього блоку (блок 3): Входом для блоку 3 є $C_{\text{вих},2}(s)$. Блок 3 застосовує $G_3(s)$ і додає $E_3(s)$.

$$C_{\text{вих},3}(s) = G_3(s) \cdot C_{\text{вих},2}(s) + E_3(s). \quad (13)$$

Підставляємо $C_{\text{вих},2}(s)$:

$$C_{\text{вих},3}(s) = G_3(s) \cdot (G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s) \cdot G_2(s) + E_2(s)) + E_3(s) \quad (14)$$

$$C_{\text{вих},3}(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) \cdot C_{\text{вх}}(s) + E_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) + E_2(s) \cdot G_3(s) + E_3(s) \quad (15)$$

Для будь-якого n -го блоку в послідовно з'єднаній системі водоочищення, вихідна концентрація домішок $C_{\text{вих},n}(s)$ є результатом впливу його власної передаточної функції $G_n(s)$ на вхідну концентрацію домішок $C_{\text{вх},n}(s)$ (яка є вихідною концентрацією попереднього блоку, $(n-1)$ -го), а також додавання похибки $E_n(s)$, що виникає в цьому конкретному n -му блоці.

Отже, вихідна концентрація домішок для n -го блоку системи в s -області може бути представлена як:

$$C_{\text{вих},n}(s) = G_n(s) \cdot C_{\text{вх},n}(s) + E_n(s) \quad (16)$$

де, $C_{\text{вих},n}(s)$ – зображення Лапласа вихідної концентрації домішок з n -го блоку. Це те, що надходить у наступний блок $(n+1)$ або є кінцевим результатом, якщо n – останній блок; $G_n(s)$ – ідеальна (номінальна) передаточна функція n -го блоку. Вона описує, як n -й блок повинен теоретично трансформувати

вхідну концентрацію домішок (наприклад, зменшувати її); $C_{\text{вх},n}(s)$ – зображення Лапласа вхідної концентрації домішок для n -го блоку. У послідовній системі, це буде $C_{\text{вих},n-1}(s)$ (вихід попереднього блоку). Для першого блоку ($n = 1$), $C_{\text{вх},1}(s)$ буде просто $C_{\text{вх}}(s)$ – зображення Лапласа загальної вхідної концентрації домішок до всієї системи; $E_n(s)$ – зображення Лапласа похибки, що генерується або додається на виході n -го блоку. Ця похибка відображає відхилення фактичної роботи блоку від його ідеальної поведінки.

Це вираження є фундаментальним для побудови більш складної формули для $C_{\text{вих},\text{сист}}(s)$, оскільки вона описує внесок кожного окремого елемента в загальну динамічну модель накопичення похибок.

Продовжуючи цю логіку для N блоків, ми отримаємо загальну формулу для $C_{\text{вих},\text{сист}}(s)$:

$$C_{\text{вих},\text{сист}}(s) = \left(\prod_{j=1}^N G_j(s) \right) \cdot C_{\text{вх}}(s) + \sum_{k=1}^N (E_k(s) \cdot \prod_{j=k+1}^N G_j(s)) \quad (17)$$

де, $\left(\prod_{j=1}^N G_j(s) \right)$ – це добуток (композиція) усіх ідеальних передаточних функцій блоків. У частотній області, для послідовно з'єднаних систем, загальна передаточна функція є добутком окремих. Цей добуток являє собою ідеальну передаточну функцію всієї системи водоочищення; $C_{\text{вх}}(s)$ – початковий «сигнал» забруднень. Ця частина формули описує, якою була б концентрація домішок на виході системи, якби всі блоки працювали абсолютно ідеально, без жодних похибок. Це «чистий» результат очищення;

$\sum_{k=1}^N (E_k(s) \cdot \prod_{j=k+1}^N G_j(s))$ – це сума «перенесених» похибок від кожного блоку системи. Кожен доданок у цій сумі представляє внесок похибки одного конкретного блоку в загальну вихідну концентрацію; $E_k(s)$ – похибка, що виникла у k -му блоці; $\prod_{j=k+1}^N G_j(s)$ – це добуток ідеальних передаточних функцій усіх блоків, що йдуть після k -го блоку, аж до кінця системи (N -го блоку). Цей множник показує, як похибка, яка виникла в k -му блоці, трансформується

(зменшується, збільшується, затримується), проходячи через усі наступні етапи очищення. Ця частина формули показує, що кінцева концентрація домішок на виході системи не тільки залежить від початкових забруднень та ідеального очищення, але й обтяжена сукупним впливом усіх похибок, що виникли в кожному блоці, причому вплив ранніх похибок фільтрується наступними етапами.

Таким чином, цей вираз дозволяє аналізувати, як зміни у вхідній концентрації або виникнення похибок у певних блоках впливають на вихідну якість води з урахуванням часових затримок та інерції процесів.

3. Розробка математичного апарату для кількісної оцінки та управління ризиками

Як було зазначено у попередніх розділах, якість води на виході системи водоочищення не лише залежить від накопичених похибок у кожному технологічному блоці, але й динамічно змінюється у часі. Однак, для повноцінної оцінки потенційного ризику недостатньо лише констатувати факт відхилення якості води від нормативних показників. Набагато важливішим аспектом, що безпосередньо впливає на масштаб та тяжкість наслідків небажаної події, є тривалість періоду, протягом якого якість очищеної води залишається незадовільною внаслідок цих накопичених похибок. Ключовим фактором є часовий інтервал, протягом якого може відбуватися надходження неякісної води до споживачів або її скидання у

навколишнє середовище, що призводить до значних економічних і екологічних втрат.

Таким чином, критично важливим аспектом оцінки наслідків є тривалість періоду, протягом якого якість очищеної води залишається незадовільною внаслідок накопичених похибок. Цей період, який ми позначимо як $T_{\text{проблеми}}$, є безпосередньою мірою того, як довго споживачі можуть отримувати воду, що не відповідає стандартам, або протягом якого періоду забруднені стоки можуть негативно впливати на довкілля. $T_{\text{проблеми}}$ не є статичною величиною, а залежить від ефективності операційних процесів, що включають:

- час виявлення похибки ($T_{\text{виявлення}}$) – період від моменту виникнення похибки до її ідентифікації системою моніторингу або персоналом. Ефективність систем автоматичного контролю та раннього попередження є тут ключовою;

- час реагування ($T_{\text{реагування}}$) – час, необхідний для аналізу виявленої проблеми, прийняття рішення та ініціювання коригуючих дій. Це включає організаційні процедури та швидкість прийняття управлінських рішень;

- час відновлення ($T_{\text{відновлення}}$) – середній час, потрібний для усунення несправності, виконання ремонтних робіт, заміни обладнання, або коригування параметрів процесу для повернення системи до нормального функціонування та досягнення прийнятної якості води. Цей параметр відображає ремонтпридатність системи.

Загальна тривалість часу проблеми може бути представлена як сума цих компонентів:

$$T_{\text{проблеми}} = T_{\text{виявлення}} + T_{\text{реагування}} + T_{\text{відновлення}} \quad (18)$$

Чим більший $T_{\text{відновлення}}$, тим довше триває постачання неякісної води, і тим серйозніші

наслідки. Таким чином, наслідки C є зростаючою функцією від $T_{\text{проблеми}}$:

$$C = fC(T_{\text{проблеми}}) = fC(T_{\text{виявлення}} + T_{\text{реагування}} + T_{\text{відновлення}}). \quad (19)$$

На основі детального аналізу як ймовірності небажаної події, детермінованої накопиченими похибками, так і масштабу її наслідків, обумовленого динамікою виявлення та усунення проблем, ми можемо сформулювати загальну інтегровану формулу для ри-

зику (R) у системі водоочищення. Об'єднуючи визначення ризику $R = P \times C$ з виразами для P (формула 5) та C (формула 8), ми отримуємо комплексний математичний вираз:

$$R = f_P \left(t \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} \right) \times f_C (T_{\text{виявлення}} + T_{\text{реагування}} + T_{\text{відновлення}}). \quad (20)$$

Цей вираз є ключовим для оцінки ризиків у системах водоочищення, оскільки він:

- включає стандартні відхилення (σ_n) похибок кожного окремого блоку, що є джерелом загальної невизначеності якості води;
- за допомогою коефіцієнта t дозволяє оцінити ймовірність (P) того, що сумарна похибка призведе до перевищення нормативів;
- залежить від часу виявлення, реагування та відновлення, які формують тривалість проблеми ($T_{\text{проблеми}}$) та, відповідно, масштаб наслідків (C).

Таким чином, вираз (20) слугує потужним інструментом для кількісного управління ризиками, вказуючи на критичні параметри, оптимізація яких дозволить значно підвищити надійність та безпеку систем водоочищення.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Показано, що похибки, які виникають на кожному технологічному етапі, не є ізольованими, а підсумовуються та трансформуються по всьому ланцюгу водоочищення. Це призводить до формування результуючої похибки ($\delta_{\text{рез}}$), що безпосередньо впливає на відповідність якості води нормативам.
2. Встановлено, що ймовірність перевищення критичних показників якості води ($f(\delta_{\text{рез}} > X_{\text{крит}})$) прямо залежить від результуючої похибки ($\delta_{\text{рез}}$), яка, у свою чергу, є функцією від стандартних відхилень похибок окремих блоків (σ_n) та довірчого коефіцієнта (t).
3. Доведено, що масштаб наслідків (C) є функціонально залежним від тривалості проблеми ($T_{\text{проблеми}}$), яка охоплює час виявлення ($T_{\text{виявлення}}$), час реагування ($T_{\text{реагування}}$) та, що особливо важливо, час відновлення ($T_{\text{відновлення}}$) функціональності системи водоочищення. Застосування передаточних функцій ($G_i(s)$) у поєднанні з перетворенням Лапласа забезпечує можливість динамічного моделювання передачі та накопичення похибок у часовій області, а також їх впливу на параметри $T_{\text{проблеми}}$.

4. Розроблена інтегрована формула ризику надає математичний апарат для кількісної оцінки та управління ризиками, що поєднує статистичні характеристики похибок блоків та операційні параметри реагування системи на відхилення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Uriadnikova I. V., Lebedev V. H., Zaplatynskyi V. M., Tsyhanenko O. I. Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, 1. 95 – 101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362.
2. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.
3. Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. Київ: Наукова думка, 2008. 543 с.
4. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Посібник, 2-ге вид., перероб., і доп. Київ: Либідь, 2007. 656 с.
6. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: Навчальний посібник. Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.

REFERENCES

1. Uriadnikova, I. V., Lebedev, V. H., Zaplatynskyi, V. M., & Tsyhanenko, O. I. (2022). Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1. 95–101. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>. [in Ukrainian].
2. Henly, E. J., & Kumamoto, H. (1984). *Reliability of technical systems and risk assessment*. Trans. with English. Moscow: Mashinostroenie. Retrieved from <http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka-trudy/NadezhnostTekhnicheskikhSistemKumamoto1984.pdf> [in Russian].
3. Lysychenko, G.V., Zabulonov, Yu.L., & Khmil, G.A. (2008). *Natural, man-made and environmental risks: analysis, assessment, management*. Kyiv: Naukova dumka. Retrieved

from <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000012597> [in Ukrainian].

4. Loveikin, V. S., & Romasevych, Yu. O. (2017). *Teoriia tekhnichnykh system*. K.: TsP «KOMPRYNТ». Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/teoriya_tekhnichnih_sistem_loveykin_romasevich.pdf [in Ukrainian].

5. Popovych, M. H., & Kovalchuk, O. V. (2007). *Teoriia avtomatychnoho keruvannia*. Kyiv:

Lybid. Retrieved from https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Popovich_2007_656.pdf [in Ukrainian].

6. Ohirko, O. I., & Halaiko, N. V. (2021). *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka: Navchalnyi posibnyk*. Lviv: LvDUVS, Retrieved from <https://surl.li/ehkyg> [in Ukrainian].

Analysis of the interrelationship between error dynamics and the overall risk level in the operation of water treatment systems

Inga Uriadnikova

Abstract. Today, ensuring reliable and safe operation of water treatment systems that are part of critical infrastructure is one of the key tasks of environmental and technogenic safety. Despite the perfection of modern technologies, no complex engineering system operates in conditions of complete stability – constant variability of the parameters of the source water, fluctuations in the activity of reagents, inertia of processes and other factors lead to errors in the operation of individual functional units. These errors, even under normal operation, form deviations that can negatively affect the resulting quality of purified water. Their accumulation or underestimation of potential damage increases the risks of violating sanitary and technical standards and creates a threat to the environment. In order to study the scientific and methodological approach to the analysis of the relationship between the dynamics of errors in the functioning of water treatment systems and the formation of the overall risk level, the paper gradually analyzed errors in water treatment systems and their direct relationship with risks, the relationship with transfer functions and recovery time, and developed a mathematical apparatus for quantitative assessment and risk management. Analysis of the results obtained showed that the errors that arise at each technological stage are not isolated, but are summed up and transformed throughout the water treatment chain, which leads to the formation of the resulting error ($\delta_{\text{рез}}$) and directly affects the compliance of water quality with standards. It is established that the probability of exceeding critical water quality indicators $f(\delta_{\text{рез}} > X_{\text{крит}})$ directly depends on the resulting error ($\delta_{\text{рез}}$), which, in turn, is a function of the standard deviations of the errors of individual blocks (σ_n) and the confidence coefficient (t). It has been proven that the scale of consequences (C) is functionally dependent on the duration of the problem (T_{problem}), which includes the detection time ($T_{\text{detection}}$), the response time (T_{response}) and, most importantly, the restoration time (T_{recovery}) of the functionality of the water treatment system. The use of transfer functions ($G_i(s)$) in combination with the Laplace transform provides the possibility of dynamic modeling of the transmission and accumulation of errors in the time domain, as well as their impact on the parameters of the T_{problem} . The developed integrated risk formula provides a mathematical apparatus for quantitative assessment and risk management, combining the statistical characteristics of the block errors and the operational parameters of the system's response to deviations.

Keywords: reliability, errors, transfer functions, technogenic risks, safety, water treatment systems

Стаття надійшла до редакції 27.06.2025