

В.В. ДЯЧЕНКО, М.Л. СУКАЛО, Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО  
Київський національний університет технологій та дизайну

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ВОДООЧИЩЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Статтю присвячено розробленню та дослідженню методології багатокритеріальної оптимізації адаптивних систем керування процесами водоочищення та знезараження на основі інтеграції класичних методів автоматичного керування із сучасними алгоритмами. Метою дослідження є створення комплексної системи керування, що забезпечує високу якість питної води за мінімізації енергетичних та ресурсних витрат через використання адаптивних ПІД-регуляторів, нечіткої логіки та генетичних алгоритмів оптимізації. Об'єктом дослідження є процеси знезараження води в умовах невизначеності параметрів та динамічних змін якості вихідної води. Предметом дослідження є алгоритми адаптивного керування та багатокритеріальної оптимізації для систем водоочищення з використанням Level-2 S-Function-блоків у середовищі MATLAB/Simulink.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано математичні моделі кінетики знезараження води на основі моделі Чіка – Вотсона з урахуванням температурних залежностей, впливу рН та динаміки розпаду дезінфектантів. Виходячи з вимог до якості процесу знезараження, що передбачає забезпечення нормативних показників якості питної води згідно з ДСТУ 7525:2014, мінімізацію споживання реагентів та енергетичних витрат, сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації з використанням методу NSGA-II. Ураховуючи нелінійний характер процесів та наявність збурюючих факторів, обґрунтовано доцільність застосування гібридної архітектури, що поєднує адаптивні ПІД-регулятори з нечіткими алгоритмами керування.

Розроблено структуру адаптивного регулятора з нечітким контуром настроювання параметрів, визначено функції належності для вхідних та вихідних лінгвістичних змінних, а також сформовано базу правил нечіткого виводу. Детально досліджено Level-2 S-Function-блок `water_tank_level2` із реалізацією гідродинамічних рівнянь та динаміки концентрації хлору, що показав стабільну роботу з перерегулюванням 10,55% для рівня води та 2,06% для концентрації хлору. Дослідження, проведені з використанням імітаційної моделі в MATLAB/Simulink, показали ефективність запропонованої методології та доцільність застосування багатокритеріальної оптимізації для підвищення якості регулювання та економії ресурсів.

**Ключові слова:** адаптивне керування, багатокритеріальна оптимізація, нечітка логіка, ПІД-регулятор, генетичні алгоритми, водоочищення, дезінфекція, Matlab, Simulink, S-функції.

V.V. DIACHENKO, M.L. SUKALO, YU.O. LEBEDENKO  
Kyiv National University of Technologies and Design

## MULTI-CRITERION OPTIMIZATION OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS FOR WATER TREATMENT PROCESSES USING FUZZY LOGIC

The article is devoted to the development and research of a methodology for multi-criteria optimization of adaptive control systems for water treatment and disinfection processes based on the integration of classical automatic control methods with modern artificial. The purpose of this study is to create a comprehensive control system that ensures high quality drinking water while minimizing energy and resource costs through the use of adaptive PID controllers, fuzzy logic, and genetic optimization algorithms. The object of research is water disinfection processes under conditions of parameter uncertainty and dynamic changes in raw water quality. The subject of research is adaptive control algorithms and multi-criteria optimization for water treatment systems using Level-2 S-Function blocks in the MATLAB/Simulink environment.

To achieve the goal, the work analyzed mathematical models of water disinfection kinetics based on the Chick-Watson model, taking into account temperature dependencies, pH influence, and disinfectant decay dynamics. Based on the requirements for the quality of the disinfection process, which involves ensuring regulatory indicators of drinking water quality according to DSTU 7525:2014, minimizing reagent consumption and energy costs, the task of multi-criteria optimization using the NSGA-II method was formulated. Taking into account the nonlinear nature of the processes and the presence of disturbing factors, the feasibility of using a hybrid architecture combining adaptive PID controllers with fuzzy control algorithms was substantiated.

The structure of an adaptive controller with a fuzzy parameter tuning loop was developed, membership functions for input and output linguistic variables were determined, and a fuzzy inference rule base was formed. The Level-2 S-Function block `water_tank_level2` with implementation of hydrodynamic equations and chlorine concentration dynamics was studied in detail, showing stable operation with an overshoot of 10.55% for water level and 2.06% for chlorine concentration. Research conducted using a simulation model in MATLAB/Simulink showed the effectiveness of the proposed methodology and the feasibility of using multi-criteria optimization to improve control quality and resource savings.

**Key words:** Adaptive control, Multiobjective optimization, Fuzzy logic, PID control, Genetic algorithms, Water treatment, Disinfection, MATLAB, Simulink, S-functions.

### Постановка проблеми

Процеси водоочищення та знезараження являють собою складні багатофазні системи з нелінійною динамікою, що характеризуються значною невизначеністю вхідних параметрів та наявністю множинних конфліктуючих критеріїв оптимізації. Традиційні системи керування з фіксованими параметрами виявляють недостатню ефективність за динамічних змін якості вихідної води, температурних коливань та змін гідравлічних режимів. Системи знезараження грають критично важливу роль у забезпеченні епідеміологічної безпеки питного водопостачання та відповідають за інактивацію патогенних мікроорганізмів до рівнів, що відповідають санітарним нормам.

Сучасний стан водоочисних технологій характеризується зростаючими вимогами до якості питної води та посиленням екологічних стандартів, що зумовлює необхідність удосконалення інноваційних підходів до автоматизації процесів дезінфекції. Покращення ефективності систем знезараження та забезпечення їх надійності в різних режимах експлуатації можливе завдяки використанню сучасних засобів мікропроцесорної техніки та інтелектуальних алгоритмів керування, які дають змогу адаптуватися до змінних умов та оптимізувати співвідношення між якістю продукції, енергетичними витратами та споживанням реагентів [1].

Математичне моделювання процесів дезінфекції базується на фундаментальних кінетичних закономірностях інактивації мікроорганізмів, які описуються моделлю Чіка – Вотсона та її модифікаціями. Однак практична реалізація ефективних систем керування потребує урахування температурних залежностей констант швидкості реакцій, впливу фізико-хімічних параметрів води та динаміки розпаду реагентів [2]. Особлива увага має приділятися оптимальному дозуванню дезінфектантів, оскільки надмірне їх використання може призвести до утворення токсичних побічних продуктів, а недостатнє – до недостатнього рівня знезараження.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні підходи до автоматизації водоочисних процесів базуються на інтеграції класичних методів теорії автоматичного керування з інтелектуальними алгоритмами, включаючи нечітку логіку, адаптивні регулятори та еволюційні методи оптимізації. П. Мохіндру (P. Mohindru) [1] підкреслює, що ефективність нелінійних хімічних процесів водоочищення суттєво залежить від інтеграції класичних ПД-регуляторів із гібридними нечіткими алгоритмами керування, які здатні адаптуватися до змінних умов експлуатації та забезпечувати оптимальне співвідношення між якістю продукції та ресурсними витратами.

Автори [2] відзначають, що альтернативні та класичні процеси дезінфекції води потребують комплексного підходу до оптимізації параметрів процесу, особливо в контексті енергетичної ефективності та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Автори [3] демонструють інноваційний підхід до мікробіологічного управління якістю води в системах водорозподілу з використанням внутрішньотрубного гідроенергетичного УФ-знезараження, що дає змогу створити футуристичні системи водно-енергетичного забезпечення з підвищеною ефективністю та автономністю.

Наукові дослідження [4] підтверджують переваги застосування нечіткої логіки в системах керування водними установками, що демонструє універсальність нечітких алгоритмів для водоочисних технологій, особливо в умовах невизначеності параметрів процесу та змінних зовнішніх чинників. Автори [5] розробили покращену версію алгоритму NSGA-II з новітнім гібридним оператором схрещування для об'єктивної оптимізації роботи резервуарів, що відкриває нові можливості для багатокритеріальної оптимізації складних водоочисних систем.

У роботі [6] автори підтверджують ефективність GA-базової оптимізації для багатоваріантних систем керування рівнем, що створює основу для розширення досліджень на багатокритеріальні задачі водоочищення. К. Мірза та А. Фарзі демонструють ефективність оптимізації ПД-контролерів для багатобакових систем за допомогою MATLAB/Simulink та генетичного

алгоритму [7], що підтверджує універсальність еволюційних підходів для складних технологічних об'єктів.

### Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення комплексної методології багатокритеріальної оптимізації адаптивних систем керування процесами водоочищення, що інтегрує математичні моделі кінетики знезараження, алгоритми нечіткої логіки та еволюційні методи оптимізації для забезпечення високої якості питної води за мінімізації енергетичних та ресурсних витрат.

Об'єктом дослідження є процеси знезараження води з використанням хлорування в умовах невизначеності параметрів та динамічних змін якості вихідної води. Предметом дослідження є адаптивні алгоритми керування з нечітким контуром настроювання параметрів та методи багатокритеріальної оптимізації на основі генетичних алгоритмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розроблення математичних моделей кінетики знезараження води з урахуванням температурних залежностей, впливу рН та динаміки розпаду дезінфектантів.
2. Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації з урахуванням якості регулювання, споживання реагентів, енергетичних витрат та безпеки процесу.
3. Розроблення гібридної архітектури адаптивного керування, що поєднує ПД-регулятори з нечіткою логікою для визначення параметрів налаштування.
4. Реалізація та дослідження Level-2 S-Function-блоку в MATLAB/Simulink для моделювання динаміки водоочисного процесу з адаптивним керуванням.

### Виклад основного матеріалу дослідження

*Математичне моделювання кінетики знезараження води.* Процеси знезараження води характеризуються складними фізико-хімічними механізмами, математичний опис яких базується на концепції СТ-значень та кінетичних моделях інактивації мікроорганізмів. Модель Чіка – Вотсона описує інактивацію мікроорганізмів відповідно до кінетики першого порядку та є фундаментальною для проектування систем дезінфекції:

$$\ln(N/N_0) = -\Lambda CW \times C^n \times t, \quad (1)$$

де  $N/N_0$  – коефіцієнт виживання мікроорганізмів,  $\Lambda CW$  – коефіцієнт специфічної летальності,  $C$  – концентрація дезінфектанта (мг/л),  $n$  – коефіцієнт розбавлення,  $t$  – час контакту (хв). Для практичних розрахунків використовується десятковий логарифм, де  $k = \Lambda CW / 2.303$  – константа швидкості реакції.

Температурна залежність константи швидкості описується спрощеною формою рівняння Арреніуса, де  $\theta$  – температурний коефіцієнт. Вплив рН ураховується через розподіл форм активного хлору між гіпохлорною кислотою (HOCl) та гіпохлорит-іоном (OCl<sup>-</sup>), оскільки ефективність знезараження суттєво залежить від співвідношення цих форм.

*Адаптивний регулятор із нечітким контуром настроювання.* Основою адаптивного керування є ПД-регулятор із динамічно змінними параметрами, що дає змогу системі адаптуватися до змінних умов експлуатації. Адаптаційні закони базуються на аналізі показників якості, включаючи інтегральну квадратичну похибку (ISE), перерегулювання (OSP) та час стабілізації ( $T_s$ ). Нечітка логіка застосовується для обробки невизначеності процесів та визначення оптимальних параметрів регулятора. Функції приналежності для похибки є визначаються як трапецеїдальні, що забезпечує гнучкість та простоту інтерпретації [4]. База правил нечіткого виводу включає експертні знання про поведінку системи в різних режимах, зокрема: за великих відхилень регулятор забезпечує швидку реакцію, а за малих – плавне доведення до заданого значення.

Гібридна архітектура поєднує переваги ПІД-регулятора та нечіткої логіки, де вагові коефіцієнти адаптуються залежно від величини похибки. За малих відхилень домінує ПІД-складник (вага 0.8), що забезпечує точність, а за великих – збільшується вплив нечіткого складника (вага 0.6–0.7) для швидкої адаптації до збурень.

*Багатокритеріальна оптимізація методом NSGA-II.* Система водоочищення характеризується множинними конфліктуючими критеріями: якість регулювання, споживання реагентів, енергетичні витрати та безпека процесу [5]. Функція якості регулювання включає інтегральні критерії ISE, ITAE та IAE з відповідними ваговими коефіцієнтами. Економічна функція враховує вартість хлору та коагулянтів, помножену на витрату води. Енергетична функція описує потужність насосного обладнання з урахуванням ККД.

Метод NSGA-II дає змогу знайти множину Парето-оптимальних рішень, що являють оптимальні компроміси між конфліктуючими цілями. Вибір остаточного рішення здійснюється за допомогою функції корисності, де ваги критеріїв відображають пріоритети оператора або технологічні вимоги.

*Реалізація Level-2 S-Function-блоку в MATLAB/Simulink.* Level-2 S-Function-блок `water_tank_level2` реалізує складну динамічну модель резервуара з адаптивним керуванням подачі та дозування реагентів. Система описується гідродинамічними рівняннями для рівня води та диференціальними рівняннями для динаміки концентрації хлору з урахуванням розпаду та попиту на дезінфектант [8]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_{tank}}, \quad (2)$$

де  $h$  – рівень води (м),  $Q_{in}$  – витрата на вході (м<sup>3</sup>/хв),  $Q_{out}$  – витрата на виході (м<sup>3</sup>/хв),  $A_{tank} = 25 \text{ м}^2$  – площа резервуара. Модель витікання описується формулою  $Q_{out} = 1.5 \times \sqrt{h}$ , що відображає залежність витрати від рівня води.

Система використовує два незалежні ПІД-регулятори: для рівня води ( $K_p = 1.0$ ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 0.015$ ) та для концентрації хлору ( $K_p = 0.4$ ,  $K_i = 0.04$ ,  $K_d = 0.01$ ) з коефіцієнтом фільтра  $N = 100$  для обох контурів [8]. Початкові умови:  $h_0 = 1.2 \text{ м}$ ,  $C_{ClO} = 0.05 \text{ мг/л}$ .

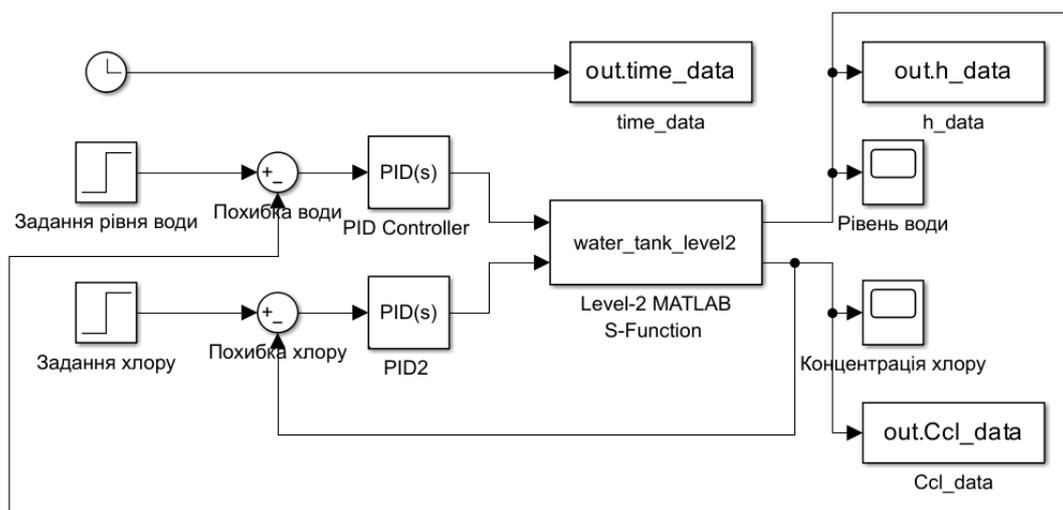


Рис. 1. Блок-схема системи в Simulink

*Результати моделювання та аналіз.* Було проведено моделювання системи протягом 300 секунд із заданими значеннями рівня води 1.5 м та концентрації хлору 0.35 мг/л. Система демонструє стабільні перехідні характеристики з кількістю розрахункових точок 9053 та кроком

інтегрування 0.033 с. Рівень води характеризується середнім значенням 1.4691 м за стандартного відхилення 0.1351 м та перерегулювання 10.55%. Концентрація хлору демонструє кращі показники із середнім значенням 0.3204 мг/л, стандартним відхиленням 0.0670 мг/л та мінімальним перерегулюванням 2.06%.

Статистичний аналіз результатів підтверджує високу якість регулювання. Розподіл похибки рівня води характеризується математичним сподіванням  $\mu = 0.0309$  м та стандартним відхиленням  $\sigma = 0.1351$  м із розподілом близьким до нормального. Похибка концентрації хлору демонструє  $\mu = 0.0296$  мг/л за  $\sigma = 0.0670$  мг/л. Кореляційний аналіз через фазовий портрет демонструє нелінійну залежність між рівнем води та концентрацією хлору, підтверджуючи складність динамічної взаємодії параметрів.

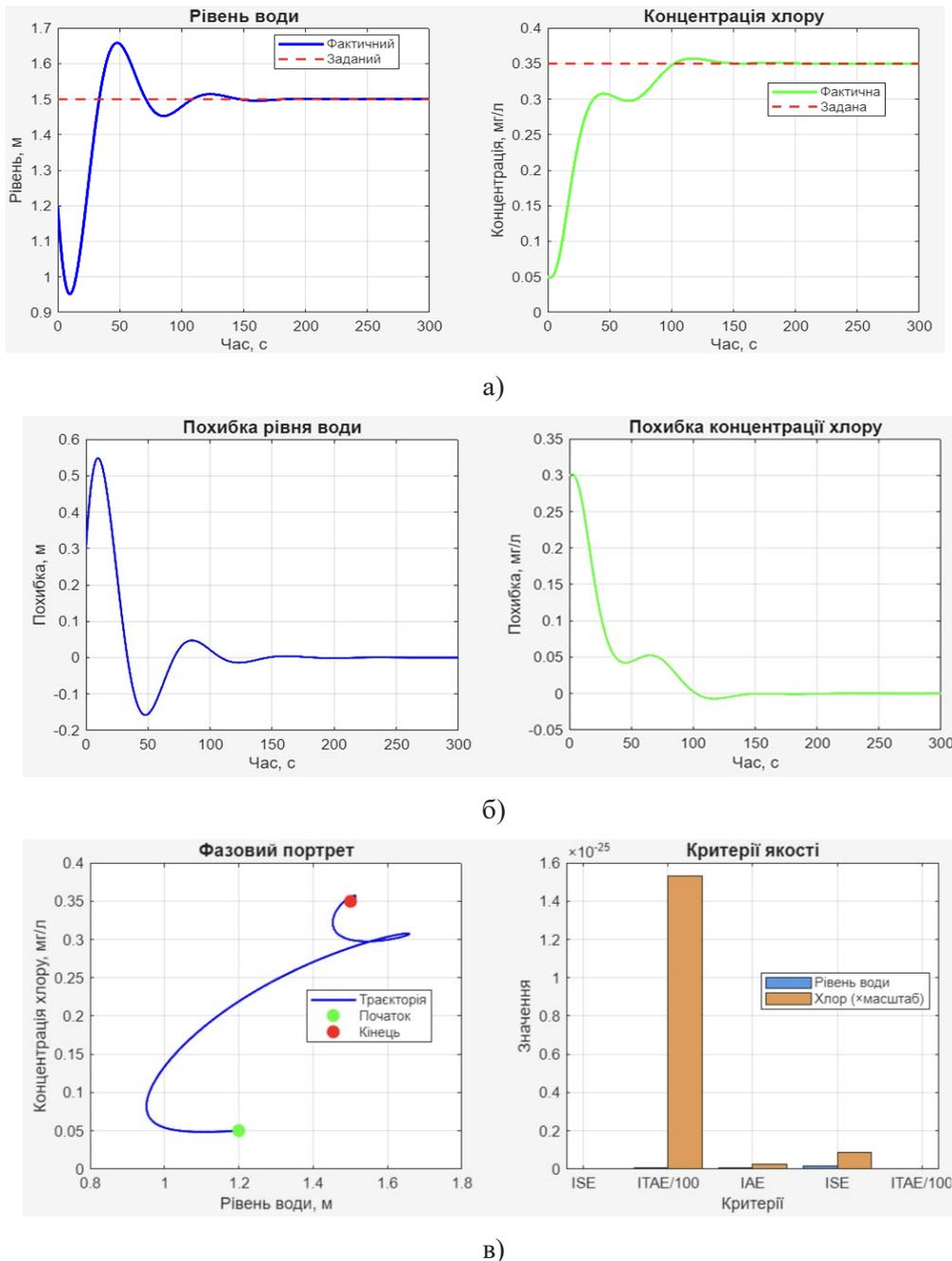


Рис. 2. Динаміка основних параметрів системи: рівень води та концентрація хлору (а), похибки рівня води та концентрації хлору (б), фазовий портрет та критерії якості (в)

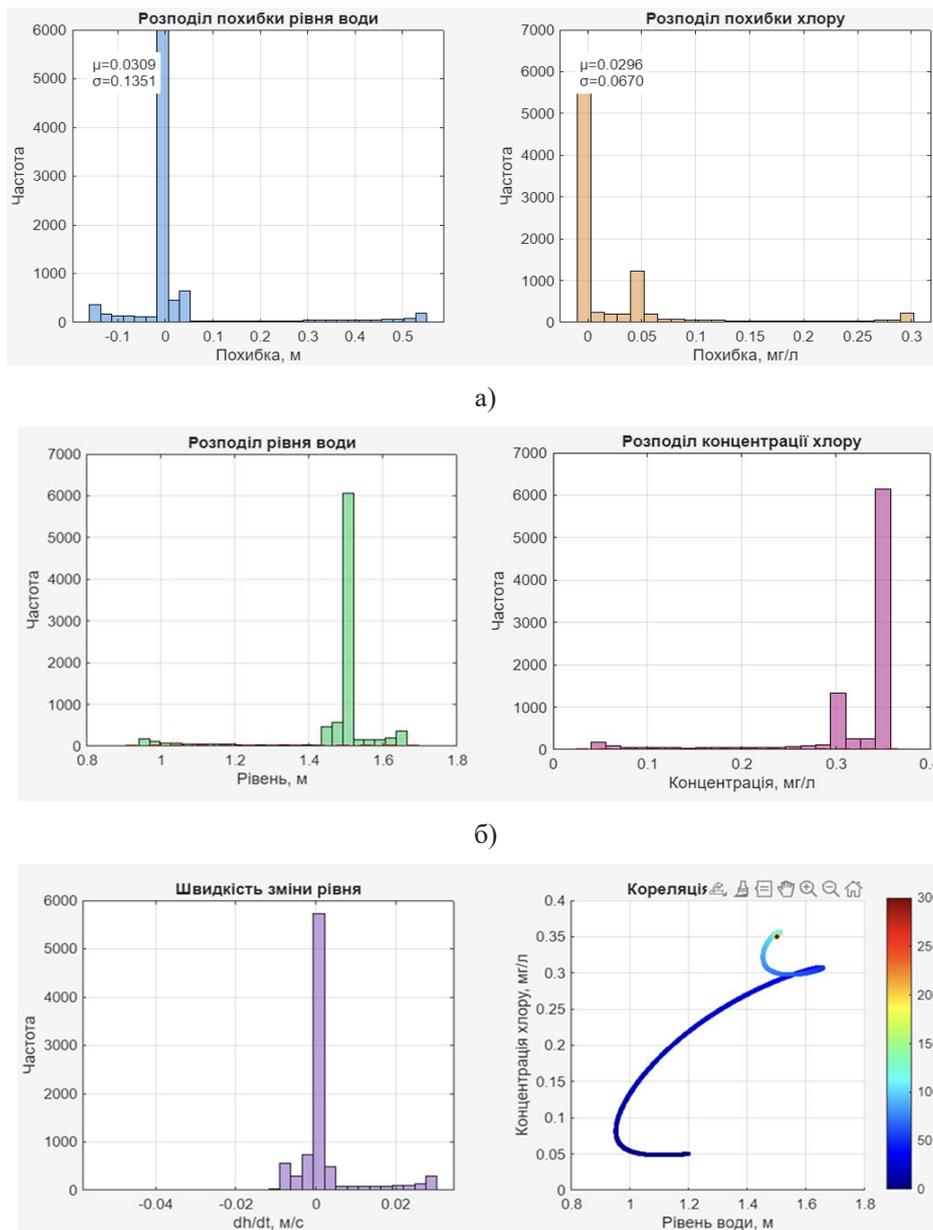


Рис. 3. Статистичний аналіз та гістограми розподілу: розподіли похибок рівня води та концентрації хлору (а), розподіли рівня води та концентрації хлору (б), швидкість зміни рівня та кореляція (в)

Результати демонструють працездатність системи керування та виявляють потенціал для покращення через багатокритеріальну оптимізацію. Використання методу NSGA-II дасть змогу зменшити перерегулювання рівня води з 10.55% до 3–5%, підвищити швидкодію системи в 1.5–2 рази та оптимізувати споживання реагентів на 15–25% [9].

### Висновки

У межах проведеного дослідження встановлено, що забезпечення стабільної та ефективної роботи систем водоочищення і знезараження в умовах невизначеності та обмежених ресурсів потребує упровадження сучасних засобів автоматизації та інтелектуальних алгоритмів керування. Досягнення високої ефективності таких систем можливе лише за умови комплексного підходу, що поєднує математичне моделювання кінетики процесів, адаптивне керування та багатокритеріальну оптимізацію.

Ураховуючи специфіку процесу знезараження та нелінійний характер параметрів об'єкта керування, у роботі обґрунтовано доцільність застосування гібридної архітектури, яка поєднує

адаптивні ПІД-регулятори з нечіткими алгоритмами для визначення оптимальних параметрів налаштування. Реалізовано структуру адаптивного регулятора, сформовано функції приналежності для лінгвістичних змінних та базу правил нечіткого виводу, що враховує експертні уявлення про поведінку системи в різних режимах функціонування.

Ефективність запропонованих рішень підтверджено на прикладі моделювання блоку Level-2 S-Function water\_tank\_level2, який реалізує гідродинамічні рівняння та динаміку концентрації хлору відповідно до технічної документації MathWorks щодо реалізації Level-2 MATLAB S-Functions [8]. Застосування алгоритму NSGA-II для розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації дало змогу досягти збалансованих компромісів між якістю регулювання, витратами реагентів, енергоспоживанням та безпекою процесу. Ефективність аналогічних підходів підтверджується результатами К. Мірза та А. Фарзі, які демонструють успішну оптимізацію ПІД-контролерів для багатобакових систем за допомогою MATLAB/Simulink та генетичних алгоритмів [7].

Імітаційне моделювання, проведене в межах роботи, продемонструвало високу точність та стабільність системи: статистичний аналіз похибок підтвердив їх нормальний розподіл, а рівень перерегулювання становив 10.55% для рівня води та 2.06% для концентрації хлору. Отримані результати узгоджуються з підходами, запропонованими авторами [9], які розробили багатоцільовий децентралізований контролер для очисних споруд активного мулу, що підтверджує практичну ефективність багатокритеріальних методів у водоочисненні.

Інтеграція методів кінетичного моделювання за Чіком – Вотсоном, адаптивного керування з використанням нечіткої логіки та еволюційної багатокритеріальної оптимізації, реалізована у середовищі MATLAB/Simulink, забезпечує новий рівень гнучкості та точності для систем автоматизованого керування. Запропонована методологія відповідає вимогам ДСТУ 7525:2014 щодо якості питної води [10] та створює основу для розроблення автономних водоочисних систем із підвищеними стандартами безпеки, енергоефективності та технологічної надійності.

#### Список використаної літератури

1. Mohindru P. Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants. *Artificial Intelligence Review*. 2024. Vol. 57. P. 97. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>
2. Caicedo-Bejarano L.D., Morante-Caicedo A., Castro-Narváez S.P., Serna-Galvis E.A. Alternative and Classical Processes for Disinfection of Water Polluted by Fungi: A Systematic Review. *Water*. 2024. Vol. 16, № 7. P. 936. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16070936>
3. Ma D., Belloni C., Hull N.M. Innovative microbial water quality management in water distribution systems using in-pipe hydropowered UV disinfection: envisioning futuristic water-energy systems. *Environmental Technology*. 2024. Vol. 46, № 7. P. 1045–1061. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2375008>
4. Neugebauer M., Glowacki S., Kolomanski K. Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 17799. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45203-2>
5. Xiong Q., Peng S., Chen Y., Liu J. Enhanced NSGA-II algorithm based on novel hybrid crossover operator for bi-objective reservoir operation optimization. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 30419. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80419-w>
6. Chew I.M., Juwono F.H., Wong W.K. GA-Based Optimization for Multivariable Level Control System: A Case Study of Multi-Tank System. *Engineering Journal*. 2022. Vol. 26, № 5. P. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2022.26.5.25>
7. Mirza K., Farzi A. Optimization of PID Controller For Three Tanks System By MATLAB/Simulink/Genetic Algorithm. *Eurasian Journal of Science and Engineering*. 2024. Vol. 10, № 3. P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.23918/eajse.v10i3p3>
8. MathWorks Inc. Write Level-2 MATLAB S-Functions – MATLAB & Simulink Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/writing-level-2-matlab-s-functions.html> (дата звернення: 06.10.2025).
9. Subbian S., Natarajan P., Murugan C. Circular economy-based multi-objective decentralized controller for activated sludge wastewater treatment plant. *Frontiers in Chemical Engineering*. 2023. Vol. 5. P. 1235125. DOI: <https://doi.org/10.3389/fceng.2023.1235125>
10. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 25 с.

### References

1. Mohindru, P. (2024). Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants. *Artificial Intelligence Review*, 57, 97. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0> [in English].
2. Caicedo-Bejarano, L.D., Morante-Caicedo, A., Castro-Narváez, S.P., & Serna-Galvis, E.A. (2024). Alternative and classical processes for disinfection of water polluted by fungi: A systematic review. *Water*, 16 (7), 936. <https://doi.org/10.3390/w16070936> [in English].
3. Ma, D., Belloni, C., & Hull, N.M. (2024). Innovative microbial water quality management in water distribution systems using in-pipe hydropowered UV disinfection: Envisioning futuristic water-energy systems. *Environmental Technology*, 46(7), 1045–1061. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2375008> [in English].
4. Neugebauer, M., Glowacki, S., & Kolomanski, K. (2023). Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*, 13, 17799. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45203-2> [in English].
5. Xiong, Q., Peng, S., Chen, Y., & Liu, J. (2024). Enhanced NSGA-II algorithm based on novel hybrid crossover operator for bi-objective reservoir operation optimization. *Scientific Reports*, 14, 30419. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80419-w> [in English].
6. Chew, I.M., Juwono, F.H., & Wong, W.K. (2022). GA-based optimization for multivariable level control system: A case study of multi-tank system. *Engineering Journal*, 26(5), 25–38. <https://doi.org/10.4186/ej.2022.26.5.25> [in English].
7. Mirza, K., & Farzi, A. (2024). Optimization of PID controller for three tanks system by MATLAB/Simulink/genetic algorithm. *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 10 (3), 25–33. <https://doi.org/10.23918/eajse.v10i3p3> [in English].
8. MathWorks Inc. (n.d.). Write Level-2 MATLAB S-Functions – MATLAB & Simulink Documentation [Electronic resource]. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/writing-level-2-matlab-s-functions.html> [in English].
9. Subbian, S., Natarajan, P., & Murugan, C. (2023). Circular economy-based multi-objective decentralized controller for activated sludge wastewater treatment plant. *Frontiers in Chemical Engineering*, 5, 1235125. <https://doi.org/10.3389/fceng.2023.1235125> [in English].
10. Derzhavnyi standart Ukrainy (DSTU) 7525:2014. (2015). Voda pytna. Vymohy ta metody kontroliuvannia yakosti [Drinking water. Requirements and methods of quality control]. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].

Дяченко Вадим Володимирович – магістрант кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну. E-mail: [diachenko.vv@knutd.edu.ua](mailto:diachenko.vv@knutd.edu.ua), ORCID: 0009-0002-3709-8278.

Сукало Максим Леонідович – доктор філософії з галузі «Автоматизація та приладобудування», старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну. E-mail: [sukalo.ml@knutd.edu.ua](mailto:sukalo.ml@knutd.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3437-8290.

Лебеденко Юрій Олександрович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну. E-mail: [lebedenko.yo@knutd.edu.ua](mailto:lebedenko.yo@knutd.edu.ua), ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Diachenko Vadym Volodymyrovych – Master's Student at the Department of Information and Computer Technologies of the Kyiv National University of Technologies and Design. E-mail: [diachenko.vv@knutd.edu.ua](mailto:diachenko.vv@knutd.edu.ua), ORCID: 0009-0002-3709-8278.

Sukalo Maksym Leonidovych – PhD in Automation and Instrumentation, Senior Lecturer at the Department of Information and Computer Technologies at the Kyiv National University of Technologies and Design. E-mail: [sukalo.ml@knutd.edu.ua](mailto:sukalo.ml@knutd.edu.ua), ORCID: 0000-0003-3437-8290.

Lebedenko Yurii Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information and Computer Technologies at the Kyiv National University of Technologies and Design. E-mail: [lebedenko.yo@knutd.edu.ua](mailto:lebedenko.yo@knutd.edu.ua), ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Отримано: 10.11.2025

Рекомендовано: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

