

УДК 658.012

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/31>**Півторак Д.О.**<https://orcid.org/0000-0003-3708-5610>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лакоза С.Л.<https://orcid.org/0000-0001-6354-1611>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скорик Є.В.<https://orcid.org/0009-0003-7511-2322>

Акціонерне товариство «Науково-технічний комплекс «Електронприлад»»

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВОДИ

Стан питної та технічної води прямо впливає на здоров'я населення, ефективність роботи промислових об'єктів і збереження екологічної рівноваги. У теперішніх умовах зростає потреба у впровадженні сучасних автоматизованих систем, здатних забезпечити комплексну оцінку якості води. Розвиток і вдосконалення таких систем пов'язано із використанням новітніх датчиків та алгоритмів обробки даних, що підвищують ефективність моніторингу й оптимізації процесів водоочищення. Аналіз наукових публікацій дозволив визначити, що найбільш перспективним шляхом розвитку вдосконалення автоматизованих систем покращення якості води є інтеграція системи до Інтернету речей, що надає широкі можливості контролю та збору даних про параметри води у реальному часі. У роботі приведені структурно-функціональна схеми автоматизації та структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води. Ці схеми показують загальні технічні рішення, які були використані на першому етапі проектування системи. Автоматизована система покращення якості води включає в себе наступні основні елементи: первинний резервуар; блок попереднього фільтрування; основні ємності для очищеної води; системи та контури остаточного очищення; підсистема подачі води споживачу, яка доставляє очищену воду до точки споживання; мікроконтролер та набір датчиків. Було виконано макетування, калібрування та випробування частини спроектованої системи, а саме зібрано макет підсистеми моніторингу для автоматизованої системи (без урахування фільтрів). Він містить центральний модуль Arduino Nano, датчик кислотності PH0-14 probe, датчик каламутності TS 300B, датчик температури DS18B20 та датчик солоності DFRobot TDS Meter V1.0. Обрані компоненти є простими в експлуатації, широкодоступними та мають невисоку ціну. Для макету підсистеми моніторингу розроблена схема підключення датчиків до плати Arduino Nano. Приведено експериментальні дані та оцінено калібровочні коефіцієнти лінійних моделей вихідних сигналів датчиків. У статті описані рекомендації щодо вибору фільтрів води відповідно до можливих завдань чи сценаріїв використання автоматизованої системи для покращення якості води.

Ключові слова: якість води, комплексна оцінка, автоматизована система, калібрування, тестування датчиків.

Постановка проблеми. Контроль якості води є одним із ключових завдань сьогодення, адже від стану питної та технічної води безпосередньо залежать здоров'я населення, ефективність роботи промислових об'єктів і збереження екологічної рівноваги. За умов посилення антропогенного

навантаження, кліматичних змін і обмеженості природних ресурсів зростає потреба у впровадженні сучасних автоматизованих систем, здатних забезпечити швидку, точну та комплексну оцінку якості води. Розвиток і вдосконалення таких систем із використанням новітніх датчиків та алго-

ритмів обробки даних сприятимуть підвищенню ефективності моніторингу й оптимізації процесів водоочищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теперішній час для контролю якості води отримали широке застосування методи моніторингу, які дозволяють отримувати більш достовірні та оперативні дані про стан якості води в реальному часі.

Одними з таких методів є традиційні методи, до яких відносяться [1, с.33]:

1. Відбір проб з водних об'єктів з подальшим проведенням лабораторних досліджень, який є одним з найпоширеніших з традиційних методів.

2. Польові тестові засоби, зокрема тест-смужки та портативні аналізатори, які дають змогу оперативно оцінювати окремі хімічні параметри, такі як значення рН, вміст розчиненого кисню, електролітів і токсичних компонентів.

Другим шляхом проведення моніторингу водного середовища є цифрові методи, які передбачають використання автоматизованих систем (наприклад, системи з датчиками, які мають можливість працювати в режимі реальному часі та системи моніторингу з використанням сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення) [1, с.34].

У роботах [1, с.34; 2, с.10; 3, с82] зазначено низку недоліків застосування традиційних методів та наведені суттєві переваги цифрових систем контролю якості води в порівнянні з традиційними методами. Застосування сучасних цифрових технологій сприяє підвищенню точності, оперативності та ефективності спостережень, а також розширює можливості своєчасного виявлення забруднень і змін у стані водного середовища.

Аналіз наукових публікацій дозволив визначити основний напрямок розвитку та вдосконалення автоматизованих систем покращення якості води: застосування технологій Інтернет речей, що забезпечить підключення датчиків до мережі Інтернет та надасть можливість проводити контроль та збір даних про параметри води зі станції моніторингу [3, с.83; 4, с.58; 5, с.2].

Більшість досліджень, які були розглянуті у сучасних наукових публікаціях пропонують вдосконалення певних складових автоматизованих систем моніторингу певних параметрів води, без можливості гнучкого оперативного налаштування під конкретний об'єкт при забезпеченні невисокої вартості комплексу. Таким чином, розробка автоматизованого малогабаритного комплексу з гнучкою можливістю вибору/підключення

вимірювальних систем для оптимальної оцінки якості води шляхом оптимального підбору чутливих елементів є актуальним завданням. Розроблювальна система має бути простою та зрозумілою для використання та експлуатації широким колом невідготовлених осіб.

Постановка завдання. Метою статті є проектування автоматизованої системи для покращення якості води, фізичне моделювання первинних систем отримання інформації про параметри води.

Виклад основного матеріалу

Розроблення структурно-функціональної схеми автоматизації

Проектування автоматизованих систем є складним інтегральним процесом, який має враховувати велику кількість факторів, що визначаються об'єктом автоматизації, необхідним рівнем автоматизації, вимогами діючих нормативних документів, вимогами споживача чи замовника та існуючим переліком технічних засобів для втілення системи у реальну працюючу технічну систему. При цьому при реалізації комплексу мають застосуватися добре відомі рішення, засоби які широкодоступні і наявні на ринку. Використовувані технічні компоненти мають одночасно відповідати сучасному рівню систем автоматизації, які використовують мікропроцесорні засоби, і при цьому обране рішення має мати високі економічні показники, бути уніфікованим і досить простим для обслуговування інженерним персоналом різного рівня кваліфікації. Ці ідеї та підходи при проектуванні автоматизованої системи для покращення якості води мають бути відображені у відповідному технічному рішенні. На першому етапі проектування системи це дозволяють відобразити різноманітні схеми, зокрема структурна та структурно-функціональна схеми автоматизації.

Автоматизована система покращення якості води включає в себе такі основні елементи:

1. Первинний резервуар, куди вода надходить із зовнішньої мережі через керовану засувку.
2. Блок попереднього фільтрування, що виконує первинну підготовку води перед подальшим очищенням.
3. Основні ємності для очищеної води, в яких зберігається вода після проходження фільтрації.
4. Системи та контури остаточного очищення, що забезпечують доведення якості води до встановлених стандартів.
5. Підсистема подачі води споживачу, яка доставляє очищену воду до точки споживання.

На рис. 1 зображена структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води.

Структурно-функціональна схема автоматизації системи для покращення якості води, відповідно до структурної схеми (на рис. 1), наведена на рис. 2 [6, с.34] та складається з таких елементів:

1. Первинний резервуар, на якому встановлені датчики:

1) Датчик рівня LE (1a) – відповідає за підтримання рівня води у первинному резервуарі до заданої межі. Регулювання здійснюється контуром, який включає: датчик рівня LE (1a), прилад дистанційної передачі сигналу LT (1б), елемент системи LCA (1в), що сигналізує користувачу та має силові виходи до двигуна 2, який керує вхідною засувкою.

2) Датчик температури ТТ – передає інформацію на промисловий логічний контролер (ПЛК) та персональний комп’ютер (ПК) для обробки, реєстрації й інформування користувача про значення температури.

3) Датчик складу QE (4a) – вимірює каламутність води в первинному резервуарі.

2. подача на блок первинного фільтрування.

подача води здійснюється нагнітачем з двигуном М (лінія 5), який забезпечує потік до засувки 32 та 33. Тиск у магістралі контролюється датчиком диференційного тиску, що дозволяє фіксувати показники після первинного резервуару.

Розгалуження потоку:

• Якщо каламутність перевищує норму – відкривається засувка 32, вода подається на фільтр

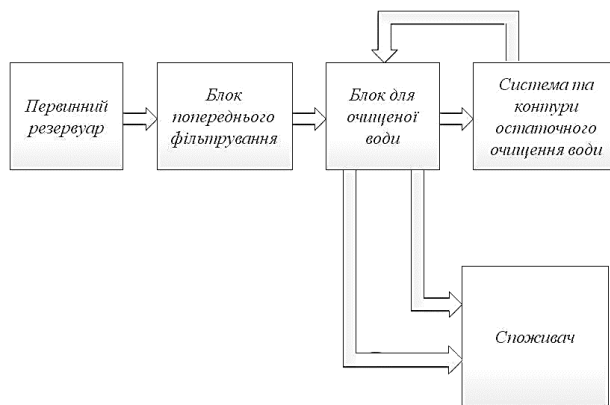


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води

швидкої дії з комбінованим завантаженням Ф1.

• Якщо показники в межах норми – вода йде через 33 до ємності з очищеною водою.

3. Блок з очищеною водою (БОВ), на який установлені:

1) датчик рівня LE (7a), який контролює заповнення. У контур регулювання входять: датчик рівня LE (7a); приладу дистанційної передачі сигналу LT (7б); елемент системи LCA (7в), сигналізує та керує приводами 32 і 33. Команди передає ПЛК по лінії С.

2) датчики якості води QE: QE (8a) – датчик кислотності, QE (9a) – датчик вмісту солей, QE (10a) – датчик каламутності. Дані надходять через компоненти QT (8б–10б) на ПЛК і ПК.

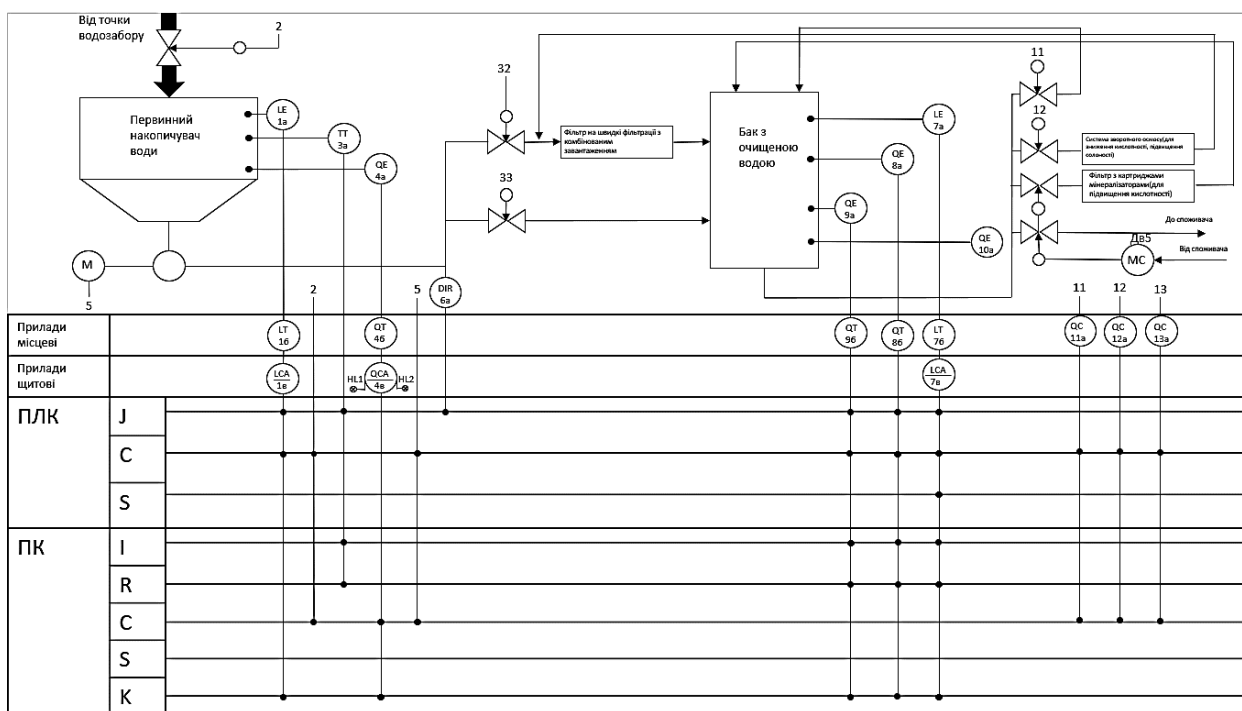


Рис. 2. Схема автоматизації системи для покращення якості води

Алгоритм обробки в ПЛК:

- Оцінюється якість води за параметрами.
- За потреби виконується повторна фільтрація через систему остаточного очищення, яка керується силовими модулями QC (11в–13в).

4. Системи та контури остаточного очищення води складаються з: фільтрів з картриджами-мінералізаторами, які підвищують кислотність; системи зворотного осмосу, яка знижує рН та підвищує вміст солей.

5. Підсистема подачі води до споживача. Подача води здійснюється через вихідну помпу з двигуном ДВ5, керовану дистанційною електричною системою.

Вибір чутливих елементів підсистеми моніторингу для автоматизованої системи покращення якості води

Макет підсистеми моніторингу для автоматизованої системи (без урахування фільтрів) (рис. 3) містить мікроконтролер, датчик кислотності, датчик каламутності, датчик температури та датчик солоності.

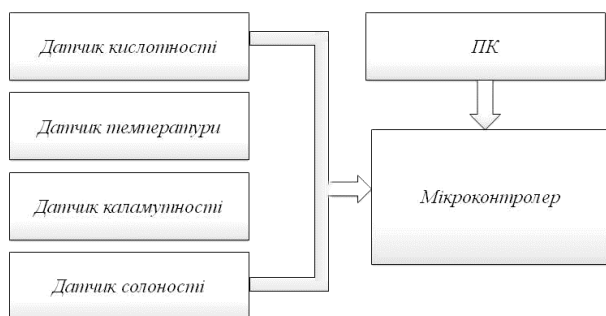


Рис. 3. Структурна схема підсистеми моніторингу

На основі проведеного огляду та аналізу існуючих компонентів [6, с.35-51; 7, с.201-202], для розробки макету підсистеми моніторингу для автоматизованої системи покращення якості води було обрано:

1. Центральний модуль – Arduino Nano.

Усі датчики передають аналогові сигнали, які обробляються Arduino Nano. Він також виконує функцію передачі зібраних даних на персональний комп'ютер для подальшої обробки й візуалізації.

2. Датчик кислотності PH0-14 probe. Даний датчик обрано завдяки його сумісності з мікроконтролерною платою Arduino Nano. Він забезпечує точний моніторинг рівня кислотності води (рН), який є критично важливим параметром для визначення її якості.

3. Датчик температури DS18B20. Вибір цього датчика зумовлений його оптимальним діапазо-

ном вимірювання температури; герметичністю, що дозволяє використовувати його безпосередньо у водному середовищі; доступною вартістю.

Датчик DS18B20 дозволяє здійснювати постійний контроль температури води в режимі реального часу.

4. Датчик каламутності TS 300В. Даний датчик обрано із-за його простоти в експлуатації, широкоступність та невисоку ціну.

Датчик TS 300В дає змогу дистанційно відстежувати рівень каламутності води. Це особливо важливо у випадках, коли візуальна оцінка неможлива.

5. Датчик солоності DFRobot TDS Meter V1.0. Даний датчик використовується для вимірювання загального вмісту розчинених солей у воді (TDS). Він дозволяє оперативно визначати такий важливий показник якості води, як її рівень мінералізації. DFRobot TDS Meter V1.0 сумісний із мікроконтролерами платформи Arduino, що робить його зручним для інтеграції в систему автоматизованого моніторингу.

На рис.4 зображена схема підключення датчиків до плати Arduino Nano [6, с. 54].

Тестування та калібрування датчиків підсистеми моніторингу автоматизованої системи для покращення якості води

Експериментальні дослідження було виконано за допомогою макету автоматизованої системи. На рис. 5 наведено схематичне зображення розробленого прототипу, де 1 – датчик температури; 2 – датчик кислотності; 3 – датчик солоності; 4 – датчик каламутності [6, с.66].

1) Калібрування та перевірка датчика солоності DFRobot TDS Meter V1.0

Для калібрування датчика солоності було проведено 5 вимірів із заздалегідь підготовленими сольовими розчинами 0, 250, 500, 1000, 1500 мг/л. У сольовий розчин було занурено щупи та порівняно отримані результати з еталонами. Еталонні значення солоності формувалися згідно методики описаної в роботі [8]. Результати вимірювання наведено в табл. 1

Використовуючи експериментальні дані було побудовано статичну. За експертною оцінкою дослідника видно, що отримана характеристика може бути апроксимована обраною лінійною функцією $y = kx + y_0$ з високою точністю. Була виконана оцінка масштабного коефіцієнта (k) та зміщення нуля (y_0). Масштабний коефіцієнт – $k=0.99941$. Зміщення нуля $y_0=9.181$ показує невелике систематичне відхилення (похибку) результатів, яке необхідно враховувати при калібруванні.

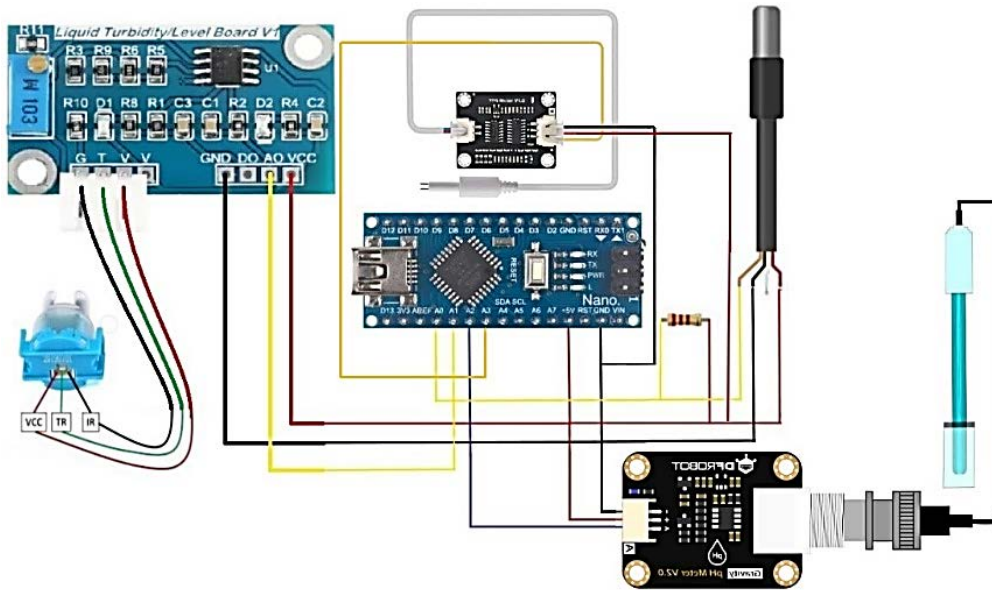


Рис. 4. Схема підключення датчиків до плати Arduino Nano

Таблиця 1

Результати вимірювання для датчика солоності

Еталонне значення (мг/л)	Отримані результати (мг/л)
0	15
250	263
500	489
1000	1021
1500	1506

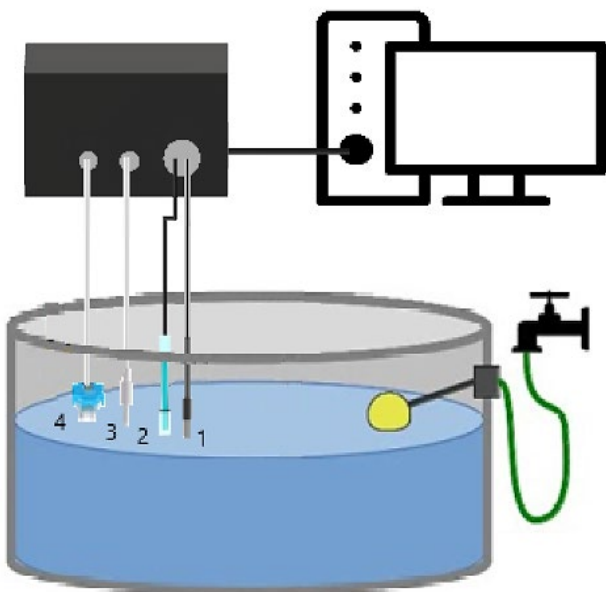


Рис. 5. Схематичне зображення прототипу

2) Калібрування та перевірка датчика кислотності PH0-14

Для калібрування та перевірки працездатності датчика кислотності було проведено 3 виміри зі заздалегідь підготовленими розчинами з кислотністю 4, 7, 10 рН, зображених на рис. 6.

У розчини було занурено щупи та порівняно отримані результати з еталонними. Еталонні значення кислотності формувалися згідно методики описаної в роботі [9]. Результати наведено в табл. 2.



Рис. 6. Розчини з різною кислотністю: а) 4 рН; б) 7 рН; в) 10 рН

Таблиця 2

Отримані результати датчика кислотності

Еталонне значення(pH)	Отримані результати (pH)
4	4.2
7	6.9
10	10.4

Відповідно до даних з таблиці 2 було оцінено коефіцієнти статичної характеристики ($y = kx + y_0$) аналогічно датчику солоності. Масштабний коефіцієнт становить $k=1.0333$ і свідчить про невелике завищення вимірювань датчика відносно еталонних значень (на 3,33%). Для корекції вихідні дані датчика треба домножити на коефіцієнт $1/k$.

Зміщення ($y_0 = -0.0667$) є мінімальним і майже не впливає на точність.

3) Перевірка працездатності датчика каламутності TS 300B

Для перевірки працездатності датчика каламутності було проведено 10 вимірів з заздалегідь підготовленими мильними розчинами з додаванням різної кількості рідкого мила. Відповідна кількість доданого в розчин рідкого мила та отримані результати вимірювання зануреного у мильні розчини датчика каламутності приведені в таблиці 3. Використовувані розчини показано на рис. 7. Експеримент виконувався відповідно до роз'яснень стосовно визначення кількості одиниць каламутності NTU у роботі [10].

Рекомендації щодо використання фільтрів

Важливим елементом для роботи автоматизованої системи покращення якості води є використовувані в ній фільтри. Використовуючи функціональну схему автоматизації системи моніторингу параметрів якості води, можна надати наступні

Таблиця 3

Результати вимірювання з датчика каламутності

Вода з рідким милом (г)	Отримані результати(NTU)
0	34
35	104
70	207
105	263
140	273
210	374
245	377
280	432
315	439
350	470

рекомендації щодо вибору фільтрів відповідно до виконуваних завдань чи сценаріїв використання розглядуваної системи [6, с.84].

1. Фільтр для швидкої фільтрації з комбінованим завантаженням (Ф1):

Призначення: Видалення великих суспендованих часток та зниження каламутності води.

Випадки використання:

- Калібрування датчика каламутності QE (4a) (рис.2) показує значення каламутності вище допустимого рівня.
- Вода в первинному накопичувачі містить візуально помітні забруднення.
- Необхідно швидко попереднє очищення перед подальшою тонкою обробкою.

Переваги:

- Швидке очищення великих об'ємів води.
- Можливість роботи з високим ступенем забрудненості.

2. Фільтри з картриджами-мінералізаторами:



Рис. 7. Розчини з різною кількістю рідкого мила

Призначення: Підвищення кислотності води (корекція рівня рН).

Випадки використання:

- Датчик кислотності QE (8a) (рис.2) фіксує значення рН нижче оптимального (наприклад, для питної води це 6.5–8.5).
- Необхідно покращити органолептичні властивості води (смак, запах).

Переваги:

- Дозволяє відновити мінеральний склад води.
- Простий у обслуговуванні та заміні картриджів.

3. Система зворотного осмосу:

Призначення: Видалення розчинених солей, важких металів, бактерій та зниження рівня рН.

Випадки використання:

- Датчик солей QE (9a) (рис.2) показує концентрацію вище допустимої норми.
- Вода містить надлишок органічних і неорганічних домішок, які не усуваються іншими методами.
- Необхідно забезпечити глибоке очищення для лабораторних або медичних потреб.

Переваги:

- Гарантує найвищий рівень очищення системи для підвищення якості води.

- Ефективний для видалення домішок навіть у дуже забрудненій воді.

Недоліки:

- Вимагає великих витрат енергії.
- Знижує загальну мінералізацію води, що може вимагати повторного збагачення корисними елементами.

Висновки. У даній роботі:

1. Розроблена структурна та структурно-функціональна схеми автоматизованої системи для покращення якості води. Вони відображають логіку взаємодії між окремими компонентами системи, способи їх підключення, а також послідовність автоматизованих процесів системи. Схеми демонструють, як реалізується автоматичний збір, обробка, збереження даних та автоматизовані зворотні зв'язки по параметрам води, що дозволяє забезпечити ефективний контроль якості води в режимі реального часу.

2. Виготовлено макет підсистеми моніторингу автоматизованої системи для покращення якості води, який забезпечує можливість вимірювання температури, каламутності, кислотності, вмісту солей.

3. Проведено тестування та калібрування датчиків підсистеми моніторингу автоматизованої

Список літератури:

1. Корніюк А.В. Цифровий моніторинг якості води, виклики та рішення / А.В. Корніюк, І.Г. Пацева // Екологічні науки. 2023. № 4 (49). С. 32-37.
2. Смарт система спостереження якості води // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Личук Інна Андріївна // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерноінформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-42 // Тернопіль, 2025. С. 70.
3. Корпильов Д. Розробка інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів / Д. Корпильов, А. Здобицький, О. Мокрицька, В. Чернюх // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2025. Вип. 7, № 1. С.81-93.
4. Защепкіна Н.М. Розробка прототипу інформаційно-вимірювального системи для експрес-вимірювання нітратів в рідинах / Н.М. Защепкіна, Д. Мельниченко // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». 2023. №1. С. 58-63. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-6>
5. D. Korpuljov, A. Zdobytskyu, U. Marikutsa, V. Tomyuk, R. Panchak. Interactive system of surface water monitoring using IoT technologies // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2022. Вип. 4, № 1. С. 1–8. <https://doi.org/10.23939/cds2022.01.001>
6. Скорик Є.В. Автоматизована система комплексного моніторингу параметрів якості води»: дипломна робота ... магістра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, Київ, 2024, 119 с.
7. Скорик Є.В., Півторак Д.О. Автоматизована система контролю якості води. *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, С. 201-204.
8. ISO 10359-2:2017 Water quality –Determination of dissolved salts –Part 2: Conductimetric method. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/18417/535c19a2556a42e880054117cd3c52ac/ISO-10359-2-1994.pdf>.
9. ISO 10523:2012 Water quality –Determination of pH. URL: http://higiene.unex.es/Bibliogr/ISO_BS_USDA/ISO_BS/BS%20EN%20ISO/BS%20EN%20ISO%2010523-2012.pdf.
10. How to interface turbidity module with arduino | complete tutorial | DIY Turbidity meter. URL: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=BYzRiUvX6I&ab_channel=EDISONSCIENCECORNER.

Pivtorak D.O., Lakoza S.L., Skoryk Ye.V. DESIGN AND PHYSICAL MODELING OF THE IMPROVING WATER QUALITY AUTOMATED SYSTEM

The state of drinking and industrial water directly affects public health, the operational efficiency of industrial facilities, and the preservation of ecological balance. In current conditions, there is a growing need for the implementation of modern automated systems capable of providing a comprehensive assessment of water quality. The development and improvement of such systems are linked to the use of the latest sensors and data processing algorithms that increase the efficiency of monitoring and optimization of water treatment processes. Analysis of scientific publications has determined that the most promising path for improving automated water quality enhancement systems is integration into the Internet of Things, which provides broad opportunities for control and real-time data collection on water parameters. The work presents the structural-functional automation diagrams and the structural diagram of the automated water quality improvement system. These diagrams demonstrate the general technical solutions used during the first stage of system design. The automated water quality improvement system includes the following main elements: a primary reservoir; a pre-filtration unit; main tanks for purified water; systems and circuits for final treatment; a water supply subsystem that delivers purified water to the point of consumption; a microcontroller; and a set of sensors. Prototyping, calibration, and testing of a part of the designed system were performed, specifically, a prototype of the monitoring subsystem for the automated system (excluding filters) was assembled. It contains an Arduino Nano central module, a PH0-14 pH probe, a TS 300B turbidity sensor, a DS18B20 temperature sensor, and a DFRobot TDS Meter V1.0 salinity sensor. The selected components are easy to operate, widely available, and low-cost. For the monitoring subsystem prototype, a connection diagram for the sensors to the Arduino Nano board has been developed. Experimental data are presented, and the calibration coefficients of linear models for the sensor output signals are evaluated. The article describes recommendations for selecting water filters according to possible tasks or usage scenarios of the automated water quality improvement system.

Keywords: water quality, complex estimation, automated system, calibration, sensor testing.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026