

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-67>

УДК 004.9 : 004.78

ГОВОРУЩЕНКО ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

ВОЙЧУР ЮРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

e-mail: voichury@khmnu.edu.ua

КОЛЕСНИК МАКСИМ

Хмельницький національний університет

e-mail: kolesnickmaksim700@gmail.com

БАЛАН АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: abalan@ukr.net

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВОДИ

В рамках дослідження проаналізовано принципи побудови кіберфізичної системи моніторингу стану води, обґрунтовано вибір електронних компонентів, сенсорів, контролерів та засобів зв'язку, а також розроблено прототип пристрою, що функціонує в автономному режимі. Ключовими аспектами розробки є енергозбереження, точність вимірювань, модульність та адаптивність системи.

Успішно реалізовано повноцінну віртуальну модель пристрою на основі мікроконтролера Arduino Uno, який виступає центральним обчислювальним та керуючим елементом системи. Для симуляції фізичних процесів та взаємодії електронних компонентів було обрано інтерактивне онлайн-середовище Tinkercad. Ключовими функціональними модулями віртуального пристрою стали віртуальні потенціометри, які імітують аналогові сигнали з датчиків. Інформативний рідкокристалічний дисплей (LCD 16x2) з інтерфейсом I2C, який забезпечує зручне та ефективне виведення текстової та числової інформації, також є невід'ємною частиною віртуальної системи. У системі також активно застосовуються світлодіоди різних кольорів (червоний, синій, зелений) як візуальні індикатори перевищення встановлених порогів для контрольованих параметрів, що дозволяє оперативно оцінювати стан водного середовища. Підключення усіх компонентів здійснюється через віртуальну макетну плату (breadboard), що дозволяє зручно організувати спільну шину живлення та забезпечити ефективну взаємодію між модулями без паяння.

Результати роботи системи, отримані в ході симуляції, наочно демонструють її здатність оперативно реагувати на зміни значень параметрів, які симулюються потенціометрами, шляхом активації відповідних світлодіодів (зелений для нормального стану, червоний/синій для попередження) та оновлення інформації на екрані дисплея.

Ключові слова: елементна база, проєктування схеми, кіберфізична система., логіка системи, функціонування системи, електрична принципова схема.

HOVORUSHCHENKO TETYANA, VOICHUR YURIY, KOLESNIK MAKSYM, BALAN ANDRIY

Khmelnytskyi National University

FUNCTIONAL AND LOGICAL DESIGN OF THE HARDWARE OF THE CYBER-PHYSICAL WATER

The study analyzed the principles of constructing a cyber-physical system for monitoring water conditions, justified the selection of electronic components, sensors, controllers, and communication devices, and developed a prototype device that operates in autonomous mode. The key aspects of the development are energy efficiency, measurement accuracy, modularity, and system adaptability.

A full-fledged virtual model of the device based on the Arduino Uno microcontroller, which acts as the central computing and control element of the system, has been successfully implemented. The interactive online environment Tinkercad was chosen to simulate physical processes and the interaction of electronic components. The key functional modules of the virtual device are virtual potentiometers that simulate analog signals from sensors. An informative liquid crystal display (LCD 16x2) with an I2C interface, which provides convenient and efficient output of text and numerical information, is also an integral part of the virtual system. The system also actively uses LEDs of different colors (red, blue, green) as visual indicators of exceeding the set thresholds for controlled parameters, which allows you to quickly assess the state of the aquatic environment. All components are connected via a virtual breadboard, which allows for convenient organization of a common power bus and ensures effective interaction between modules without soldering.

The results of the system's operation obtained during the simulation clearly demonstrate its ability to respond quickly to changes in parameter values simulated by potentiometers by activating the corresponding LEDs (green for normal status, red/blue for warning) and updating the information on the display screen.

Keywords: element base, circuit design, cyber-physical system, system logic, system functioning, electrical schematic diagram.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 29.05.2025

Вступ

Водні ресурси є абсолютно незамінним елементом для забезпечення сталого функціонування та прогресивного розвитку людської цивілізації, виступаючи ключовою умовою для задоволення життєво важливих потреб не лише населення, але й стратегічно важливих галузей економіки, таких як енергетика, промисловість та сільське господарство. Актуальність дослідження зумовлена критичною

роллю якості води як ключового індикатора екологічного стану та здоров'я населення в умовах посилення антропогенного впливу та глобальних кліматичних змін. Нагальною потребою є забезпечення ефективного моніторингу водних ресурсів, впровадження ефективних, надійних та економічно обґрунтованих систем ретельного та безперервного моніторингу стану водного середовища на різних рівнях – від джерел питного водопостачання до великих річкових басейнів та озер – з метою забезпечення екологічної безпеки, своєчасного виявлення негативних тенденцій на ранніх стадіях їхнього розвитку та оперативного реагування на потенційні загрози для здоров'я населення та крихких водних екосистем [1, 2].

Перспективним підходом до вирішення цієї задачі є впровадження кіберфізичних систем, що інтегрують фізичні процеси з інформаційно-комунікаційними технологіями для безперервного контролю параметрів водного середовища (температура, рН, електропровідність, мутність, концентрація розчиненого кисню) [3, 4]. Впровадження кіберфізичної системи для моніторингу стану води є складним завданням, що потребує комплексного підходу, який охоплює не лише інженерні рішення, але й глибоке розуміння природних та експлуатаційних обмежень, що безпосередньо впливають на загальну ефективність та стабільність її функціонування [5, 6].

Метою даного дослідження є забезпечення здійснення вимірювання зазначених параметрів шляхом створення технічно надійної та енергоефективної платформи для стабільного збору, обробки та передачі екологічних даних.

Вибір елементної бази для апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу стану води

Активне впровадження кіберфізичних систем для здійснення безперервного моніторингу якісного стану водних ресурсів вимагає ретельного, науково обґрунтованого та економічно доцільного вибору апаратних компонентів, які є первинною та найважливішою ланкою для збору достовірних екологічних даних безпосередньо у досліджуваному водному середовищі.

Кіберфізична система працює на трьох основних рівнях:

1. Нижній рівень складається з датчиків, які безпосередньо вимірюють фізичні та хімічні параметри води, такі як рН, температура, рівень забруднень, концентрація розчинених солей, кисню, а також швидкість потоку і рівень води.

2. Середній рівень – це система контролерів, які здійснюють збір і передачу даних від датчиків до центральної бази даних або до програмного забезпечення для подальшої обробки.

3. Верхній рівень – аналітичне програмне забезпечення, яке здійснює обробку отриманих даних, аналізує їх і формує прогнози чи рекомендації. Це програмне забезпечення може використовувати алгоритми для виявлення аномалій або змін у водних ресурсах, а також для автоматизації прийняття рішень.

Основними параметрами, які буде визначати розроблювана кіберфізична система, є: рівень води, температура води, кислотно-лужний баланс води, хімічний склад води, швидкість потоку води, наявність домішок у воді.

Для вимірювання рівня води у кіберфізичній системі моніторингу стану води використовуватимемо датчик Risinglink Smart Monitor (рис. 1), який має гарне співвідношення ціни та діапазону вимірювань, автономне живлення та комунікацію через поширений протокол Wi-Fi, а також є рішенням з мобільним сповіщенням, що є дуже зручним для реалізації кіберфізичної системи.



Рис. 1. Датчик Risinglink Smart Monitor для вимірювання рівня води

Для реалізації кіберфізичної системи моніторингу стану води використовуватимемо датчик НОВО MX2201 (рис. 2) для вимірювання температури води. Водонепроникний датчик, який використовує Bluetooth для передачі точних вимірювань температури безпосередньо на мобільний пристрій або комп'ютер з Windows. Розроблений для довговічності, ідеально підходить для вимірювання температури в струмках, озерах, океанах та ґрунтових середовищах.



Рис. 2. Датчик НОВО MX2201 для вимірювання температури води

Для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204) (рис. 3), який має низьку ціну та бездротове з'єднання через Bluetooth, що забезпечує зручність у використанні та передачі даних. Бездротовий цифровий датчик pH PASCO дозволяє отримувати дані про рівень кислотності розчину безперервно або через заданий часовий інтервал у процесі дослідження якості води, вивчення побутових рідин тощо.



Рис. 3. Датчик PASCO Wireless pH Sensor (PS-3204) для вимірювання кислотно-лужного балансу (pH) води

Для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter (рис. 4), який є зручним для мобільного використання, має бездротове підключення та забезпечує можливість вимірювання до п'яти параметрів одночасно.



Рис. 4. Датчик Yosemitech Y4001 Handheld Multiparameter Water Quality Meter для визначення хімічного складу води

Для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик AquaQube 1000 для вимірювання швидкості потоку води. AquaQube 1000 – це електромагнітний датчик потоку, призначений для вимірювання витрати води в різних сферах застосування. Зазвичай такі датчики мають компактну і міцну конструкцію, часто мають циліндричний корпус з електричними роз'ємами для інтеграції в системи моніторингу. Вони спроектовані таким чином, щоб витримувати зовнішні умови і забезпечувати точні вимірювання витрати.

Для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик Aqua TROLL 500 (рис. 5) для визначення наявності домішок у воді. Багатопараметричний зонд Aqua TROLL 500 – це бездротовий багатозондовий зонд, який спрощує збір даних, одночасно зменшуючи кількість годин, необхідних для польових робіт. Має автоматичне налаштування та швидку реакцію, що пришвидшує відбір проб, а автоматизований збір даних усуває необхідність запису даних у польові журнали.



Рис. 5. Датчик Aqua TROLL 500 для визначення наявності домішок у воді

Нижній рівень кіберфізичної системи моніторингу водних ресурсів є основою всієї архітектури та складається з інтегрованої мережі сенсорів, які встановлюються безпосередньо у водоймах або трубопроводах.

Ефективне функціонування нижнього рівня є критичним для достовірності даних і, відповідно, для якості моніторингу та управління водними ресурсами. Правильний вибір типу сенсорів, точок встановлення та стабільності передачі даних визначає надійність усієї кіберфізичної системи.

Для формування середнього рівня кіберфізичної системи моніторингу стану води використовуватимемо мікроконтролер Arduino Uno – компактну електронну плату на базі чіпа ATmega328P, яка широко використовується в проєктах з автоматизації, робототехніки та розумних систем. Він має вбудований USB-інтерфейс для програмування, працює на частоті 16 МГц і живиться переважно від 5 В. Завдяки наявності 14 цифрових входів/виходів і 6 аналогових входів, плата дозволяє підключати різноманітні датчики, виконавчі пристрої й модулі зв'язку. Arduino Uno легко програмується через середовище Arduino IDE, яке підтримує мову, схожу на C++. Простота використання, доступність великої кількості бібліотек і відкритість платформи зробили її ідеальним вибором для навчання та побудови прототипів кіберфізичних систем. Вона може працювати автономно або у складі більших розподілених систем, обробляючи дані з датчиків, приймаючи рішення і передаючи інформацію на сервер або до хмари..

Вибір стандарту передачі даних залежить від: типу датчиків (цифрові, аналогові, інтелектуальні), відстані до датчиків, потреб у швидкості обміну та стабільності зв'язку, енергоспоживання та умов розміщення.

Оскільки для більшості обраних раніше датчиків якості води рекомендовано використовувати Wi-Fi або Bluetooth, залежно від підтримки самим датчиком, то у проєктованій кіберфізичній системі моніторингу водних ресурсів оберемо стандарти передачі даних Wi-Fi та Bluetooth.

Функціонально-логічне проєктування апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу стану води

Зважаючи на певні об'єктивні складнощі, пов'язані з фізичним створенням повноцінного функціонального прототипу пристрою в умовах обмеженого лабораторного середовища на початковому етапі розробки, особливо з урахуванням необхідності точного калібрування сенсорів та проведення всебічних польових випробувань, практичну реалізацію початкової концепції було вирішено здійснити у віртуальному середовищі за допомогою інноваційної та надзвичайно зручної онлайн-платформи Tinkercad.

Отримані аналогові дані з основних віртуальних сенсорів послідовно та безперервно передаються на відповідні аналогові входні піни мікроконтролера Arduino UNO (рис. 6). Саме тут відбувається один з найважливіших етапів обробки: за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ці аналогові сигнали оцифровуються. Це перетворення дозволяє мікроконтролеру, який працює з цифровими даними, інтерпретувати й обробляти інформацію, що надходить з аналогових джерел. Після оцифрування дані піддаються первинній обробці відповідно до ретельно закладеного програмного алгоритму. Цей алгоритм є невід'ємною частиною основного циклу виконання програмної логіки, завантаженої в мікроконтролер і написаної мовою програмування C++. Вона відповідає за інтерпретацію сирих даних, їхню фільтрацію від можливих віртуальних "шумів" та підготовку для подальшого аналізу та відображення. Цей початковий етап обробки є критично важливим для забезпечення точності та надійності всіх подальших операцій віртуальної системи.

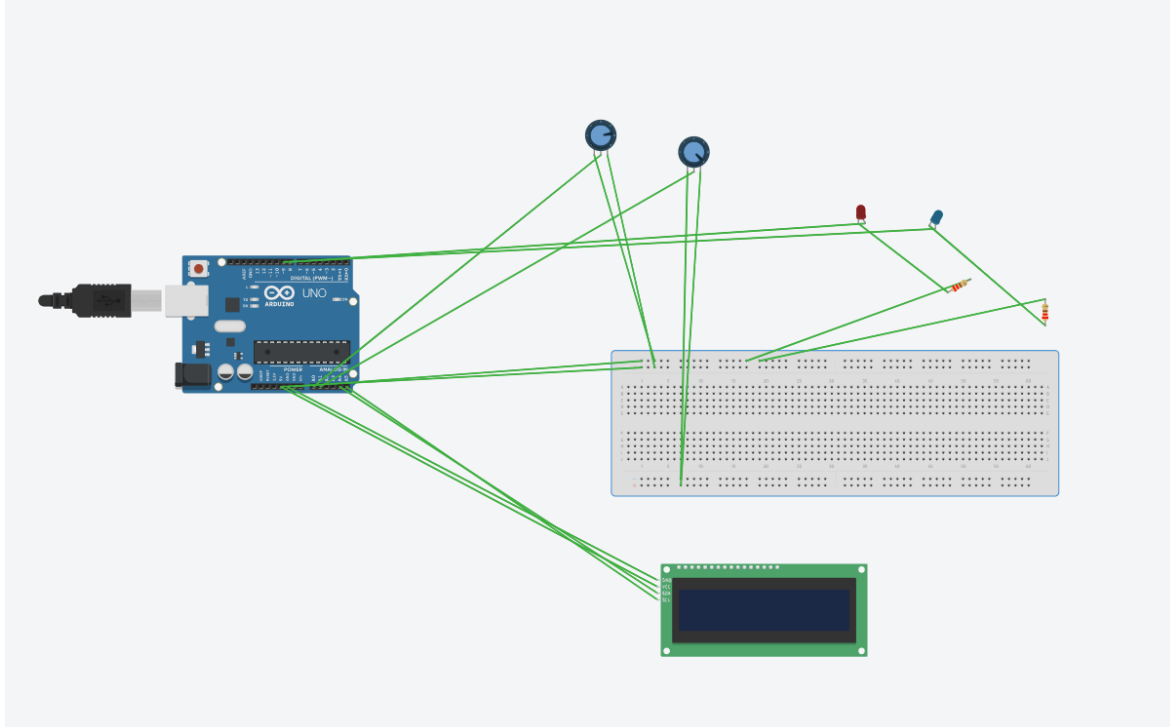


Рис. 6. Логіка підключення елементів апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу стану води

Запрограмований алгоритм, що безперервно виконується центральним мікроконтролером Arduino UNO, постійно здійснює ретельну перевірку отриманих оцифрованих значень з датчиків на предмет їхнього виходу за попередньо встановлені критичні межі, які визначають неприпустимі для нормального функціонування системи діапазони значень. Наприклад, якщо віртуальне значення pH опускається нижче критичної нижньої позначки в 6.5 (що свідчить про занадто кисле середовище) або піднімається вище небезпечного верхнього рівня в 8.5 (вказуючи на занадто лужне середовище), програмно активується віртуальний червоний світлодіод, що слугує чітким візуальним сигналом попередження оператора про потенційну небезпеку для стану віртуального водного середовища. Аналогічно, наприклад, якщо віртуальна температура води опускається нижче граничного мінімального значення в 10°C або перевищує критичну максимальну позначку в 35°C, програмно активується віртуальний синій світлодіод, інформуючи оператора про неприйнятні температурні умови, які можуть негативно вплинути на біологічні процеси у віртуальному водному середовищі. У випадку, коли параметри знаходяться в межах попередньо заданих безпечних діапазонів, програмно активується віртуальний зелений світлодіод, який сигналізує про стабільний та нормальний режим функціонування віртуальної системи та відсутність будь-яких критичних відхилень контрольованих параметрів.

Усі поточні віртуальні значення вимірюваних параметрів відображаються в режимі реального часу на віртуальному рідкокристалічному дисплеї (LCD), де також виводиться коротке, але інформативне текстове повідомлення, що відображає поточний стан віртуальної системи. Це текстове повідомлення може мати такі попередньо запрограмовані значення, як "OK" у випадку, коли всі контрольовані параметри знаходяться в межах заданих безпечних діапазонів, "Warning" у випадку наближення одного або обох параметрів до критичних меж, або "Danger" при виході одного або обох параметрів за встановлені безпечні діапазони, надаючи таким чином оператору миттєву візуальну інформацію про поточний стан контрольованого віртуального водного середовища та необхідність вжиття відповідних заходів.

Електрична принципова схема апаратної частини кіберфізичної системи представлена на рис. 7.

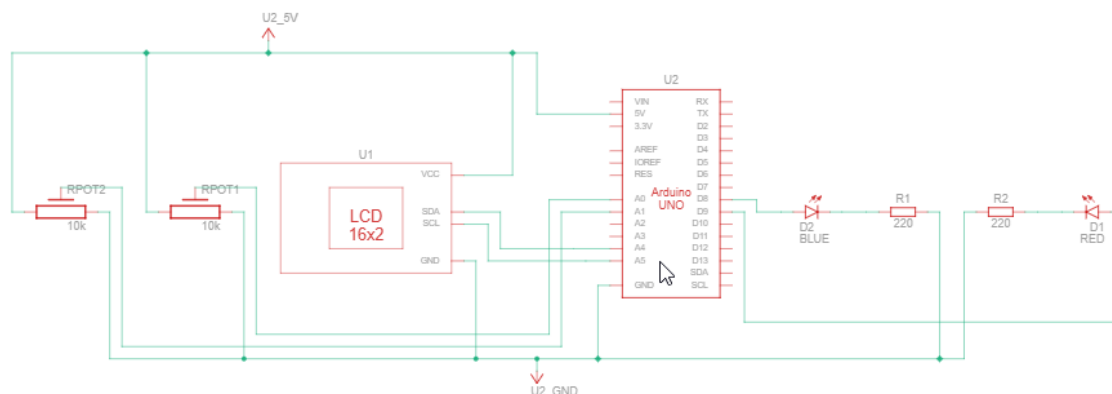


Рис. 7. Електрична принципова схема апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу стану води

Таким чином, розроблена детальна віртуальна схема в зручному середовищі Tinkercad повністю та наочно моделює основну логіку роботи майбутнього реального фізичного пристрою кіберфізичної системи моніторингу стану води, забезпечуючи ефективне візуальне та функціональне представлення всіх ключових етапів обробки первинної вхідної інформації та відповідної реакції системи на зміни контрольованих параметрів, що є цінним інструментом для подальшої, більш детальної розробки, оптимізації та всебічного тестування фізичного прототипу майбутньої реальної системи.

Висновки

В рамках дослідження проаналізовано принципи побудови кіберфізичної системи моніторингу стану води, обґрунтовано вибір електронних компонентів, сенсорів, контролерів та засобів зв'язку, а також розроблено прототип пристрою, що функціонує в автономному режимі. Ключовими аспектами розробки є енергозбереження, точність вимірювань, модульність та адаптивність системи.

Успішно реалізовано повноцінну віртуальну модель пристрою на основі мікроконтролера Arduino Uno, який виступає центральним обчислювальним та керуючим елементом системи. Для симуляції фізичних процесів та взаємодії електронних компонентів було обрано інтерактивне онлайн-середовище Tinkercad. Ключовими функціональними модулями віртуального пристрою стали віртуальні потенціометри, які імітують аналогові сигнали з датчиків. Інформативний рідкокристалічний дисплей (LCD 16x2) з інтерфейсом I2C, який забезпечує зручне та ефективне виведення текстової та числової інформації, також є невід'ємною частиною віртуальної системи. У системі також активно застосовуються світлодіоди різних кольорів (червоний, синій, зелений) як візуальні індикатори перевищення встановлених порогів для контрольованих параметрів, що дозволяє оперативно оцінювати стан водного середовища. Підключення усіх компонентів здійснюється через віртуальну макетну плату (breadboard), що дозволяє зручно організувати спільну шину живлення та забезпечити ефективну взаємодію між модулями без паяння.

Результати роботи системи, отримані в ході симуляції, наочно демонструють її здатність оперативно реагувати на зміни значень параметрів, які симулюються потенціометрами, шляхом активації відповідних світлодіодів (зелений для нормального стану, червоний/синій для попередження) та оновлення інформації на екрані дисплея.

Література

1. Molato M. R. D. AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol. 13, no. 2. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2022.0130265>.
2. Topping M., Kolok A. Assessing the Accuracy of Nitrate Concentration Data for Water Quality Monitoring Using Visual and Cell Phone Quantification Methods. *Citizen Science: Theory and Practice*. 2021. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.5334/cstp.346>.
3. Advancements in Industrial Cyber-Physical Systems: An Overview and Perspectives / K. Zhang et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1109/tii.2022.3199481>.
4. Tyagi A. K., Sreenath N. Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2021. Vol. 1. P. 22–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2021.12.002>.
5. Ardila A., Rodriguez M. J., Pelletier G. Spatiotemporal optimization of water quality degradation monitoring in water distribution systems supplied by surface sources: A chronological and critical review. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 337. P. 117734. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117734>.

-
6. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges / H. Yang et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 8. P. 1770. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14081770>.

References

1. Molato M. R. D. AquaStat: An Arduino-based Water Quality Monitoring Device for Fish Kill Prevention in Tilapia Aquaculture using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol. 13, no. 2.
2. Topping M., Kolok A. Assessing the Accuracy of Nitrate Concentration Data for Water Quality Monitoring Using Visual and Cell Phone Quantification Methods. *Citizen Science: Theory and Practice*. 2021. Vol. 6, no. 1.
3. Advancements in Industrial Cyber-Physical Systems: An Overview and Perspectives / K. Zhang et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. P. 1–14.
4. Tyagi A. K., Sreenath N. Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2021. Vol. 1. P. 22–33.
5. Ardila A., Rodriguez M. J., Pelletier G. Spatiotemporal optimization of water quality degradation monitoring in water distribution systems supplied by surface sources: A chronological and critical review. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 337. P. 117734.
6. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges / H. Yang et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 8. P. 1770.