

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

РЕУТ Дмитро Тагірович

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 681.2.08: 57.087.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ
МІКРОПЛАНКТОНУ**

05.11.13 – Прилади та методи контролю і визначення складу речовин

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Д. Т. Реут

Науковий керівник: **Древецький Володимир Володимирович**, доктор
технічних наук, професор

Львів – 2020

АНОТАЦІЯ

Реут Д.Т. Метод і пристрій для вимірювання концентрації мікропланктону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 “Прилади та методи контролю і визначення складу речовин” – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2020.

Здійснено аналіз та класифікацію існуючих методів і засобів вимірювання концентрації організмів мікропланктону у воді. Розглянуто процес лабораторного вимірювання концентрації мікропланктону з класифікацією лаборантом або штучною нейронною мережею, використання проточних цитометрів, автономних підводних пристроїв і буїв. Встановлено, що методи, які передбачають транспортування проб в лабораторію, характеризуються значною тривалістю та трудомісткістю вимірювання. Водночас методи проточної цитометрії характеризуються меншою тривалістю вимірювання, але й меншою точністю вимірювання концентрації. Встановлено, що мінімізувати тривалість вимірювання можливо при виконанні вимірювань за місцем відбору проби, що вимагає компактних та енергоефективних інструментів і засобів вимірювання, які можна легко транспортувати між точками пробовідбору та які можуть працювати без зовнішнього джерела живлення.

Запропоновано параметри для опису організмів мікропланктону та подальшої їх класифікації, зокрема які характеризують рух та зміну форми мікроорганізмів. Визначено межі нечітких множин, що використовуються для опису окремих класифікаційних груп мікропланктону.

Створено метод вимірювання концентрацій окремих класифікаційних груп мікропланктону, що полягає у отриманні відеопотоку із зображенням мікроорганізмів у проточній оптично прозорій комірці, алгоритмічній обробці отриманого відео та класифікації мікроорганізмів за допомогою

нечіткої логіки.

Створено алгоритм попередження повторного врахування мікроорганізму при його виході з фокусу мікроскопа та поверненні через деякий час у іншій області кадру мікроскопа, що дозволяє уникнути завищення результату вимірювання концентрації таких мікроорганізмів.

Запропоновано автоматичне підлаштування порогового фільтра, що використовується для виокремлення об'єктів від фону, при зміні колірності води або освітленості завдяки застосуванню розробленого алгоритму, що дозволяє підвищити точність визначення розмірів.

Створено спосіб вимірювання та регулювання швидкості потоку води в полі зору мікроскопа, який дозволяє підтримувати чіткість зображень мікропланктону в заданих межах, завдяки чому підтримується баланс між тривалістю вимірювання та точністю.

Досліджено можливості використання штучних нейронних мереж для класифікації мікропланктону на основі запропонованих класифікаційних параметрів. Шляхом комп'ютерного моделювання оптимізовано структуру штучної нейронної мережі для класифікації мікропланктону, знайдено ваги та зміщення, що забезпечують меншу помилку класифікації та, відповідно, більшу точність вимірювання.

Обґрунтовано вимоги до пристрою для вимірювання концентрації мікропланктону та запропоновано варіанти структурних схем для реалізації пристрою для вимірювання концентрації мікропланктону.

Розроблено та виготовлено портативний пристрій для автоматичного вимірювання концентрації мікропланктону, який складається з оптично прозорої проточної комірки, перистальтичного насоса для подачі аналізованої води, цифрового мікроскопа, процесорного модуля, модуля введення-виведення, силового драйвера, давача гідростатичного тиску, інфрачервоного давача відстані, давача витоку води в корпус пристрою, модуля людино-машинного інтерфейсу з рідкокристалічним дисплеєм та

модуля живлення на базі підвищувального перетворювача напруги та літій-іонних акумуляторів. Описана структура складових модулів пристрою. Процесорний модуль запропоновано будувати на базі енергоефективних процесорів з групи архітектур ARM Cortex-A. Забір досліджуваної води здійснювати за допомогою низькопродуктивних перистальтичних насосів.

Створене програмне забезпечення для модулів пристрою, яке забезпечує реалізацію запропонованого методу вимірювання концентрації мікропланктону, інтерфейс користувача, збереження результатів вимірювань на зовнішні накопичувачі інформації, доступ до результатів вимірювань через комп'ютерні мережі й передачу результатів вимірювання концентрації на сервер. Наведена методика калібрування камери мікроскопа.

Встановлено, що вимірювання концентрації мікропланктону в поверхневих водах за допомогою запропонованих методу і пристрою супроводжується виникненням невизначеностей, які впливають на точність вимірювання концентрації мікроорганізмів, зокрема невизначеність вимірювання розмірів поля зору цифрового мікроскопа, невизначеність визначення товщини шару води, на який сфокусовано мікроскоп, невизначеність вимірювання швидкості потоку води, невизначеність вимірювання шляху, пройденого об'єктами в кадрі, невизначеність встановлення координат центру об'єкта, невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи, невизначеність визначення контура об'єкта, невизначеність вимірювання координат точок об'єктів у цифровому форматі, невизначеність вимірювання довжини та ширини об'єкта, невизначеність визначення площі об'єкта, невизначеність встановлення середнього кольору об'єкта, невизначеність квантування по рівню відеосигналу при перетворенні зображення в цифрову форму, невизначеність, яка обумовлена шумами в світлочутливій матриці, невизначеність частоти кадрів, невизначеність встановлення

багатоклітинності об'єкта, невизначеність класифікації об'єктів до різних класифікаційних груп.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше створено новий метод неперервної ідентифікації та вимірювання концентрації мікроорганізмів, що передбачає аналіз відеопотоку з мікроскопа з врахуванням змін вмісту поля зору мікроскопа з часом.

2. Вперше досліджено власних рух мікропланктону в потоці та запропоновано автоматично регулювати швидкість води, що рухається в полі зору мікроскопа, залежно від чіткості отримуваних кадрів.

3. Вперше запропоновано метод класифікації організмів мікропланктону, що використовує нечітку логіку, що дозволяє описати параметри мікроорганізмів з розмитими межами.

4. Удосконалено метод порогової фільтрації для використання при неперервному відстеженні мікроорганізмів у відеопотоці.

5. Отримав подальший розвиток метод визначення геометричних параметрів фітопланктону на основі використання нейронних мереж для обробки потоку аналізованої води.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено портативний пристрій для автоматичного вимірювання концентрації мікроорганізмів, що може використовуватись для оцінки екологічного стану водойми як в періодичному режимі, так і неперервно.

2. Розроблено програмне забезпечення для класифікації мікропланктону на основі використання методів комп'ютерного зору та нечіткої логіки.

3. Розроблено і обґрунтовано метод обчислення концентрації мікроорганізмів у неперервному потоці води, що прокачується в полі зору мікроскопа.

4. Розроблені методи, які поміж вказаного, можуть використовуватись

для вимірювання дисперсності емульсій, концентрації окремих клітин у біологічних рідинах.

Наукові та практичні результати впроваджено на каналізаційних очисних спорудах на базі фітотехнології глибокого біологічного очищення води, що дало можливість більш оперативно контролювати процес очищення, а також у навчальний процес кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисципліни «Інтелектуальні системи управління» при підготовці магістрів за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Ключові слова: концентрація мікроорганізмів, біологічні показники якості води, комп'ютерний зір, обробка відеопотоку, автоматична мікроскопія.

ABSTRACT

Reut D.T. Method and device for measuring microplankton concentration. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree in Engineering by specialty 05.11.13 "Instruments and methods for monitoring and determining the composition of substances" - Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The analysis and classification of existing methods and means of measuring the concentration of microplankton organisms in water is carried out. The process of laboratory measurement of microplankton concentration with classification by a laboratory assistant or an artificial neural network, use of flow cytometers, autonomous underwater devices and buoys is considered. It is established that the methods that involve the transportation of samples to the laboratory are characterized by a significant time and complexity of measurement. At the same time, flow cytometry methods are characterized by

shorter measurement time, but also lower accuracy of concentration measurement. It has been found that it is possible to minimize the measurement time by taking measurements at the sampling site, which requires compact and energy efficient instruments and measuring instruments that can be easily transported between sampling points and that can operate without an external power supply.

Parameters for the description of microplankton organisms and their further classification are offered, in particular which characterize the movement and change of the form of microorganisms. The boundaries of fuzzy sets used to describe individual classification groups of microplankton are determined.

The method for measuring the concentrations of individual classification groups of microplankton has been developed, which consists in obtaining a video stream with the image of microorganisms in a flowing optically transparent cell, algorithmic processing of the obtained video and classification of microorganisms using fuzzy logic.

An algorithm to prevent re-consideration of the microorganism that leave the focus of the microscope and return after some time in another area of the microscope video frame, which avoids overestimating the result of measuring the concentration of such microorganisms.

It is proposed to automatically adjust the threshold filter, which is used to separate objects from the background, when changing the color of water or light by applying the developed algorithm, which allows to increase the accuracy of sizing.

The method of measuring and adjusting the water flow rate in microscope field of view, which allows you to maintain the sharpness of microplankton images within specified limits, thus maintaining a balance between measurement time and accuracy.

Possibilities of using artificial neural networks for microplankton classification on the basis of the offered classification parameters are

investigated. The structure of an artificial neural network for microplankton classification has been optimized by computer modeling, weights and bias have been found that provide less classification error and, accordingly, greater measurement accuracy.

The requirements to the device for measuring microplankton concentration are substantiated and the variants of structural schemes for the implementation of the device for measuring microplankton concentration are offered.

The design of a portable device for automatic measurement of microplankton concentration was developed and a device consisting of an optically transparent flow cell, a peristaltic pump for supply of analyzed water, a digital microscope, a processor module, an I/O module, a power driver, pressure sensor, infrared distance sensor, water leak sensor, human-machine interface module with liquid crystal display and power supply module based on step-up voltage converter and lithium-ion batteries. The structure of the component modules of the device is described. It is proposed to build the processor module on the basis of energy-efficient processors from the group of ARM Cortex-A architectures, to collect the investigated water with the use of low-performance peristaltic pumps.

Created software for device modules, which provides the implementation of the proposed method of measuring microplankton concentration, user interface, saving measurement results to external storage devices, access to measurement results via computer networks and transmission of concentration measurement results to the server. The technique of calibration of the microscope camera is given.

It is established that the measurement microplankton concentration in surface waters using the proposed method and device is accompanied by measurement uncertainties that affect the accuracy of measuring microplankton concentration, in particular the uncertainty of measuring the field of view of a digital microscope, the uncertainty of determining the thickness of water flow,

uncertainty of measuring the distance traveled by objects in the video frame, uncertainty of determining the coordinates of the center of the object, uncertainty of the conversion factor of the optical system, uncertainty of determining the contour of the object, uncertainty of measuring the coordinates of points in digital format, uncertainty of measuring length and object width, uncertainty of determining the area of the object, uncertainty of determining the average color of the object, uncertainty of quantization at the level of the video signal when converting the image into digital form, uncertainty due to noise in the light-sensitive matrix, the uncertainty of the frame rate, the uncertainty of determining the multicellularity of the object, the uncertainty of the classification of objects into different classification groups.

The scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time the new method of continuous identification and measurement of the concentration of microorganisms was created, which provides for the analysis of the video stream from the microscope taking into account changes in the content of the microscope field of view over time.

2. For the first time, the intrinsic motion of microplankton in a stream was studied and it was proposed to automatically adjust the velocity of water moving in the microscope field of view depending on the accuracy of the obtained frames.

3. For the first time the method of classification of microplankton organisms is proposed, which uses fuzzy logic, which allows to describe the parameters of microorganisms with blurred boundaries.

4. The method of threshold filtration for use in continuous tracking of microorganisms in the video stream has been improved.

5. The method of determining the geometric parameters of phytoplankton based on the use of neural networks to process the flow of analyzed water has been further developed.

Practical significance of the obtained results:

1. The portable device for automatic measurement microorganisms concentration has been developed, which can be used to assess the ecological condition of the reservoir both periodically and continuously.

2. Microplankton classification software based on computer vision and fuzzy logic has been developed.

3. The method for calculating the microorganisms concentration in a continuous stream of water pumped in the microscope field of view has been developed and substantiated.

4. The developed methods can also be used to measure the dispersion of emulsions, the concentration of individual cells in biological fluids.

Scientific and practical results have been implemented in sewage treatment plants based on phytotechnology of deep biological water purification, which made it possible to more quickly control the purification process, as well as in the educational process of the Department of Automation, Electrical and Computer Integrated Technologies of the National University of Water Management. It is when teaching the discipline "Intelligent Control Systems" in the preparation of masters in the specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies.

Keywords: concentration of microorganisms, biological indicators of water quality, computer vision, video stream processing, automated microscopy.

Список публікацій здобувача

1. Реут Д. Т. Вимірювання концентрації мікропланктону в поверхневих водах з відслідковуванням у відеопотоці / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – №3,4. – С.261-264. – (Ф)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці методу й алгоритму визначення концентрації мікропланктону та його програмній реалізації.

2. Реут Д. Т. Застосування порогового фільтра для визначення кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д. Т.

Реут // Науково-технічний журнал “Методи і прилади контролю якості”. – 2013. – № 2 (31). – С.36-40. – (Ф)

3. Реут Д. Т. Підвищення точності неперервного вимірювання концентрації мікропланктону / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – №3,4. – С.237-240. – (Ф)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці способу підвищення точності інформаційно-вимірювальної системи вимірювання концентрації мікропланктону шляхом виключення повторного підрахунку мікроорганізму при втраті фокусу та його програмній реалізації.

4. Реут Д. Т. Пристрій визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Науково-технічний журнал “Методи і прилади контролю якості”. – 2016. – № 2 (37). – С. 38-43. – (Ф)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці конструкції, виготовленні та програмуванні портативного пристрою, що здійснює автоматичне визначення концентрацій окремих класифікаційних груп мікроорганізмів, випробуванні пристрою в польових умовах.

5. Реут Д. Т. Підвищення точності розпізнавання колоніальних і багатоклітинних організмів мікропланктону за допомогою комп'ютерного зору / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – № 1. – С. 193-196. – (Ф)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці та програмній реалізації способу підвищення точності розпізнавання колоніальних та багатоклітинних організмів мікропланктону, а також в експериментальній перевірці точності розпізнавання мікропланктону пристроєм.

6. Реут Д. Т. Використання нейронних мереж при вимірюванні концентрації організмів мікропланктону у неперервному потоці води / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2019.

– № 4. – С. 96-99. – (Ф)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці структури штучної нейронної мережі, її навчанні, програмній реалізації, а також в оцінці точності класифікації мікропланктону пристроєм при використанні нечіткої логіки та нейронної мережі.

7. Reut D. Device for determining biological indicators of surface water quality / D. Reut // Magyar Tudományos Journal. – 2017. – №9. – С. 26-31. – (іноземна)

8. Патент України на винахід №112807, МПК G01N 21/85, G01N 33/18. Автоматичний проточний аналізатор складу мікропланктону / Д.Т. Реут. Заявник та власник Реут Д.Т. – № а201501213; заявл. 13.02.2015; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20. – (Ф)

9. Патент України на корисну модель №138448, МПК G01N 21/85 (2006.01). Спосіб вимірювання швидкостей рідин з тонкодисперсними домішками / Д.Т. Реут, В.В. Древецький. Заявник та власник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201905737; заявл. 27.05.2019 ; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці способу вимірювання швидкості потоку рідини з тонкодисперсними домішками.

10. Реут Д.Т. Вимірювання концентрації планктону в поверхневих водах за допомогою розпізнавання образів / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Сборник тезисов докладов Первой Всеукраинской научно-технической конференции “Современные тенденции развития приборостроения” [Електронний ресурс], 19-20 ноября 2012 г., г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Даля. – 2012. – С. 252-253. – (тези, конференція)

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у виконанні аналізу стану та перспектив вимірювання концентрації планктону в поверхневих водах з використанням комп'ютерного зору.

11. Реут Д. Т. Використання комп'ютерного зору для оцінки

кількості мікропланктону в поверхневих водах / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів”, 22-23 лютого 2013 р., м. Рівне. – Рівне: НУВГП, 2013. – С. 152. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці програмного забезпечення для підрахунку кількості організмів мікропланктону, що потрапляють в кадр цифрового мікроскопа.

12. Реут Д.Т. Автоматичне налаштування порогового фільтра при визначенні кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д.Т. Реут // Збірник тез доповідей четвертої науково-практичної конференції “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”, 26-27 листопада 2013 р., м. Івано-Франківськ, ФЕІІВТ, ІФНТУНГ. – 2013. – С. 152-153. – **(тези, конференція)**

13. Реут Д.Т. Перспективи комп'ютерного зору в біологічному моніторингу / Д.Т. Реут // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу», 11-15 лютого 2014 р., м. Рівне. – Рівне: НУВГП, 2014. – С. 152. – **(тези, конференція)**

14. Реут Д.Т. Застосування комп'ютерного зору для контролю ефективності очисних споруд/ Д.Т. Реут // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали Першої міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів; Київ, НТУУ “КПІ”, 16-17 квітня 2014 р. – К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – С. 91-92. – **(тези, конференція)**

15. Реут Д.Т. Використання комп'ютерного зору при керуванні швидкістю потоку води в полі зору мікроскопа. / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси. Сьома міжнародна науково-практична конференція 19-20 травня 2014 року, Київ,

Україна. – К.: НАУ, 2014. – С. 238-239. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці алгоритму для вимірювання швидкості потоку води в полі зору мікроскопа та його програмної реалізації.

16. Реут Д.Т. Використання нечіткої логіки для класифікації мікроорганізмів при контролі якості вод / Д.Т. Реут // Матеріали міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів", 19-22 лютого 2015 р., м. Рівне. – Рівне: РДГУ, 2015. – С. 140. – **(тези, конференція)**

17. Реут Д. Т. Використання нечіткої логіки при вимірюванні концентрації мікропланктону / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Збірник тез Восьмої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 18-19 травня 2015 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2015. – С. 152. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у підборі класифікаційних параметрів і класифікаційних груп мікропланктону, формуванні бази даних з параметрами функцій приналежності до класифікаційних груп, програмній реалізації алгоритму класифікації.

18. Реут Д.Т. Автоматичне налаштування порогового фільтра при визначенні кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д.Т. Реут // Збірник тез доповідей 5-ої науково-практичної конференції "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання", 24-25 листопада 2015 р., м. Івано-Франківськ, ФЕіІВТ, ІФНТУНГ. – 2015. – С. 168. – **(тези, конференція)**

19. Реут Д. Т. Перспективи використання пристроїв автоматичної ідентифікації мікроорганізмів у екологічному моніторингу / Д. Т. Реут // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню води, 22 березня 2016 р., м. Київ. – Київ: Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2016. – С. 112. – **(тези, конференція)**

20. Реут Д. Т. Пристрій визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Збірник тез Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 17-18 травня 2016 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2016. – С. 175. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці конструкції, виготовленні та програмуванні портативного пристрою, що здійснює автоматичне визначення концентрацій окремих класифікаційних груп мікропланктону, які використовуються при оцінці якості води, випробуванні пристрою в польових умовах.

21. Реут Д. Т. Підвищення точності пристрою визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Збірник тез Десятої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 16-17 травня 2017 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2017. – С. 127. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці способу підвищення точності класифікації мікропланктону шляхом додаткового аналізу внутрішніх контурів об'єктів.

22. Реут Д.Т., Древецький В.В. Підвищення точності розпізнавання колоніальних і багатоклітинних організмів мікропланктону за допомогою комп'ютерного зору. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018). Одинадцята міжнародна науково-практична конференція 22-23 травня 2018 року, Київ, Україна (збірка тез). – К.: НАУ, 2018. С. 251-252. – **(тези, конференція)**

Особистий внесок Реута Д. Т. полягає у розробці та програмній реалізації способу підвищення точності розпізнавання колоніальних та багатоклітинних організмів мікропланктону, а також в експериментальній перевірці точності розпізнавання мікропланктону.

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. Аналіз відомих методів визначення концентрації мікропланктону в поверхневих водах	25
1.1. Методи оцінки якості поверхневих вод	25
1.2. Аналіз відомих методів вимірювання концентрації мікропланктону	29
1.3. Класифікація методів визначення концентрації мікропланктону	40
1.4. Обґрунтування та вибір напрямку дослідження	42
Висновки до розділу 1	43
РОЗДІЛ 2. Спосіб опису та класифікації мікропланктону. Розробка методу вимірювання концентрації організмів мікропланктону	44
2.1. Обґрунтування способу опису організмів мікропланктону	44
2.2. Класифікаційні параметри організмів мікропланктону	46
2.3. Опис організмів мікропланктону за допомогою класифікаційних параметрів	51
2.4. Метод вимірювання концентрації мікропланктону	62
2.5. Попередження повторного врахування мікроорганізму	65
2.6. Автоматичне підлаштування порогового фільтра при зміні колірності води	68
2.7. Регулювання швидкості води в проточній комірці	70
2.8. Виявлення багатоклітинних організмів	73
2.9. Вдосконалений метод вимірювання концентрації мікропланктону	76
2.10. Класифікація за допомогою штучної нейронної мережі	79
Висновки до розділу 2	83
РОЗДІЛ 3. Розробка пристрою вимірювання концентрації мікропланктону	85

3.1. Розробка структурної схеми пристрою	85
3.2. Розробка конструкції та програмного забезпечення приладу	88
3.2.1. Модуль введення-виведення	89
3.2.2. Дисплейний модуль	91
3.2.3. Модуль живлення	104
3.2.4. Процесорний модуль	105
3.3. Калібрування камери мікроскопа	114
Висновки до розділу 3	116
РОЗДІЛ 4. Метрологічний аналіз методу і пристрою для вимірювання концентрації мікропланктону	117
4.1. Аналіз невизначеностей вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом	117
4.2. Оцінка точності вимірювання концентрації мікропланктону розробленим пристроєм	123
4.3. Випробування розробленого пристрою та аналіз результатів	126
Висновки до розділу 4	129
ВИСНОВКИ	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133
ДОДАТКИ	143

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднення природних водойм побутовими та промисловими водами є однією з важливих екологічних проблем України. Розвиток водних організмів, зокрема мікропланктону, залежить від наявності у воді тих чи інших забруднень. За концентраціями різних видів організмів мікропланктону та їх співвідношенням можна судити про ступінь та характер забруднення. Причому на значну кількість забруднень мікроорганізми реагують набагато чутливіше, ніж аналізатори фізико-хімічних параметрів води на станціях автоматичного моніторингу якості води. Нині вимірювання гідробіологічних показників якості здійснюється вручну. Проби води при цьому відбираються з наперед заданим періодом у стерильні флакони. Доставка проб здійснюється в продезінфікованих термоконтейнерах, а їх дослідження повинно бути здійснено не пізніше, ніж через 6 годин після забору проби для неконсервованої проби та 12 годин для консервованої розчином формальдегіду. В лабораторії об'єм проби послідовно фільтрують через мікросита і фільтри з різним діаметром, щоб розділити організми мікропланктону за розміром. Затримані фільтрами мікроорганізми досліджують під мікроскопом, визначають середню кількість особин кожного виду по не менше 50 полях зору мікроскопа. Такий метод вимірювання концентрації планктону має ряд недоліків: необхідність транспортування проби до лабораторії та в деяких випадках консервації проби; значні тривалість та трудомісткість лабораторного дослідження; потреба у висококваліфікованому персоналі лабораторії, адже від його кваліфікації залежить точність результату вимірювання. Тому розробка методу та приладу для автоматичного вимірювання концентрації мікропланктону у відкритих водоймах є актуальною науково-технічною задачею.

Питанням вимірювання концентрації мікропланктону у відкритих водоймах присвячені праці відомих українських вчених

Е. О. Аристархової, М. Т. Бакка, О. М. Безвесільної, Т. О. Єльнікової, Ю. О. Подчашинського та закордонних вчених Р. А. Андерсена, К. В. Ембетона, К. Ісікави, М. Кумагаї, С. Е. Гібсона та інших. Запропоновані раніше пристрої не дозволяють відстежувати власний рух мікроорганізмів, оскільки аналізують статичні кадри з мікроскопа або сигнали з цитометра незалежно від попередніх. Також запропоновані раніше алгоритми, що використовують штучні нейронні мережі для класифікації мікроорганізмів, не дозволяють здійснювати аналіз кожного кадру відеопотоку в реальному часі, а отже не дозволяють реалізувати портативний пристрій для неперервних вимірювань у польових умовах.

Недостатня оперативність і точність визначення концентрації організмів мікропланктону в товщі води спричинена використанням методів ручного визначення форм, розмірів і концентрації окремих груп мікроорганізмів у воді, пов'язаних з необхідністю відбору, консервації, транспортування та підготовки проб для лабораторного дослідження. Тому створення методу і приладу, що у місці відбору проби здійснює автоматичне вимірювання концентрації та класифікацію мікроорганізмів, є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематичних планів і науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування (місто Рівне), згідно постанов Міністерства науки і освіти України відповідно до Закону України №433-IV «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема за напрямом «Приладобудування як основа високотехнологічного оновлення всіх галузей виробництва», а також науково-дослідних робіт:

– “Розробка та дослідження методів і систем контролю фізико-механічних параметрів рідин та газів” (державна реєстрація теми №0112U002523, 2012 р.);

– “Розробка та дослідження елементів і систем автоматизації та їх моделювання” (державна реєстрація теми №0110U000823, 2012 р.), де автор був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є розробка оптичного методу та портативного приладу для неперервного вимірювання концентрації мікропланктону у відкритих водоймах, що забезпечить значне зменшення тривалості вимірювання.

Основні задачі:

1. Здійснити аналіз відомих методів і пристроїв визначення геометричних розмірів і концентрації організмів мікропланктону і показати актуальність розробки автоматичного портативного пристрою для вимірювання концентрації мікроорганізмів у відкритих водоймах.

2. Розробити метод вимірювання геометричних розмірів і концентрації мікроорганізмів у воді, що включає автоматичну класифікацію та визначення концентрації мікроорганізмів.

3. Розробити і дослідити автоматичний портативний проточний прилад визначення геометричних розмірів та концентрації мікропланктону, що має підвищену швидкодію і точність аналізу у порівнянні із існуючими засобами вимірювань.

4. Провести промислові випробування розробленого приладу.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання концентрації мікроорганізмів, що використовуються для визначення біологічних показників якості води відкритих водойм.

Предметом дослідження є прилад для вимірювання концентрації мікроорганізмів у відкритих водоймах.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі використано такі методи досліджень:

– порівняльний аналіз відомих засобів вимірювання геометричних розмірів та концентрації мікроорганізмів;

- інформаційно-комп'ютерні методи формування та обробки відеокadrів, методи теорії нечітких множин;
- методи теорії штучних нейронних мереж для класифікації організмів мікропланктону;
- методи теорії автоматичного управління;
- статистичне опрацювання результатів вимірювань з використанням засобів обчислювальної техніки, лабораторні дослідження у пробах води з водойм, графоаналітичний та чисельний аналіз даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше створено новий метод неперервної ідентифікації та вимірювання концентрації мікроорганізмів, що передбачає аналіз відеопотоку з мікроскопа з врахуванням змін вмісту поля зору мікроскопа з часом.

2. Вперше досліджено власних рух мікроорганізмів у потоці та запропоновано автоматично регулювати швидкість води, що рухається в полі зору мікроскопа, залежно від чіткості отримуваних кадрів.

3. Вперше запропоновано метод класифікації організмів мікропланктону, що використовує нечітку логіку, що дозволяє описати параметри мікроорганізмів з розмитими межами.

4. Удосконалено метод порогової фільтрації для використання при неперервному відстеженні мікроорганізмів у відеопотоці.

5. Отримав подальший розвиток метод визначення геометричних параметрів фітопланктону на основі використання нейронних мереж для обробки потоку аналізованої води.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено портативний пристрій для автоматичного вимірювання концентрації мікроорганізмів, що може використовуватись для оцінки екологічного стану водойми як в періодичному режимі, так і неперервно.

2. Розроблено і обґрунтовано метод класифікації мікроорганізмів на

основі використання методів комп'ютерного зору та нечіткої логіки.

3. Розроблено і обґрунтовано метод обчислення концентрації мікроорганізмів у неперервному потоці води, що прокачується в полі зору мікроскопа.

4. Розроблені методи можуть використовуватись також для вимірювання дисперсності емульсій, концентрації окремих клітин у біологічних рідинах.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні та практичні здобутки роботи впроваджено на об'єкті «Каналізаційні очисні споруди Хатирчинського району Навоїської області Республіки Узбекистан продуктивністю 4000 м³ на добу на базі фітотехнології глибокого біологічного очищення води компанії Chandwin Project Pte.» (акт від 28 грудня 2019 року, додаток Д) та у навчальний процес кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисципліни «Інтелектуальні системи управління» при підготовці магістрів за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (довідка від 15 січня 2020 року, додаток Е).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації підтверджуються використанням сучасних методів досліджень з використанням методів штучного інтелекту, обробкою вимірювальної інформації за допомогою цифрових ЕОМ, експериментальними дослідженнями з отриманням відеокadrів потоку води з мікропланктоном у пробах води з поверхневих водойм, статистичною обробкою їх результатів.

Особистий внесок здобувача. [1, 10, 11] – розробка методів і алгоритмів визначення концентрації мікропланктону, [3] – розробка методу підвищення точності неперервного вимірювання концентрації мікропланктону, [4, 20] – розробка пристрою визначення концентрації та

біологічних показників якості, [5, 22] – алгоритм підвищення точності розпізнавання багатоклітинних організмів, [6] – розробка структури та навчання нейронної мережі для класифікації мікропланктону, [9, 15] – спосіб та алгоритм керування швидкістю води в полі зору мікроскопа, [17] – розробка бази нечітких правил для класифікації організмів мікропланктону і експериментальна перевірка похибок вимірювань.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на Першій Всеукраїнській науково-технічній конференції “Сучасні тенденції розвитку приладобудування” (Луганськ, 2012), Всеукраїнській науковій конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів” (Рівне, 2013), Четвертій науково-практичній конференції “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (Івано-Франківськ, 2013), III Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу» (Рівне, 2014), Першій міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” (Київ, 2014), Сьомій міжнародній науково-практичній конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (Київ, 2014), Міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів" (Рівне, 2015), Восьмій міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (Київ, 2015), 5-ій науково-практичній конференції “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (Івано-Франківськ, 2015), Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій Всесвітньому дню води (Київ, 2016), IX міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (Київ, 2016), X міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (Київ, 2017), XI

міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (Київ, 2018), XII міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (Київ, 2019).

Публікації. З теми дисертації надруковано 20 наукових праць, із них 6 – у фахових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 1 – у закордонному виданні, 13 – у матеріалах науково-технічних конференцій, отримано 1 патент України на винахід та 1 – на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (74 бібліографічні посилання, 10 сторінок) і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 181 сторінку, зокрема 116 сторінок основного тексту, 44 рисунків, 14 таблиць. Додатки складають 38 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАНКТОНУ В ПОВЕРХНЕВИХ ВОДАХ

1.1. Методи оцінки якості поверхневих вод

Оцінку якості поверхневих вод при екологічному моніторингу водних об'єктів здійснюють за фізичними, хімічними, бактеріологічними та біологічними (гідробіологічними) показниками [23].

Нині оцінка ступеня екологічної небезпеки традиційно здійснюється шляхом визначення в навколишньому середовищі окремих потенційно шкідливих речовин або впливів і порівняння отриманих результатів із законодавчо встановленими для них гранично допустимими величинами [24]. У той же час такий спосіб контролю має ряд суттєвих недоліків. Аналітичні методи, як правило, трудомісткі, вимагають дорогого, іноді дефіцитного обладнання та реактивів, а також висококваліфікованого обслуговуючого персоналу. Але основних їхній недолік в тому, що ці методи не можуть гарантувати достовірної оцінки екологічної небезпеки, яким би широким не був спектр аналізованих речовин. Адже важливі не власне рівні забруднень і впливів, а ті біологічні ефекти, які вони можуть викликати і про які не може дати інформацію навіть найточніший хімічний чи фізичний аналіз [25]. Використовувані на практиці показники (гранично допустимі концентрації, гранично допустимі рівні, гранично допустимі дози) завжди базуються на токсикологічних випробуваннях окремих гідробіонтів, та не можуть враховувати змін токсичності забруднень внаслідок ефектів синергізму або антагонізму [26]. Ці нормативи не відображають залежності токсичної дії забруднень від фізичних параметрів середовища, не враховують процеси природних перетворень речовин у навколишньому середовищі чи зникнення їх в ході детоксикації води від конкретних забруднень. Тому одними з найбільш придатних для екологічного контролю якості поверхневих вод є біологічні показники [27].

Біологічні методи контролю якості води відносно дешеві, не потребують дорогих витратних матеріалів, деякі дозволяють вести контроль у неперервному режимі. Після виявлення змін в концентраціях мікроорганізмів, що відповідає зміні токсичності води, для виявлення причин необхідно застосовувати аналітичні фізико-хімічні методи, що дозволить визначити джерело забруднення. Тобто біологічні методи дозволяють отримати інформацію про біологічні наслідки забруднення і зробити лише непрямі висновки про особливості самого токсичного фактора [28].

Існують принаймні три випадки, коли біологічні методи оцінки якості стають незамінними:

1. Фактор не може бути виміряний прямим вимірюванням.
2. Фактор важко виміряти. Деякі пестициди так швидко розкладаються, що не дозволяють виявити їх вихідну концентрацію у воді. Наприклад, деякі інсектициди активні лише кілька годин після розпилення, в той час як їх дія на фауну простежується протягом декількох днів [29].
3. Фактор легко виміряти, але важко інтерпретувати. Дані про концентрацію в навколишньому середовищі різних поллютантів (якщо їх концентрація не надзвичайно висока) не містять відповіді на питання, наскільки ситуація небезпечна для живої природи. Показники гранично допустимої концентрації різних речовин розроблені саме для людини, однак, ці показники не можуть бути поширені на інші живі істоти. Є більш чутливі види, і вони можуть виявитися ключовими для підтримки екосистем [30].

Біоіндикаційне діагностування стану водойм відзначається високою чутливістю до надслабких антропогенних змін якості середовища; дозволяє своєчасно виявляти наслідки впливу техногенних факторів на якісні показники довкілля (наприклад, передбачити «цвітіння» води, запобігати токсикозами, пов'язаним з цим явищем та з впливом стічних вод); дає

можливість оцінити рівень забруднення в умовах великого різноманіття ситуацій; забезпечує вчасне виявлення наслідків та надання характеристики антропогенних впливів на екосистему, які мали місце в минулому (або напередодні аналізу) [31].

Відомо кілька інтегральних показників якості води природної водойми, що характеризують ступінь її забруднення та екологічний стан. В Україні найбільш вживаним є індекс сапробності.

Сапробність — характеристика водойми, яка показує рівень її забруднення органічними речовинами та продуктами їхнього розпаду [32]. Різним ступеням забруднення водойми характерні різні фізико-хімічні властивості та комплекси органічних речовин, що створюють для мешканців водойм певні умови існування (різні види водних організмів виявляють неоднакову чутливість до вмісту у воді органічних речовин). Тому, якщо водойми від чистої до найбруднішої розділити на кілька класів, то для кожного із них можна визначити групу організмів, що пристосувалися до умов певного класу якості води. За ступенем забруднення органічними речовинами води розділяються на чотири зони сапробності (за спаданням рівня забруднення): полі-, мезо- оліго- та ксеносапробну [33].

Для кожної із чотирьох зон сапробності створені списки видів-індикаторів, кожному виду присвоєне певне число, яке характеризує його положення на шкалі сапробності (індивідуальний індекс сапробності, або індикаторна значущість). Ці умовні числа запровадили для кількісної оцінки здатності певного гідробіонта-індикатора мешкати у воді з тим чи іншим вмістом органічних речовин. Так, організмам-ксеносапробам було присвоєно значення від 0 до 0,50; олігосапробам — від 0,51 до 1,50; β -мезосапробам — 1,51-2,50; α -мезосапробам — 2,51-3,50; полісапробам — 3,51-4,00 [34].

Сьогодні список організмів, що їх використовують для оцінки

сапробності, складається з більш ніж двох тисяч мікро- та макроорганізмів, для яких відомі індекси сапробності виду та валентність сапробності. Користуючись подібними списками, можна оцінити сапробність тої чи іншої водойми.

Для кількісної оцінки ступеня забруднення водойми органічними речовинами, був введений індекс сапробності, який, крім індикаторної значущості видів, враховував і кількість особин індикаторних організмів (абсолютна величина, умовні бали або процентне співвідношення). Він розраховується за формулою [25]:

$$S = \frac{\sum sh}{\sum h},$$

де s – індикаторна значимість виду, h – кількість особин виду.

Розрахунок індексу сапробності за формулою дозволяє встановити якість води та ступінь її забруднення органічними речовинами. Співвідношення індексу сапробності, зони сапробності та класу якості води наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Співвідношення індексу сапробності, зони сапробності та класу якості води

Клас якості води	Індекс сапробності	Зона сапробності
Дуже (гранично) чиста	<0,50	ксеносапробна
Чиста	0,50-1,50	олігосапробна
Помірно забруднена	1,51-2,50	β -мезосапробна
Забруднена	2,51-3,50	α -мезосапробна
Брудна	>3,51	полісапробна

Організми, що не здатні протистояти течії у водоймі, складають планктон. Високі швидкості розмноження за сприятливих умов показують мікроорганізми розмірами 2-200 мкм, що представляють нанопланктон та мікропланктон [35]. Відповідно при зміні концентрації полютантів у воді саме їх популяція зміниться найшвидше, тому при оперативному контролі якості води за біологічними показниками якості доцільно визначати саме

концентрації організмів мікропланктону, який добре розрізняється оптичним мікроскопом.

1.2. Аналіз відомих методів вимірювання концентрації мікропланктону

Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України встановлюється наступний порядок аналізу води з поверхневих вод відповідно до нормативних документів [36-38]. Проби води відбирають у спеціально призначені для такого відбору води стерильні флакони місткістю не менше 2500 куб.см зі щільно закритими пробками, які захищені та фіксовані ковпачками. Пробки повинні бути з матеріалу, який витримує стерилізацію сухим жаром чи в автоклаві. Ватно-марлеві пробки після стерилізації заміняють на стерильні щільні пробки. Місця відбору проб води визначають з урахуванням як природних характеристик водойм (просторова форма та структура водойми, наявність глибоководних і мілководних ділянок та їх співвідношення, наявність потоків води, що надходять або витікають з цієї водойми тощо), так і з урахуванням розташування антропогенних джерел забруднень водойми. Відбір проб проводять з дотриманням правил асептики: пробка з ковпачком знімається безпосередньо перед відбором проби, край флакона та пробка не повинні ні до чого торкатися. Після відбору проби флакон щільно закривають пробкою з ковпачком, який фіксують. Доставка проб здійснюється в продезінфікованих термоконтейнерах при температурі $(6 \pm 2)^\circ \text{C}$. В холодний період року контейнери повинні мати терморегулюючі прокладки, які запобігають промерзанню проб. При дотриманні вказаних умов термін початку дослідження від моменту відбору проб не повинен перевищувати 6 годин. Якщо пробу неможливо охолодити, дослідження має бути проведеним не пізніше, ніж через 2 години після її відбору. В разі неможливості дотримання термінів доставки проби і температури зберігання аналіз проводити не рекомендується. Якщо в ході аналізу не

будуть визначатись бактеріологічні показники якості води, допускається консервація проби розчином формальдегіду, при цьому термін зберігання проби не повинен перевищувати 12 годин. В лабораторії об'єм проби послідовно фільтрують через мікросита і фільтри з різним діаметром, щоб розділити організми мікропланктону за розміром. Затримані фільтрами мікроорганізми досліджують під мікроскопом, визначають середню кількість особин кожного виду по не менше 50 полях зору мікроскопа, яку далі перераховують у концентрацію кожного виду мікропланктону. На основі отриманих концентрацій розраховують інтегральний біологічний показник якості води, який служить оцінкою забруднення водойми.

Описаний метод визначення концентрації вимагає проведення попередньої стерилізації всього інвентарю, в деяких випадках консервації проби, ручного фільтрування проби та дослідження її під мікроскопом, тому між забором проби та отриманням результату вимірювання проходить значний час, процес вимірювання пов'язаний зі значними трудозатратами і наявна суб'єктивна складова похибки вимірювання, що виникає як при підрахунку організмів мікропланктону, та і при їх класифікації.

Одним зі способів зменшення часу аналізу є використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для класифікації мікропланктону після розміщення проби в полі зору мікроскопа (патент України UA 88673) [39]. У робочому режимі для ідентифікації фітопланктону ШНМ визначає відстані від вхідного вектора до центрів кластерів тестової вибірки. Інтерпретатор цієї мережі визначає найменше значення виходів нейронів (мінімальна відстань від вхідного вектора до центрів кластерів), який відповідає за належність відеозображення екземпляра фітопланктону до певного класу. Це і є номер виду фітопланктону, що ідентифікувався.

Спосіб ідентифікації фітопланктону на основі використання цифрових відеозображень проб води та ШНМ порівняно зі існуючим лабораторним методом дозволяє збільшити продуктивність ідентифікації

фітопланктону у пробах води з водойм. В цьому методі після розміщення в мікроскопі препарату з проби води формують його відеозображення за допомогою відеокамери, приєднаної до оптичної системи мікроскопа (рис. 1.1). Далі вводять це відеозображення в обчислювальне середовище цифрової електронної обчислювальної машини, причому виявлення кожного екземпляра фітопланктону виконують шляхом цифрової обробки відеозображення препарату з проби води. Після цього для кожного екземпляра фітопланктону розраховують геометричні ознаки форми, інваріантні до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення.

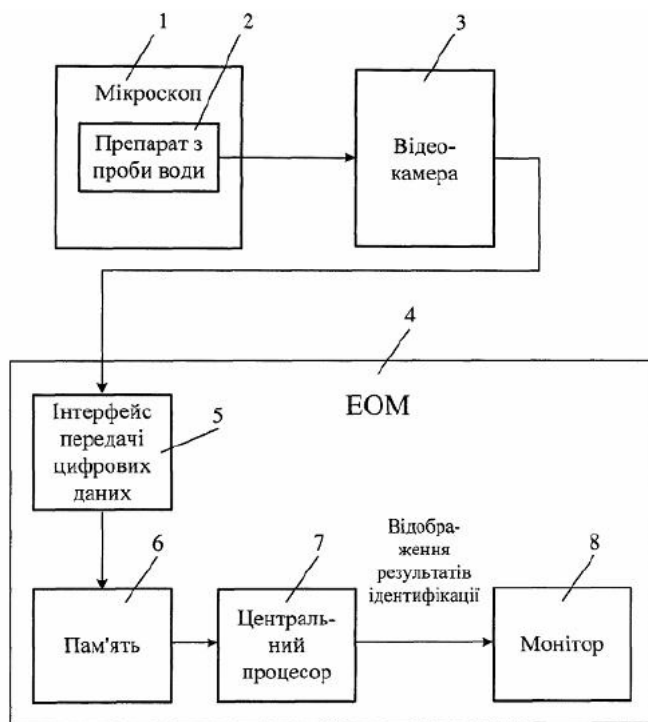


Рис. 1.1. Схема системи ідентифікації фітопланктонних водоростей відповідно до патенту UA 88673

Ідентифікацію фітопланктону виконують за допомогою штучної нейронної мережі, причому кількість входів цієї мережі відповідає кількості геометричних параметрів фітопланктону, що використовують для ідентифікації, а кількість виходів цієї мережі відповідає кількості видів фітопланктону, що обрані для досліджень та можуть існувати в умовах

водоїм, які досліджують. Для навчання штучної нейронної мережі використовують тестові відеозображення, що містять фітопланктон заздалегідь відомих видів. В якості простора ознак для ідентифікації використовують геометричні параметри фітопланктону, що виміряні по його відеозображенням.

В даному методі ідентифікацію фітопланктону виконують на основі формування цифрових відеозображень препаратів з проб води та цифрової обробки цих відеозображень з використанням математичного апарату та алгоритмів штучних нейронних мереж.

Недоліком методу є необхідність виконання забору і підготовки проби аналогічно до попереднього методу. Порівняно з попереднім методом усувається суб'єктивна складова похибки вимірювання, оскільки підрахунок та класифікацію мікропланктону виконує комп'ютер за наперед визначеним алгоритмом, дещо зменшується сумарна тривалість вимірювання від моменту забору проби та трудовитрати лаборанта. Оскільки кожен кадр з мікроскопа аналізується незалежно від інших, ще одним недоліком є неможливість виявлення власного руху мікроорганізмів.

Відомий метод дистанційного вимірювання концентрації водорості *Uroglena americana*, що передбачає запуск автономного підводного пристрою зі встановленим мікроскопом [40]. Пристрій здійснював рух за заданим маршрутом в заданій ділянці озера і запис кадрів з мікроскопа у внутрішню пам'ять. Після завершення роботи відеофайл завантажувався на ПК, де здійснювалась ідентифікація *Uroglena americana* штучною нейронною мережею, яка була попередньо навчена на 190 зображеннях з добре розрізняваною *Uroglena americana*, 139 зображеннях з погано розрізняваною *Uroglena americana* та 218 зображеннях, що не містили даної водорості. В результаті ідентифікації, використовуючи дані про положення пристрою в момент отримання кадру з мікроскопа, був побудований тривимірний розподіл концентрації *Uroglena americana* в

досліджуваній водоймі. Різниця між ручним підрахунком та ідентифікацією штучною нейронною мережею становила не більше 10%.

Використання даного пристрою дозволяє відмовитись від використання ємностей для забору проб і пов'язаних з ними стерилізацією та транспортуванням. В лабораторію достатньо передати носій інформації з відеозаписом. Недоліком даного методу знову ж таки є виконання ідентифікації в лабораторних, а не польових умовах, що унеможливорює експрес-аналіз в місці пробовідбору.

Відомо проточний аналізатор - скануючий проточний цитометр [41], що включає проточну камеру, засіб формування потоку проби, джерело когерентного випромінювання, фотодетектор та пристрої керування і обробки даних (рис. 1.2).

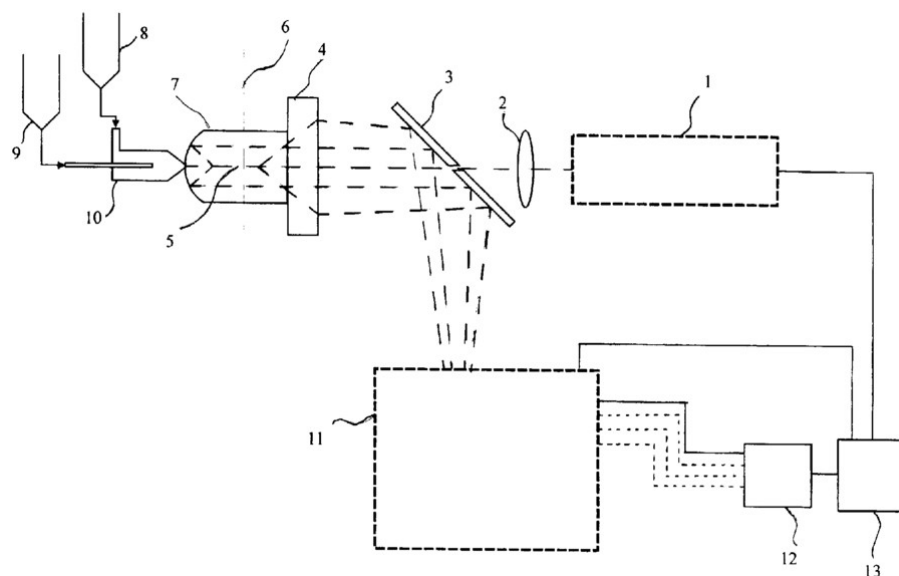


Рис. 1.2. Схема скануючого проточного цитометра відповідно до патенту РФ №2347224

Проточну камеру виконано у формі скануючої кювети з оптично прозорого матеріалу з внутрішнім прямолінійним каналом, а також сферичного дзеркала, вісь якого співпадає з віссю внутрішнього каналу скануючої кювети. Джерело поляризованого когерентного світла встановлено так, що його випромінювання направлено вздовж осі внутрішнього каналу скануючої кювети. Внутрішня поверхня дзеркала

оптично пов'язана з фотодетектором. Світло, розсіяне одиночною частинкою, сканується по апертурі фотоприймача під час її руху в потоці по капіляру кювети, що дозволяє виміряти індикатрису розсіювання частинки.

Потік досліджуваної рідини пропускають з швидкістю 1-10 м/с, що дозволяє швидко проводити вимірювання. Недоліком даного пристрою є низька точність ідентифікації об'єктів, оскільки за індикатресою розсіювання розрізнити багато класів об'єктів важко внаслідок занадто малого впливу зміни окремих деталей внутрішньої будови на величину індикатриси розсіювання.

В результаті розвитку попереднього методу для використання в польових умовах розроблений Цитобуй (Cytobuoy), що пропонується як платформа для автоматичного проточного моніторингу фітопланктону [42]. Він містить джерело когерентного випромінювання (лазер) та високочутливу CCD-камеру, розташовані на протилежних сторонах вимірювального резервуару, через який проходить досліджувана вода. Мікропланктон, що проходить через лазерний промінь, залишає в об'єктиві камери власне високочітке монохромне зображення, що погіршує можливості класифікації мікропланктону за особливостями кольору.

Відомо пристрій для контролю концентрацій частинок у полідисперсних водних середовищах (рис. 1.3) [43].

Пристрій містить джерело випромінювання 1, монохроматор 2, кроковий двигун 3 встановлення робочої довжини хвилі монохроматора 2, волоконно-оптичний хвилевід 4, поляризатор 5, поворотний пристрій 6 поляризатора 5, який підключено до крокового двигуна 7 встановлення кута повороту поляризатора 5, компенсатор 8, поворотний пристрій 9 компенсатора 8, який підключено до крокового двигуна 10 для встановлення кута повороту компенсатора 8, насос промивки 11, який підключено до крокового двигуна 12 для насоса промивки 11, проточну

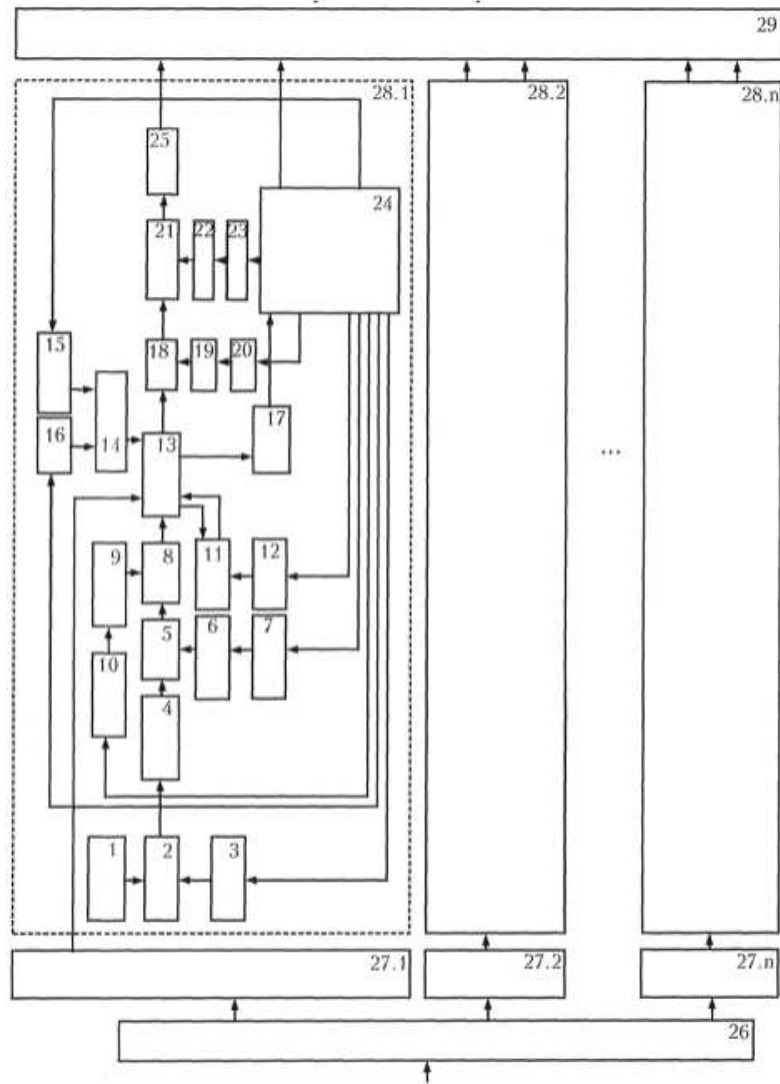


Рис. 1.3. Схема пристрою для контролю концентрацій частинок у полідисперсних водних середовищах

вимірювальну кювету 13, предметний столик 14 мікроскопа, який підключено до крокових двигунів 15, 16 для руху предметного столика мікроскопа у напрямках X та Y відповідно, термостат 17, аналізатор 18, поворотний пристрій 19 аналізатора 18, кроковий двигун 20 для встановлення кута повороту аналізатора 18, оптичну систему мікроскопа 21, систему автофокусування мікроскопа 22, кроковий двигун 23 автофокусування мікроскопа 22, блок керування 24 кроковими двигунами (7, 10, 12, 15, 16, 20, 23), фотоприймач (CCD-камера) 25, змішувач 26, набір фільтрів з порами різного діаметру $27_1 \dots 27_n$, вимірювальні канали $28_1 \dots 28_n$

для дослідження частинок різного розміру, персональний комп'ютер 29.

Пристрій працює наступним чином. Рідина з частинками різного розміру (полідисперсне водне середовище) надходить у змішувач 26 і розділяється набором фільтрів з порами різного діаметру $27_1 \dots 27_n$ на потоки з частинками певного розміру, які надходять у проточні вимірювальні кювети 13 відповідних вимірювальних каналів $28_1 \dots 28_n$. Випромінювання від джерела випромінювання 1 надходить на монохроматор 2, довжина хвилі якого встановлюється кроковим двигуном 3 відповідно до значень характеристичних довжин хвиль пігментів у частинках полідисперсних біологічних рідин. Далі випромінювання проходить через волоконно-оптичний хвилевід 4, поляризатор 5 та компенсатор 8, кути обертання яких встановлюються першим 6 та другим 9 поворотними пристроями, які обертаються за допомогою першого 7 та другого 10 крокових двигунів відповідно. Далі випромінювання проходить проточну вимірювальну кювету 13 з тонким шаром досліджуваної полідисперсної біологічної рідини. Перед проведенням експерименту проточна вимірювальна кювета 13 промивається стандартним розчином за допомогою насосу промивки 11, що рухається за допомогою третього крокового двигуна 12. Проточна вимірювальна кювета 13 розміщена на предметному столику мікроскопа 14 та може рухатись за допомогою четвертого 15 та п'ятого 16 крокових двигунів у напрямках X та Y. Для забезпечення стабільності та повторюваності результатів експерименту проточна вимірювальна кювета 13 розміщена у термостаті 17. Далі випромінювання проходить через аналізатор 18, кут обертання якого встановлюється третім поворотним пристроєм 19 за допомогою шостого крокового двигуна 20. Збільшення спектрополяриметричних зображень частинок полідисперсних біологічних рідин до необхідних розмірів здійснюється за допомогою оптичної системи мікроскопа 21. Автофокусування мікроскопа здійснюється за допомогою системи

автофокусування 22 та сьомого крокового двигуна 23. Блок керування 24 кроковими двигунами (7, 10, 12, 15, 16, 20, 23) створює необхідні сигнали керування для крокових двигунів. Збільшене зображення частинки фіксується фотоприймачем (CCD-камера) 25 та передається у персональний комп'ютер 29. Персональний комп'ютер 29 за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення порівнює отримані спектрополяриметричні зображення зі зразковими та визначає співвідношення між частинками різних видів. Отримані співвідношення між частинками різних видів полідисперсної біологічної рідини дозволяють оцінити її стан. Недоліком даного методу є виконання ідентифікації в лабораторних, а не польових умовах, що унеможливує експрес-аналіз в місці пробовідбору й потребує додаткових затрат часу на транспортування проби в лабораторію.

Патент США US6005964A описує систему автоматичного визначення наявності забруднюючих агентів в пробах [44]. Система включає в себе мікроскоп 30 (рис. 1.4), керований позиціонер 60, зсуваючий пристрій 50 для встановлення проб під мікроскопом, комп'ютер 20 для управління позиціонером і цифрової камери для захоплення зображення за допомогою мікроскопа. Система сканує пробу в області зору мікроскопа і виводить цифрові зображення на комп'ютері. Процедури обробки зображень, збережені в комп'ютері, аналізують цифрові зображення і визначають, чи ці зображення можуть містити деякі забруднення, шляхом порівняння характеристик об'єктів на зображенні з відомими характеристиками забруднюючих агентів. Система використовує спосіб автоматичного визначення наявності забруднень в пробах, що включає стадії отримання від мікроскопа, під яким розташований зразок, великої кількості цифрових зображень проби, зберігання цифрових зображень в комп'ютері, який надалі автоматично порівнює характеристики кожного цифрове зображення з характеристиками відомих домішок і зберігає результати

порівняння.

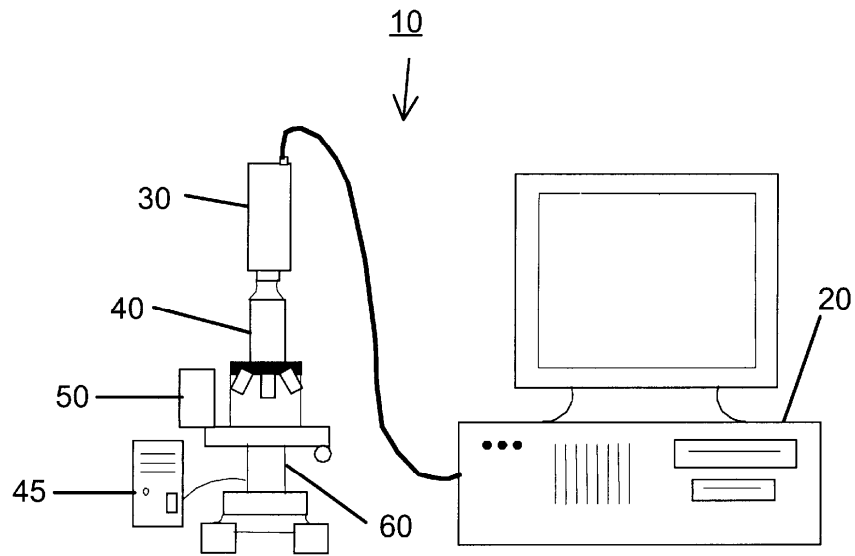


Рис. 1.4. Схема системи автоматизованої мікроскопії відповідно до патенту US 6005964 A

Недоліком даної системи є необхідність транспортування проби до лабораторії та підготовки проби, а також, внаслідок послідовного характеру перевірки належності мікроорганізму до кожного відомого виду, значна обчислювальна складність.

З метою отримання більш чіткого зображення деталей будови мікроорганізму запропонований метод і пристрій автоматичного виявлення мікроорганізмів (патент США US 6122396 A) [45]. Пристрій виявлення мікроорганізмів містить мікроскоп з секцією флуоресценції (рис. 1.5), яка оснащена трьохкоординатним (XYZ) приводом від електродвигуна, для розміщення в ньому проб для флуоресцентного фарбування. Освітлювальна підсистема проектує випромінювання збудження із заданою довжиною хвилі, що падає на пробу, через вузол, що фільтрує випромінювання і обмежує смугу випромінюваних довжин хвиль, через зразок на відеокамеру, що захоплює зображення флуоресцентних забарвлених мікроорганізмів з проби. Комп'ютер зчитує вихідне значення з обмеженою смугою довжин хвиль від відеокамери і обробляє прочитаний

вихід. Обчислювальна підсистема має контролери, які приводять в рух трьохкоординатний привод таким чином, щоб забезпечити сканування по всій площі зразка мікроорганізму. Кожне зображення відображається на моніторі і виявлені у зразку мікроорганізми зберігаються на жорсткому диску і в системі архівування зображень для забезпечення можливості перевірки або обговорення.

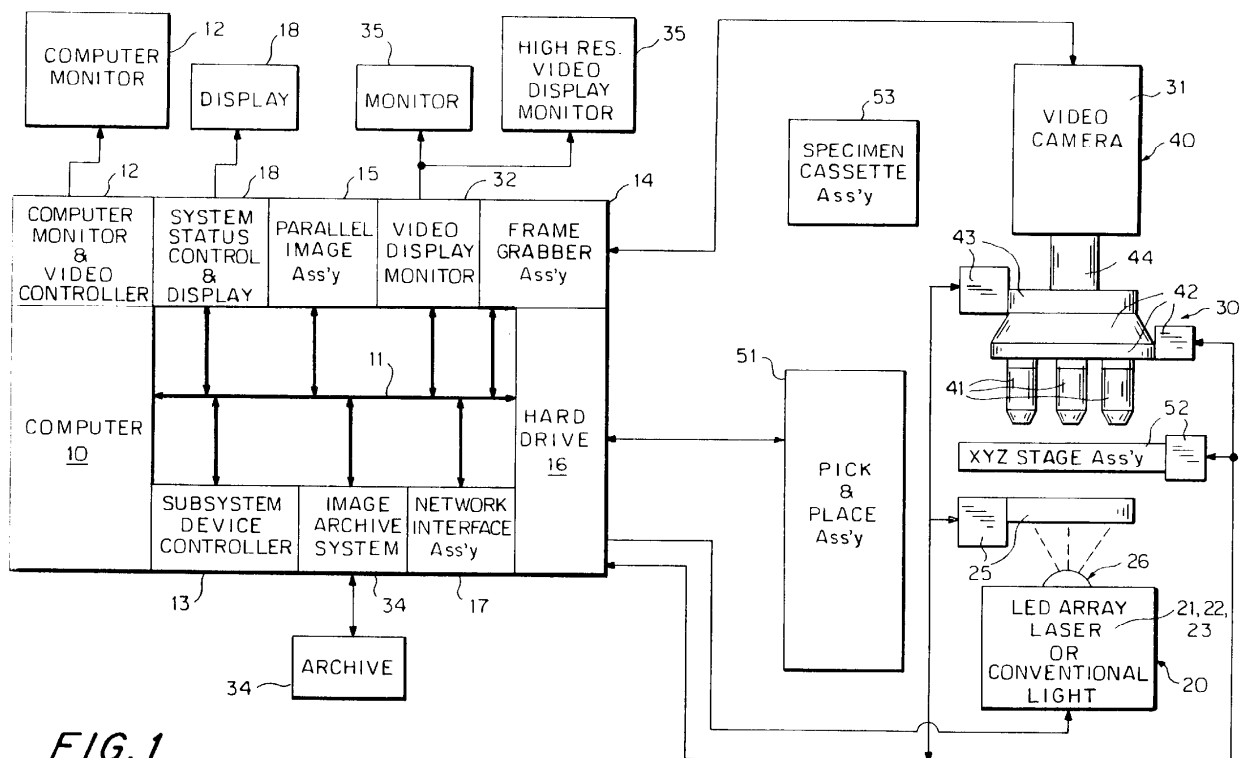


FIG. 1

Рис. 1.5. Система автоматичної флуоресцентної мікроскопії відповідно до патенту US 6122396 A

Використання флуоресцентної мікроскопії дозволяє збільшити контрастність об'єктів, вивчати морфологію живих і мертвих клітин мікроорганізмів, досліджувати клітинні мікроструктури, що вибірково поглинають різні флуорохроми і є при цьому специфічними цитохімічними індикаторами, визначати функціонально-морфологічні зміни мікроорганізмів, підвищити точність класифікації мікроорганізмів. Порівняно з попереднім методом необхідна підготовка зразка і розміщення його під мікроскопом, що збільшує час вимірювання. Також недоліком

даного методу є виконання ідентифікації в лабораторних, а не польових умовах, що унеможливорює експрес-аналіз в місці пробовідбору й потребує додаткових затрат часу на транспортування проби в лабораторію.

1.3. Класифікація методів визначення концентрації мікропланктону

Відомі методи вимірювання концентрації та складу мікропланктону в поверхневих водах можна класифікувати за наступними критеріями:

1) за місцем виконання:

- в лабораторії;
- за місцем відбору проби.

Виконання вимірювань в лабораторії передбачає підготовку обладнання для забору проб, виїзд на місце відбору проб, власне відбір проб, в деяких випадках консервацію проб, доставку проб у лабораторію та виконання аналізу проби. Це призводить до значної затримки між моментом забору проб та отриманням результату вимірювання. Виконання цих операцій потребує значних трудовитрат в перерахунку на одне вимірювання. Щоб зменшити вищенаведені недоліки, використовуються автоматизовані та автоматичні вимірювальні системи, що зменшують тривалість вимірювання та суб'єктивну складову похибки вимірювання.

Виконання вимірювань за місцем відбору проби вимагає компактних та енергоефективних інструментів і засобів вимірювання, які можна легко транспортувати між точками пробовідбору та які можуть працювати без зовнішнього джерела живлення. При цьому мінімізується тривалість вимірювання, оскільки виключається час доставки проб води в лабораторію, що здійснює вимірювання.

Також відомий метод, що передбачає отримання відеозапису мікропланктону в місці вимірювання за допомогою автономного безпілотного підводного пристрою, проте аналіз відеозапису виконується в лабораторії. Передача файлу через засоби зв'язку дозволяє зменшити

тривалість вимірювання на величину часу доїзду транспорту в лабораторію, що здійснює вимірювання.

2) за необхідністю підготовки проби:

- з підготовкою проби;
- без підготовки проби.

Підготовка проби може включати в себе консервацію свіжовідібраної проби, послідовне фільтрування проби через фільтри і мікросита з різним діаметром, додавання в пробу допоміжних речовин тощо.

3) за способом класифікації мікроорганізмів:

- ручна класифікація;
- автоматизована класифікація;
- автоматична класифікація.

При ручній класифікації лаборант за допомогою мікроскопу підраховує кількість мікроорганізмів кожної класифікаційної групи. При цьому вноситься суб'єктивна складова похибки, проте складні для розпізнавання комп'ютером об'єкти, наприклад, проходження одного мікроорганізму на фоні іншого, правильно підраховуються. Ручна класифікація та підрахунок займає багато часу, тому такі вимірювання найбільш довготривалі.

Під часу автоматизованої класифікації лаборант вказує ділянку зображення з мікроскопа, де розташований організм, а власне класифікація виконується комп'ютером. Це усуває суб'єктивну складову похибки вимірювання та зменшує вимоги до персоналу, проте тривалість такого вимірювання майже не відрізняється від ручної класифікації.

Автоматична класифікація виконується повністю комп'ютером. Вона дозволяє суттєво зменшити тривалість підрахунку організмів мікропланктону в полі зору мікроскопа. Використання автоматичної класифікації дозволяє створювати швидкодіючі інформаційно-вимірювальні системи, що аналізують потік води. При цьому відпадає

потреба у фільтруванні проби й розміщенні відфільтрованих організмів на предметному склі мікроскопа.

1.4. Обґрунтування та вибір напрямку дослідження

Для усунення зазначених вище недоліків існуючих методів і більш оперативного виявлення змін стану водойми, спричинених забрудненнями, потрібно розробити метод визначення концентрації мікропланктону, що використовується як біологічний показник якості води відкритих водойм, який дозволить здійснювати вимірювання автоматично у неперервному потоці, володітиме більшою швидкістю, повторюваністю в порівнянні з ручним аналізом та портативний пристрій на його основі, за допомогою якого можна здійснювати експрес-аналіз в точці відбору без необхідності забору значних об'ємів проб та пробопідготовки. Також пристрій повинен забезпечувати можливість додавання нових видів мікроорганізмів, які він здатен розпізнавати, без необхідності проводити навчання значною кількістю зображень мікроорганізму, що дозволить знизити вимоги до кваліфікації персоналу. Відповідно до наведеного вище, задачі дисертаційного дослідження наступні:

- Розробити базу ознак організмів мікропланктону та програмне забезпечення їх розпізнавання за допомогою комп'ютерного зору.
- Провести експериментальні дослідження по неперервному відстеженню організмів мікропланктону в потоці, виявити перешкоди, якими супроводжується виявлення та відстеження потоку мікроскопічних об'єктів у полі зору мікроскопа.
- Розробити метод вимірювання концентрації організмів мікропланктону, що включає автоматичне відстеження, підрахунок та класифікацію організмів мікропланктону.
- Розробити і виготовити автоматичний портативний проточний прилад вимірювання концентрації організмів мікропланктону, що має підвищену швидкість та повторюваність аналізу у порівнянні із

існуючими засобами вимірювань.

- Провести випробування розробленого пристрою вимірювання концентрації організмів мікропланктону.

Висновки до розділу 1

1. Вимірювання концентрації мікропланктону для оцінки якості води за біологічними показниками традиційними методами, що затверджені нормативними документами, характеризується значною тривалістю та наявністю суб'єктивної складової в похибці вимірювання.

2. Відомі методи і прилади вимірювання концентрації мікропланктону дозволяють різною мірою автоматизувати процес, проводити вимірювання як в лабораторних, так і в польових умовах. Зменшити тривалість вимірювання можливо, виконуючи розпізнавання мікропланктону одразу на місці відбору проби. Проте відомі пристрої, які дозволяють проводити вимірювання безпосередньо в місці пробовідбору, формують монохроматичне зображення з використанням лазера, що істотно зменшує кількість інформації, що може використовуватися для класифікації.

3. Існує потреба в розробці нових методів і пристроїв вимірювання концентрації мікропланктону з суттєво меншою тривалістю вимірювання, які можливо застосовувати для оперативного контролю екологічного стану водойми за біологічними показниками якості води.

РОЗДІЛ 2

СПОСІБ ОПИСУ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ МІКРОПЛАНКТОНУ.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ

ОРГАНІЗМІВ МІКРОПЛАНКТОНУ

2.1. Обґрунтування способу опису організмів мікропланктону

Для класифікації об'єктів засобами комп'ютерного зору нині використовують два підходи: класифікація за допомогою попередньо навченої нейронної мережі та класифікація пошуком особливих ознак об'єкта різноманітними алгоритмами [46-48].

Штучні нейронні мережі можуть отримувати на вхід як безпосередньо аналізоване зображення, так і набір ознак, що описують це зображення та отримані іншими алгоритмами. Відповідно у першому випадку вся обробка зображення здійснюється штучною нейронною мережею й спосіб вирішення задачі класифікації «прихований» у зв'язках штучної нейронної мережі, а не представлений у явному вигляді. В другому випадку до зображення застосовують певні алгоритми пошуку й у явному вигляді отримують класифікаційні параметри, які описують ознаки об'єкта (наприклад, наскільки форма мікроорганізму видовжена або навпаки близька до кулястої), і вже ці класифікаційні параметри подають на входи штучної нейронної мережі. Значення виходів нейронної мережі показують оцінку приналежності знайденого об'єкта кожній класифікаційній групі (виду або роду мікропланктону).

Відповідно опис морфології організмів мікропланктону для класифікації засобами комп'ютерного зору можливий двома шляхами:

1. Навчання нейронної мережі великою кількістю зображень мікроорганізму. Необхідно зібрати базу зображень різних мікроорганізмів, а також інших мікроскопічних об'єктів, що можуть бути наявні у воді, для навчання нейронної мережі.

2. Виділення особливих ознак мікроорганізму визначеним алгоритмом

обробки зображення. Необхідно визначити класифікаційні параметри, які можна отримати із відеокадрів і відмінності між значеннями яких у різних груп організмів мікропланктону будуть достатніми для їх розрізнення.

Методи проточного аналізу та вимірювання концентрації мікроорганізмів у потоці забезпечують менший час вимірювання порівняно з дослідженням окремих проб води, які по чергово досліджуються під мікроскопом, тому розроблений метод повинен забезпечувати можливість проведення неперервного вимірювання концентрації організмів мікропланктону в потоці досліджуваної води, що вимагає обробки відеопотоку з мікроскопа в реальному часі.

Аналіз відеопотоку в реальному часі накладає обмеження на обчислювальну складність обробки кожного кадру, оскільки ця обробка повинна закінчитись до моменту надходження наступного відеокадру. Це обмежує використання штучних нейронних мереж, що отримують на вхід відеокадр повністю й складаються з тисяч нейронів, оскільки при достатньо складній структурі мережі для забезпечення потрібної швидкості обробки виникає потреба використання спеціалізованих нейропроцесорів або графічних процесорів, а також значного обсягу пам'яті для роботи. Такі штучні нейронні мережі можуть виконуватись на центральному процесорі загального призначення, але час отримання результату класифікації буде значно перевищувати період формування кадрів відеокамери, таке використання доцільно при аналізі окремих фотографій проб води з мікропланктоном, коли значний час займає підготовка та розміщення проби. Щоб збільшити продуктивність (об'єм прокачуваної та проаналізованої води за 1 с), можна використати відеокамеру з високою частотою кадрів. Але її використання ще більше підвищує вимоги до часу обробки кадру й обчислювальної складності. Тому аналіз відеопотоку з мікроскопа в реальному часі доцільно проводити застосуванням алгоритмів, які мають меншу обчислювальну складність.

Навчання нейронних мереж вимагає наявності великої кількості попередньо класифікованих зображень мікроорганізмів, що вимагає значних трудовитрат на ручну класифікацію сотень і тисяч зображень. Враховуючи, що біологічний опис кожного виду, як правило, містить морфологічний опис, то оцінка класифікаційних ознак і значень класифікаційних параметрів для кожного виду вимагає менших затрат часу, ніж формування даних для навчання штучної нейронної мережі. Використання цього методу класифікації забезпечить менше використання обчислювальних ресурсів та спростить введення нових видів мікроорганізмів у базу даних ознак мікропланктону.

Враховуючи мінливість живих організмів, класифікаційні параметри задані не строгими математичними умовами «більше», «менше», а задані за допомогою нечітких множин, що дозволяє більш гнучко налаштовувати умови належності організму до класифікаційної групи (роду, виду).

2.2. Класифікаційні параметри організмів мікропланктону

Для класифікації мікроорганізмів використані наступні класифікаційні параметри.

1. Абсолютна довжина та абсолютна ширина

Обчислення довжини та ширини як різниці між відповідно крайньою лівою і крайньою правою та найвищою і найнижчою точками об'єкта не може застосовуватись при визначенні параметрів мікроорганізмів (рис. 2.1), оскільки залежно від положення організму «довжина» може приймати як дійсне значення довжини l (якщо

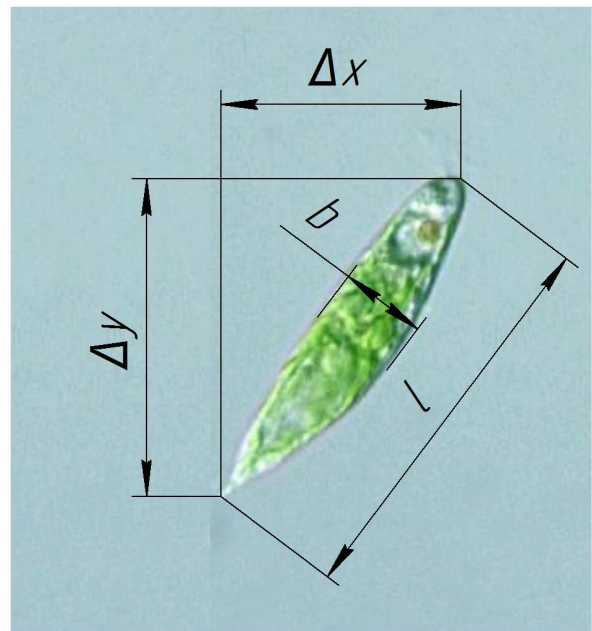


Рис. 2.1. Відмінності між дійсними довжиною та шириною і різницями координат

мікроорганізм розташований горизонтально), так і значення ширини b (якщо мікроорганізм розташований вертикально).

Тому для вимірювання абсолютної ширини та довжини знайденого мікроорганізму необхідно обрати напрямок, вздовж якого потрібно проводити визначення лінійного розміру. Для цього зовнішній контур мікроорганізму обходиться з певним кроком і визначається відстань від поточної точки контуру до решти точок. Пара точок контуру, відстань між якими максимальна, і слугує напрямком вимірювання відстані.

Для визначення ширини виконується поворот зображення так, щоб лінія, вздовж якої вимірювалась довжина, стала горизонтальною, тобто на кут $\alpha = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}$. Після повороту, починаючи від крайньої лівої точки контуру, збільшується горизонтальна координата на кожній ітерації (рис. 2.2)

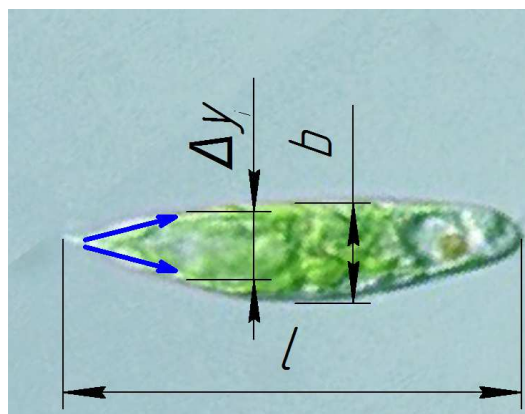


Рис. 2.2. Визначення ширини об'єкта

та обчислюється різниця вертикальних координат двох точок контуру, що мають однакову горизонтальну координату. Максимальна різниця координат, що була знайдена в результаті проходження всього контуру, відповідає ширині мікроорганізму b .

2. Відносна ширина

Відносна ширина організму мікропланктону обчислюється як відношення абсолютної ширини до абсолютної висоти і є безрозмірною величиною з діапазону (0; 1].

3. Еквівалентний діаметр

Еквівалентний діаметр – діаметр круга, площа якого дорівнює площі S знайденого мікроорганізму, тобто

$$d_{екв} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} . \quad (2.1)$$

Дозволяє оцінювати розміри мікроорганізмів, які не мають сталої форми, наприклад, амеби.

4. Коефіцієнт випуклості

Коефіцієнт випуклості дорівнює відношенню площі мікроорганізму S до площі випуклого багатокутника, в який вписано контур мікроорганізму, S_g :

$$k_g = \frac{S}{S_g}. \quad (2.2)$$

5. Коефіцієнт заповнення

Коефіцієнт заповнення дорівнює відношенню площі мікроорганізму S до площі прямокутника, описаного навколо нього [49], тобто:

$$k_s = \frac{S}{lb}. \quad (2.3)$$

6. Компактність

Компактність обчислюється як відношення квадрату периметра до площі мікроорганізму:

$$c = \frac{P^2}{S}. \quad (2.4)$$

Дозволяє оцінити розгалуженість мікроорганізму.

7. Радіус середньої лінії

В напрямку, в якому довжина мікроорганізму найбільша, він апроксимується дугою. Початком та кінцем дуги є відповідно крайня ліва та крайня права точки мікроорганізму, зображення якого було повернуто при визначенні абсолютної довжини. Для пошуку третьої точки дуги обчислюється горизонтальна координата середини відрізка між крайніми точками та виконується пошук точок зовнішнього контура мікроорганізму з такою координатою. В результаті пошуку знаходяться дві точки, обчислюється середнє арифметичне їх вертикальних координат. Маючи координати середньої точки і кінців дуги, можна знайти радіус дуги та координати центра. Підставивши координати точок в рівняння кола,

отримуємо систему з трьох рівнянь, з якої визначається радіус.

8. Середній колір

Значення кольору в колірній моделі HSV (Hue - колірний тон, Saturation - насиченість, Value - яскравість), отримане як середнє арифметичне всіх точок знайденого організму мікропланктону.

9. Швидкість руху відносно потоку

Власна швидкість мікроорганізму, що обчислюється векторним відніманням від швидкості руху мікроорганізму в полі зору мікроскопа швидкості потоку.

10. Швидкість зміни довжини

Швидкість зміни довжини обчислюється за декілька послідовних кадрів і дозволяє виокремити мікроорганізми, що змінюють свою форму.

11. Багатоклітинність

Перевірка наявності всередині об'єкта однотипних рівномірно розташованих елементів (клітин) за алгоритмом, наведеним в п. 2.8. Дозволяє збільшити точність виявлення і класифікації колоніальних та багатоклітинних організмів.

Перелік класифікаційних параметрів можна розширити, аналізуючи додатково внутрішню будову мікроорганізмів і вводячи параметри, що описують деталі внутрішньої будови (наявність органел, їх колір, положення всередині організму тощо).

Оскільки мінливість мікроорганізмів не має дискретного характеру, то значну частину класифікаційних параметрів доцільно описувати не класичною бінарною логікою (наприклад, довжина 18 мкм – належить до виду, 17,9 мкм – не належить), а нечіткою логікою, що дозволяє згладити межі значень параметрів для кожного виду й правильно класифікувати ті екземпляри мікропланктону, що мають граничні значення параметрів.

Запропоновано множину допустимих значень кожного класифікаційного параметра для кожної класифікаційної групи (виду, роду)

описувати трапецевидною функцією приналежності (рис. 2.3).

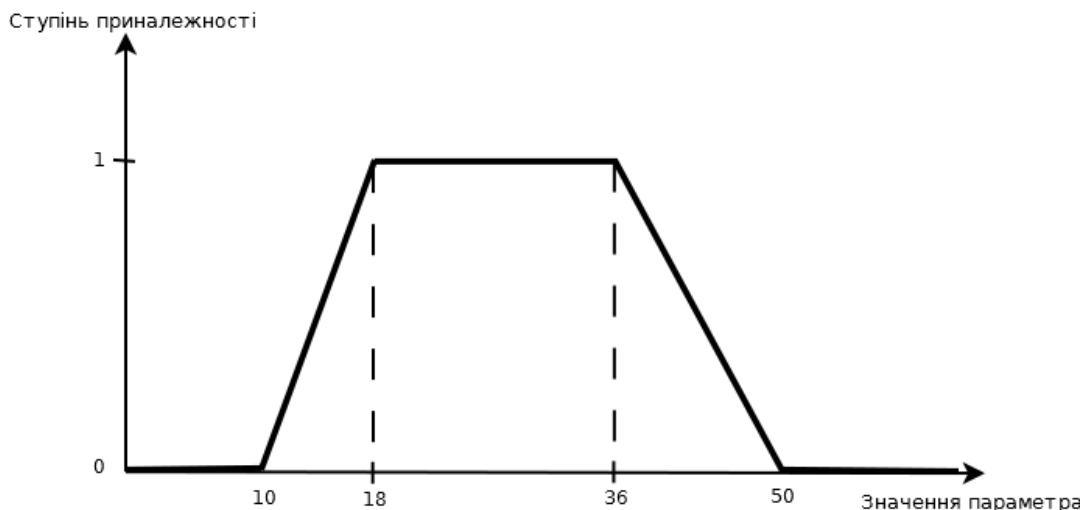


Рис. 2.3. Функція приналежності нечіткої множини

Визначення біологічних показників якості води передбачає обчислення певного інтегрального показника якості на основі концентрацій індикаторних організмів [50]. Відомі декілька інтегральних біологічних показників якості води, які дозволяють кількісно оцінити якість води за біологічними показниками. Серед них один з найбільш широко застосовуваних показників – індекс сапробності Пантле-Бука та його численні модифікації. Історично спочатку він враховував розвиток живих організмів, поширених в прісних водоймах Західної Європи, проте подальші модифікації значно розширили географічні межі, в яких він може бути застосований. У ряді модифікацій цього індексу замість індикаторних видів використовуються роди або навіть родини гідробіонтів. Ці таксони набагато легше у визначенні та мають ширші ареали. Різні модифікації індексу сапробності включають до 2000 видів індикаторних організмів різного розміру та способу життя (планктон, нектон, бентос). Частина з них відноситься до мікропланктону і має розмір 2...300 мкм, наприклад, *Amoeba*, *Paramecium caudatum*, *Euglena viridis*, *Cyclops varius*, *Trachelomonas volvocina*, *Pediastrum*, *Coelastrum microporum*, *Chlorella*, *Ulothrix zonata*. Мікропланктон таких розмірів добре розрізняється за

допомогою оптичного мікроскопу й швидко реагує зміну концентрації забруднювачів. Тому вимірювання концентрації мікропланктону такого розміру дозволяє оперативно реагувати на зміни концентрації забруднювачів.

2.3. Опис організмів мікропланктону за допомогою класифікаційних параметрів

Межі класифікаційних параметрів було визначено для нижчезазначених організмів мікропланктону.

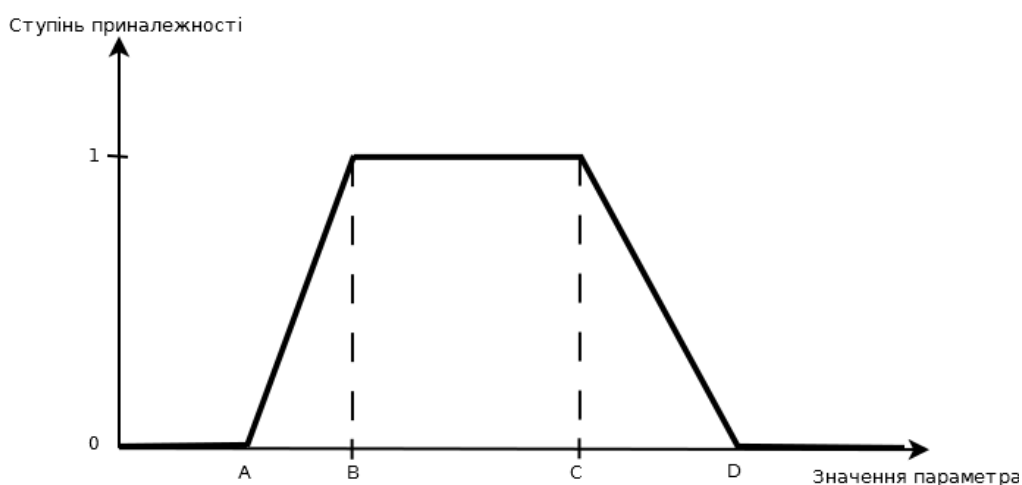


Рис. 2.4. Вигляд нечітких множин, якими надалі описуватимуться класифікаційні параметри

Межі подаються у вигляді координат точок A, B, C, D (рис. 2.4), які утворюють ділянки $(0; A]$, $[D; +\infty)$ з нульовим ступенем приналежності, $[B; C]$ зі значенням ступеня приналежності, рівним одиниці, ділянку $[A; B]$, де функція приналежності зростає від 0 до 1, та ділянку $[C; D]$, на якій функція приналежності спадає від 1 до 0.

Далі в таблицях *тах* – максимально можливе значення параметра (обмежується розрядністю змінних). Швидкість власного руху і швидкість зміни довжини – середня за 4 кадри.

Амoeba

Amoeba proteus (рис. 2.5) має розміри



Рис. 2.5. *Amoeba proteus*

200-760 мкм [51] та неправильну форму тіла з однією або декількома псевдоподіями. Має ядро розміром 22-62 мкм. В цитоплазмі можуть бути травні вакуолі з іншими мікроорганізмами всередині. Вагомою класифікаційною ознакою є неправильна розгалужена форма тіла, що відповідає великим значенням компактності.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Межі класифікаційних параметрів для *Amoeba proteus*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	180	200	760	800
Абсолютна ширина, мкм	28	35	760	800
Відносна ширина	0,15	0,2	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	80	100	395	800
Коефіцієнт випуклості	0,1	0,15	0,5	1
Коефіцієнт заповнення	0,1	0,15	0,9	1
Компактність	12,56	19	532	700
Радіус середньої лінії, мкм	30	40	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	0	0	360	360
- насиченість	0	0	20	22
- яскравість	56	60	95	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0,08	v_{max}	v_{max}
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0,02	50	100
Багатоклітинність	0	0	0	0

Chlorella

Організми роду *Chlorella* (рис. 2.6) круглої форми розмірами 2-10 мкм [52]. Це фотосинтезуючі одноклітинні зелені водорості, широко поширені у водоймах. Клітини мають кулясту або злегка



Рис. 2.6. *Chlorella vulgaris*

еліпсоїдальну форму. Окремі джерела описують діаметр до 15 мкм [53]. У клітині знаходиться одне ядро і тільки один хлоропласт.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному роду, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Межі класифікаційних параметрів для *Chlorella*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	2	2	10	15
Абсолютна ширина, мкм	2	2	10	15
Відносна ширина	0,85	0,9	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	2	2	10	15
Коефіцієнт випуклості	0,92	0,95	1	1
Коефіцієнт заповнення	0,65	0,7	0,8	0,85
Компактність	12,56	12,56	18	20
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	65	68	141	145
- насиченість	30	33	100	100
- яскравість	40	42	100	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	0	0	0	0

Coelastrum microporum

Колоніальні організми виду *Coelastrum microporum* (рис. 2.7) складаються з клітин круглої форми розмірами 4-30 мкм у діаметрі [54]. Це фотосинтезуючі колоніальні зелені водорості. Колонії мають кулясту форму з діаметром до 100 мкм та налічують 4, 8, 16, 32 або 64 клітин [55].

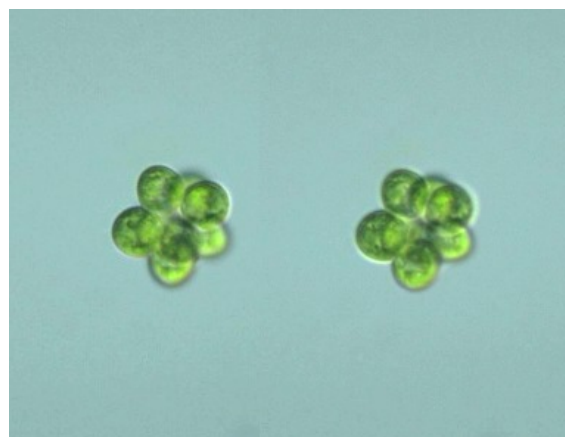


Рис. 2.7. *Coelastrum microporum*

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Межі класифікаційних параметрів для *Coelastrum microporum*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	7	8	100	120
Абсолютна ширина, мкм	7	8	100	120
Відносна ширина	0,75	0,8	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	6	7	100	110
Коефіцієнт випуклості	0,85	0,89	0,97	0,98
Коефіцієнт заповнення	0,6	0,63	0,73	0,8
Компактність	14	15	25	30
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	80	85	149	155
- насиченість	41	48	100	100
- яскравість	31	35	80	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	2	4	64	64

Cyclops varius

Багатоклітинні організми виду *Cyclops varius* (рис. 2.8) – це веслоногі рачки розміром 0.5 to 2 мм в довжину [56], що не дозволяє їх повністю спостерігати в мікроскоп. Проте їх личинки (наупліуси) мають розміри 120-250 мкм та їх наявність у воді служить індикатором розмноження циклопів. Здатні до самостійного руху зі швидкістю до 4-6 мм/с.



Рис. 2.8. *Cyclops varius*

Значення класифікаційних параметрів,

притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Межі класифікаційних параметрів для *Cyclops varius*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	100	120	250	2000
Абсолютна ширина, мкм	33	40	100	800
Відносна ширина	0,15	0,17	0,6	0,8
Еквівалентний діаметр, мкм	64	78	188	1000
Коефіцієнт випуклості	0,55	0,67	0,87	0,9
Коефіцієнт заповнення	0,35	0,43	0,58	0,8
Компактність	20	23	63	70
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	0	0	360	360
- насиченість	0	0	33	35
- яскравість	15	19	40	45
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0,08	v_{max}	v_{max}
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	0	2	1000	1000

Euglena viridis

Euglena viridis (рис. 2.9) відноситься до одноклітинних протистів і може житися як за допомогою фотосинтезу, так і гетеротрофно. Має розміри 25-70 мкм [57-58] та веретеноподібну форму тіла під час руху. Високопластична в стаціонарному стані. Ширина 12-20 мкм. Передній кінець заокруглений, задній – загострений. Пересувається за допомогою джгутика, який

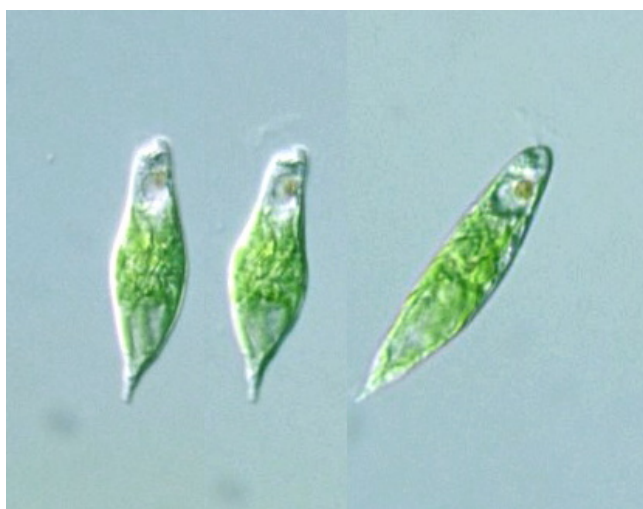


Рис. 2.9. *Euglena viridis*

практично не видно в оптичний мікроскоп.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Межі класифікаційних параметрів для *Euglena viridis*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	22	25	75	90
Абсолютна ширина, мкм	10	12	20	24
Відносна ширина	0,1	0,12	0,25	1
Еквівалентний діаметр, мкм	19	20	43	80
Коефіцієнт випуклості	0,83	0,87	0,97	1
Коефіцієнт заповнення	0,4	0,65	0,73	0,8
Компактність	13	15	22	29
Радіус середньої лінії, мкм	43	47	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	65	68	141	145
- насиченість	30	33	100	100
- яскравість	40	42	100	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0,08	v_{\max}	v_{\max}
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,12	0,12
Багатоклітинність	0	0	0	0

Paramecium caudatum

Вид *Paramecium caudatum* (рис. 2.10) має характерну форму тіла, що нагадує відбиток туфлі. Розміри 180-300 мкм [59]. Ширина 45-70 мкм. Тіло вкрите війками, за допомогою яких мікроорганізм пересувається у воді. Більшість органел забарвлені слабо, але в травних вакуолях можуть знаходитись поглинені одноклітинні



Рис. 2.10. *Paramecium caudatum*

зелені або синьо-зелені водорості.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. Межі класифікаційних параметрів для *Paramecium caudatum*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	160	180	300	320
Абсолютна ширина, мкм	40	45	70	75
Відносна ширина	0,15	0,2	0,3	0,35
Еквівалентний діаметр, мкм	70	95	158	200
Коефіцієнт випуклості	0,85	0,91	0,99	1
Коефіцієнт заповнення	0,5	0,53	0,85	0,95
Компактність	22	25	30	38
Радіус середньої лінії, мкм	450	500	3000	50000
Середній колір:				
- колірний тон	0	0	360	360
- насиченість	0	0	12	14
- яскравість	41	45	79	90
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0,08	v_{\max}	v_{\max}
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	0	0	0	0

Pediastrum

Колоніальні організми роду *Pediastrum* (рис. 2.11) складаються з клітин, що організуються в колонії круглої форми, причому клітини в колоніях мають вирости, спрямовані назовні, тому колонія має зіркоподібну форму. Розмір колоній, що налічують 4, 8,

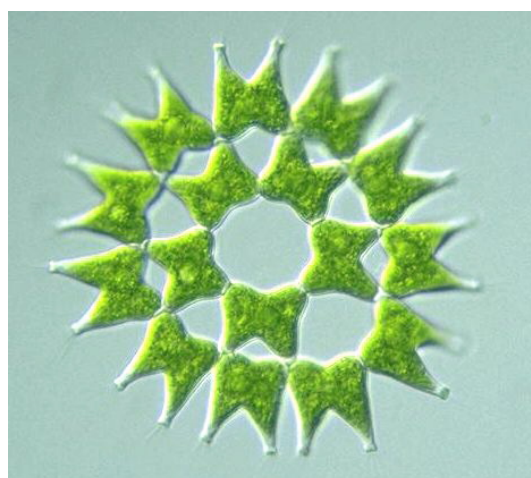


Рис. 2.11. *Pediastrum duplex*

16, 32 клітин, складає 40-170 мкм у діаметрі [60-61]. Це фотосинтезуючі колоніальні зелені водорості.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Межі класифікаційних параметрів для *Pediastrum*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	30	40	170	190
Абсолютна ширина, мкм	30	40	170	190
Відносна ширина	0,92	0,94	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	28	37	161	180
Коефіцієнт випуклості	0,6	0,68	0,92	0,94
Коефіцієнт заповнення	0,45	0,51	0,72	0,8
Компактність	18	19	127	140
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	83	86	134	145
- насиченість	41	48	100	100
- яскравість	35	45	75	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	2	4	32	32

Trachelomonas volvocina

Trachelomonas volvocina (рис. 2.12) відноситься до одноклітинних водоростей класу Евгленових. Має розміри 10-26 мкм [62] та близьку до кулястої форму тіла. Панцир (lorica) цих організмів на початку безбарвний і тонкий (тому клітини мають зелений колір), але з часом вони накопичують солі заліза та



Рис. 2.12. *Trachelomonas volvocina*

марганцю й забарвлення змінюється до відтінків бурого, коричневого та золотистого кольорів [63]. Пересувається за допомогою джгутика.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8. Межі класифікаційних параметрів для *Trachelomonas volvocina*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	7	10	26	31
Абсолютна ширина, мкм	7	10	26	31
Відносна ширина	0,85	0,88	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	7	10	26	31
Коефіцієнт випуклості	0,95	0,96	1	1
Коефіцієнт заповнення	0,65	0,7	0,8	0,85
Компактність	12,56	12,56	16	18
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	28	30	125	130
- насиченість	62	65	100	100
- яскравість	40	43	78	80
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0,08	v_{max}	v_{max}
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	0	0	0	0

Ulothrix zonata

Багатоклітинні водорості *Ulothrix zonata* (рис. 2.13) складаються одного ряду клітин довжиною 12-28 мкм та шириною 12-36 мкм [64-65]. Як правило, ширина клітин більша, ніж довжина, проте в умовах недостатньої освітленості (взимку) розвиваються організми з відносно довгими клітинами зі слабкою



Рис. 2.13. *Ulothrix zonata*

пігментацією.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному виду, наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9. Межі класифікаційних параметрів для *Ulothrix zonata*

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	50	60	1000	1000
Абсолютна ширина, мкм	10	12	36	40
Відносна ширина	0,01	0,01	0,2	0,25
Еквівалентний діаметр, мкм	12	12	1000	1000
Коефіцієнт випуклості	0,78	0,8	0,95	1
Коефіцієнт заповнення	0,47	0,49	0,80	0,85
Компактність	29	32	55	75
Радіус середньої лінії, мкм	600	1000	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	90	95	112	120
- насиченість	52	56	100	100
- яскравість	40	44	73	83
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	4	5	100	100

Повітряна бульбашка

Бульбашки повітря різного розміру (рис. 2.14) можуть потрапляти в аналізовану воду й в поле зору мікроскопа. Утворюють майже ідеальне коло та повністю прозорі, тому можуть бути класифіковані за значенням параметра компактності, близьким до 4π , та кольором об'єкту, що співпадає з кольором фону. Виділення окремої класифікаційної групи для повітряних бульбашок дозволяє



Рис. 2.14. Повітряна бульбашка

зменшити кількість хибних розпізнавань їх як мікроорганізмів.

Значення класифікаційних параметрів, притаманних даному об'єкту, наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10. Межі класифікаційних параметрів для повітряної бульбашки

Параметр	A	B	C	D
Абсолютна довжина, мкм	5	5	1000	1000
Абсолютна ширина, мкм	5	5	1000	1000
Відносна ширина	0,98	0,98	1	1
Еквівалентний діаметр, мкм	5	5	1000	1000
Коефіцієнт випуклості	0,99	0,99	1	1
Коефіцієнт заповнення	0,75	0,75	0,79	0,79
Компактність	12,5	12,5	15	15
Радіус середньої лінії, мкм	0	0	max	max
Середній колір:				
- колірний тон	0	0	360	360
- насиченість	0	0	40	45
- яскравість	65	70	100	100
Швидкість руху відносно потоку, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Швидкість зміни довжини, мкм/с	0	0	0,01	0,01
Багатоклітинність	0	0	0	0

Додавання нових видів або родів організмів мікропланктону зводиться до визначення меж класифікаційних параметрів, частина з яких в явному вигляді вказана в морфологічному описі виду, та занесення їх бази даних, яка використовується програмою обробки відео та класифікації, без внесення змін в джерельний код самої програми.

З вищенаведеного випливає, що програмне забезпечення повинно реалізовувати алгоритм, що забезпечує виявлення, відстеження, класифікацію та підрахунок організмів мікропланктону окремо по кожній класифікаційній групі (виду, роду) у відеопотоці (послідовності

відеокадрів) із зображенням досліджуваної води [10].

2.4. Метод вимірювання концентрації мікропланктону

Враховуючи недоліки відомих методів аналізу біологічних показників якості води та вимірювання концентрації мікропланктону, запропоновано метод аналізу проб води за допомогою комп'ютерного зору шляхом введення потоку аналізованої води в поле зору мікроскопа замість нерухомого розміщення проби [11]. При цьому концентрацію організмів мікропланктону пропонується визначати не шляхом співвідношення кількості знайдених мікроорганізмів у полі зору мікроскопа до площі поля зору на кадрах, зроблених з порівняно великою паузою, а шляхом неперервного відстеження кожного мікроорганізму при проходженні в полі зорі мікроскопа з одночасним підрахунком об'єму досліджуваної води (рис. 2.15).

Вимірювання концентрацій різних груп організмів мікропланктону передбачає послідовність операцій з трансформації та обробки відеокадрів з цифрового мікроскопа [1], що спрямований на вміст комірки з досліджуваною водою (рис. 1).

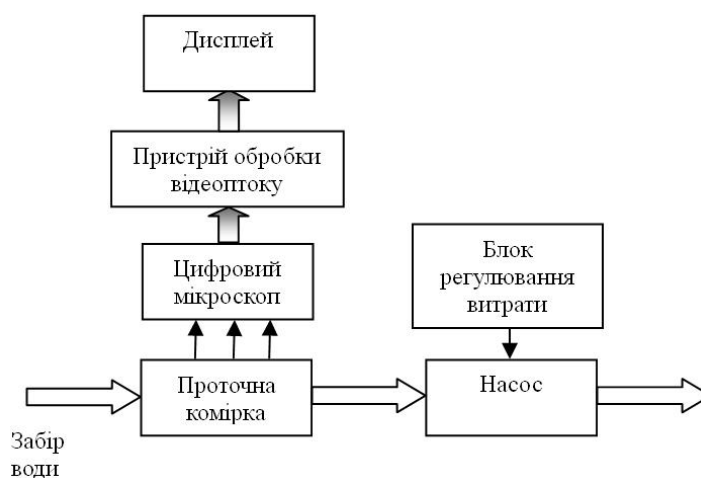


Рис. 2.15. Схема пристрою для реалізації запропонованого методу

Досліджувана вода прокачується через оптично прозору проточну комірку перистальтичним насосом. Продуктивність насоса задається блоком регулювання витрати.

Суть методу полягає в наступному: досліджувана вода з водойми прокачується перистальтичним насосом через оптично прозору проточну комірку з плоскопаралельними гранями, відстань між якими повинна бути

досить малою (менше 1 мм); перпендикулярно цим граням встановлюється оптична вісь цифрового мікроскопа, сфокусованого на шар води між гранями. Таким чином в об'єктиві (на світлочутливій матриці) мікроскопа формується зображення потоку води з наявними в ній мікроскопічними об'єктами, зокрема організмами мікропланктону. Потік послідовних відеокадрів з мікроскопа надсилається на комп'ютер, що виконує такі операції: застосування порогового фільтра для виділення об'єктів на відеокадрах від фону (рис. 2.16), відстеження об'єктів, їх підрахунок, обчислення класифікаційних параметрів та класифікацію.

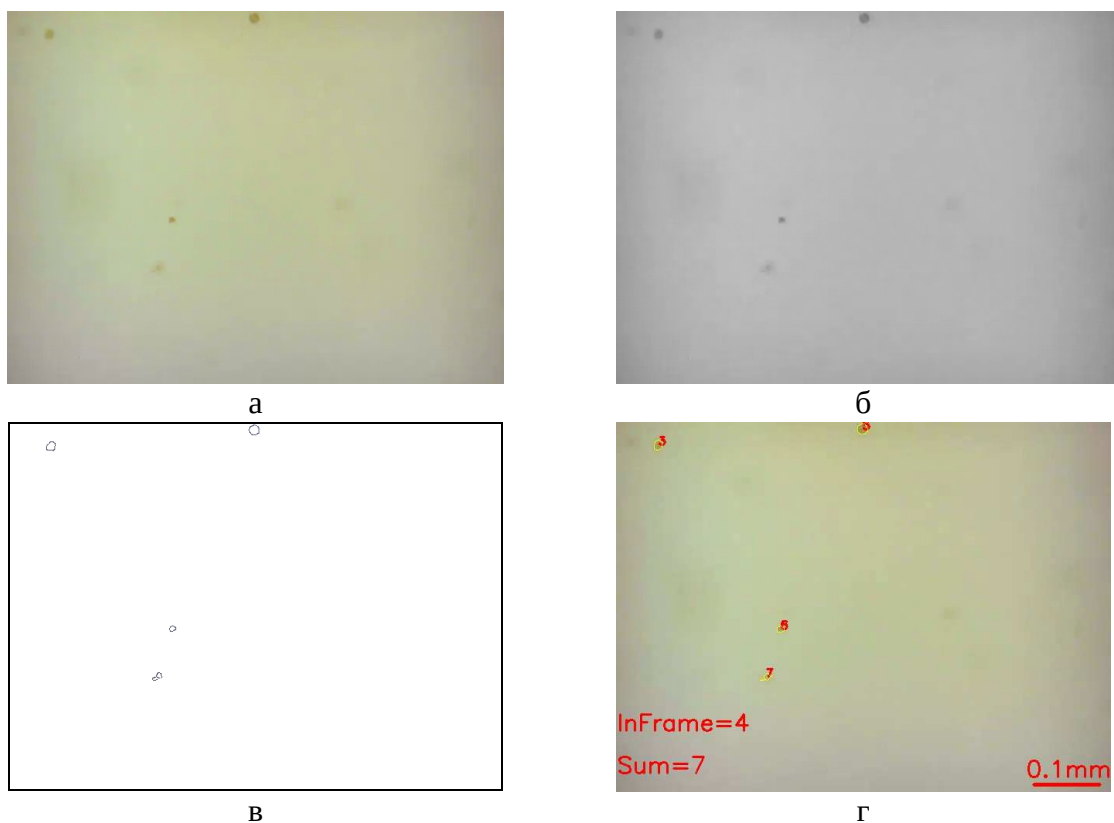


Рис. 2.16. Пошук організмів мікропланктону в полі зору мікроскопа в проточній комірці:

а – необроблений кадр з мікроскопа; б – одноканальне зображення; в – бінарне зображення зі знайденими контурами; г – виведений користувачу кадр

Остання операція здійснюється за допомогою нечіткої логіки на основі обчислених класифікаційних параметрів [16, 17]. Для кожного i -го виду мікропланктону з n видів, який повинен розпізнати пристрій, в базу даних вносяться числові діапазони m параметрів (геометричної форми,

кольору, рухливості) та функції приналежності $\mu_{ij}(x_j)$ кожного j -го параметра, і під час роботи пристрою обчислені значення параметрів об'єкта x_j проходять фазифікацію та обчислюються ступені приналежності A_{ij} об'єкта до кожного виду за кожним параметром. Форма функцій приналежності описує ступінь вірогідності того, що об'єкт з таким значенням параметру належить до даного виду. Після обчислення ступенів приналежності до видів об'єкт відносять до того виду, для якого добуток ступенів приналежності об'єкта по всім параметрам $A_i = \prod_{j=1}^m \mu_{ij}(x_j)$

максимальний $\forall i, A_i^{\max} \geq A_i$. Прокачавши заданий об'єм води через проточну комірку, визначають концентрацію кожного виду мікропланктону як відношення кількості розпізнаних екземплярів до об'єму досліджуваної дози води. Врешті, на основі значень концентрації обчислюється інтегральні біологічні показники якості води водойми, які характеризують стан екосистеми водойми.

Для практичної реалізації запропонованого методу необхідно здійснити дослідження в напрямках:

- запобігання повторного підрахунку одного й того самого мікроорганізму при обчисленні концентрації;
- стабілізації та регулювання швидкості аналізованої води в проточній комірці з метою отримання зображень об'єктів з чіткістю, достатньою для розпізнавання організмів мікропланктону;
- автоматичного підлаштування прогового фільтра при збільшенні колірності води, щоб забезпечити достатню точність визначення меж мікроорганізмів;
- запобігання розпізнавання багатоклітинних та колоніальних організмів мікропланктону як сукупності окремих одноклітинних мікроорганізмів.

2.5. Попередження повторного врахування мікроорганізму

Відстеження руху об'єктів у полі зору мікроскопу виконується наступним чином [13, 14]:

- зображення вмісту оптично прозорої комірки передається цифровим мікроскопом у пристрій обробки відеопотоку;
- до отриманого кадру застосовується перетворення зображення у одноканальне (у відтінках сірого);
- для перетворення зображення з відтінків сірого в бінарне (чорно-біле) застосовується пороговий фільтр з порогом L_0 ;
- виділяються замкнуті контури, що охоплюють чорні ділянки;
- обчислюються координати центрів контурів, їх площі і кольори;
- для кожного об'єкта, знайденого на попередньому кадрі, перевіряється, чи існує в околі v_{max} пікселів (величина v_{max} визначає найбільшу допустиму швидкість руху об'єкта) центр контуру, знайденого на поточному кадрі; якщо існує, координати об'єкта оновлюються до координат центр контуру;
- якщо після обходу всіх контурів на поточному кадрі для об'єкта з попереднього кадру не знайшлося відповідності, то об'єкт вважається таким, що покинув поле зору;
- якщо на поточному кадрі залишилися контури, яким не знайдений відповідний об'єкт з попереднього кадру, вони вважаються новими об'єктами, які вперше з'явилися в полі зору.

Даний алгоритм забезпечує автоматичне відстеження мікроорганізму впродовж часу перебування у фокусі мікроскопа, проте переміщення об'єкта в шари води за межами фокусу, яке супроводжуються падінням інтенсивності кольору відстежуваного об'єкта та чіткості його зображення, зупиняє стеження за мікроорганізмом. У випадку, якщо цей мікроорганізм повернеться у шар води, на який сфокусований мікроскоп, система вважатиме його новим об'єктом, а отже виводитиме користувачеві більше

значення концентрації мікроорганізмів, ніж фактичне. Описана поведінка мікроорганізму ілюструється на рис. 2.17.

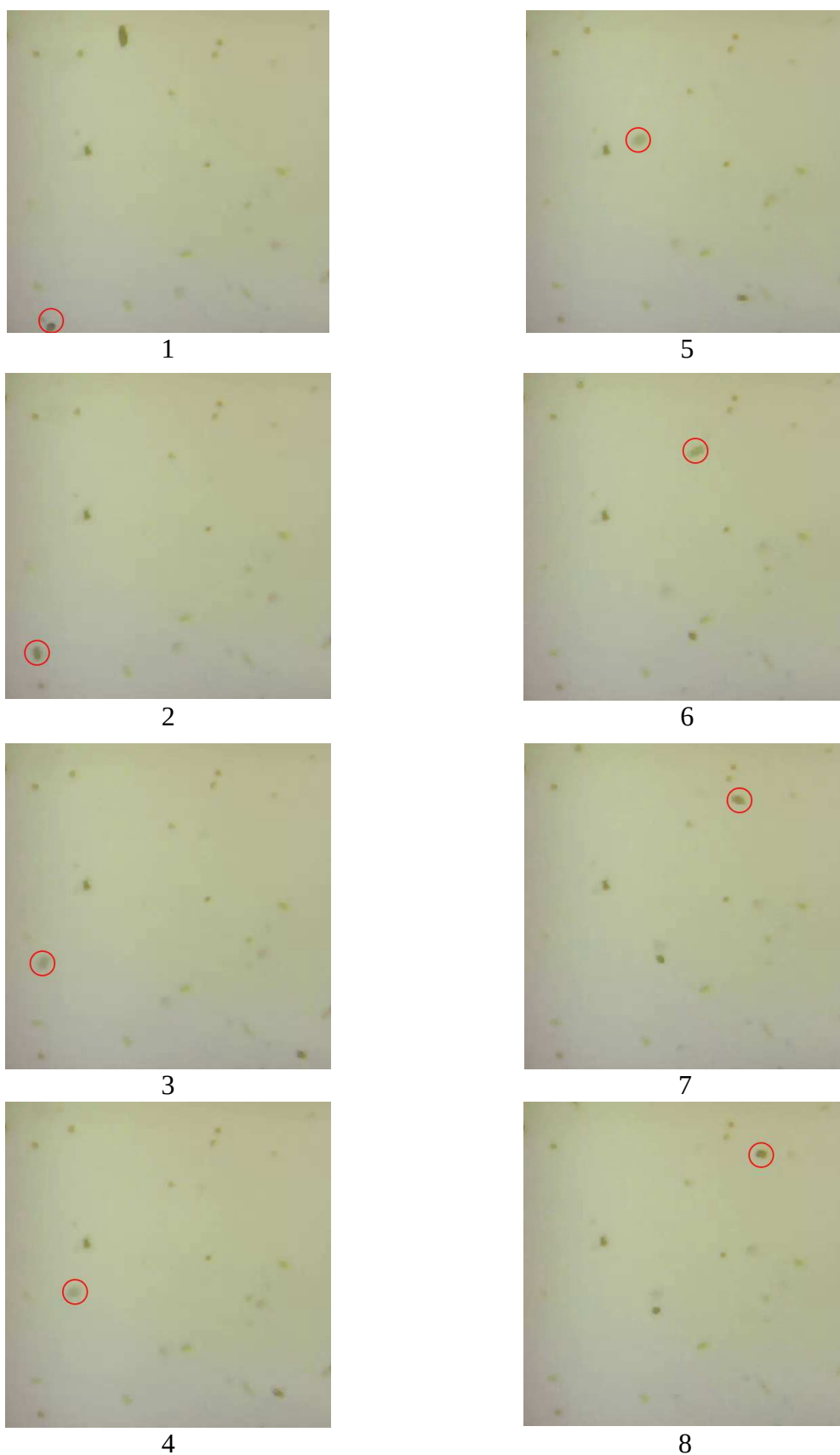


Рис. 2.17. Рух мікроорганізму, що супроводжується виходом його з фокусу мікроскопа, та повернення його у фокус

Виключення повторного врахування об'єктів дозволить збільшити точність визначення концентрації організмів зоопланктону, здатних до самостійного руху [3].

Відстеження мікроорганізму з меншою чіткістю й інтенсивністю кольору шляхом повторного застосування порогового фільтра зі зменшеним порогом до всього зображення приведе до відчутного збільшення обчислювальної складності методу. Тому для пошуку мікроорганізму запропоновано застосування порогового фільтра не до всього зображення, а лише до окремих зон інтересу (region of interest, ROI). Якщо мікроорганізм залишив зону фокусу на попередньому кадрі в точці $(x; y)$ - координати центра мас мікроорганізму на попередньому кадрі), то точка останньої присутності об'єкта вибирається центром ROI, площа якого встановлюється вдвічі більшою максимальної площі об'єкта впродовж його руху в полі зору мікроскопа S_{max} . До ROI повторно застосовується пороговий фільтр з порогом на 15% менше від початкового, але не менше, ніж на 2 одиниці у 256-значній шкалі інтенсивності кольору; якщо площа отриманого об'єкта не перевищує S_{max} , але не менше величини шуму S_{min} , відстеження продовжується на наступному кадрі; якщо площа менша, ніж мінімально допустима S_{min} , встановлена для фільтрації шуму, об'єкт вважається таким, що залишив поле зору; якщо площа більша, ніж S_{max} , то до того ж самого кадру застосовується пороговий фільтр зі збільшеним на 5%, але не менше 1, порогом. Якщо після двох послідовних збільшень порогу на одному кадрі площу отриманого об'єкта не вдалося зменшити до початкової, то робиться висновок, що об'єкт злився з фоном і його відстеження остаточно припиняється.

Застосування вищенаведеного алгоритму в програму розробленого пристрою дозволило зменшити кількість хибних виявлень нового мікроорганізму при виході його за межі фокусу впродовж часу роботи 1 хв в середньому з 11 до 1. Одночасно використання процесорного часу

збільшилось на 17%.

2.6. Автоматичне підлаштування порогового фільтра при зміні колірності води

Для виокремлення об'єктів, наявних у воді, від фону використовується порогова фільтрація відеокадру. Пікселі зображення, значення яскравості яких менше певного порогу L_{II} набувають білого кольору, а яскравість яких більша – чорного.

Використання в програмі пристрою порогового фільтра дозволяє, порівняно з адаптивним фільтром, зменшити обчислювальну складність алгоритму, проте зміна колірності, мутності води або яскравості підсвітки мікроскопа причиняє зміщення контуру, що розділяє об'єкт і фон (рис. 2.18). Цей ефект пояснюється застосуванням алгоритмів стиснення зображень до кожного відеокадру. В результаті розміри одного й того ж мікроорганізму мають різне значення.

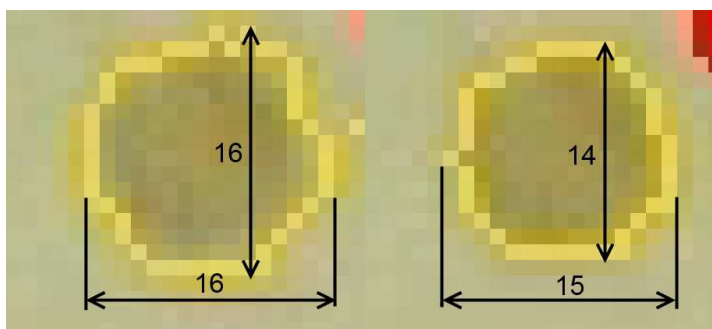


Рис. 2.18. Результат пошуку контуру та розмірів (у пікселях) ціанобактерії при різних значеннях порогу

Ліве зображення відповідає занадто низькому значенню порогу, дана ситуація виникає у випадку, коли колірність води збільшилась, а значення порогу залишилось попереднім. Помітна наявність ряду пікселів, близьких за кольором до фону, всередині контуру, що охоплює ціанобактерію. Праве зображення відповідає оптимальному визначенню контуру мікроорганізму. При відслідковуванні досить малого мікроорганізму спричинювана даним явищем похибка може перевищувати 10%.

Для її усунення запропоновано періодично доналаштувати

пороговий фільтр за результатом роботи алгоритму, що дає достовірніші результати [2, 12]. Таким є алгоритм Кенні [66], що визначає межу як місце точок з найбільш різкою зміною інтенсивності кольору (найбільшим градієнтом кольору).

Використання оператора Кенні передбачає наступні дії:

1) фільтрація зображення у відтинках сірого А згорткою:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \times A$$

2) обчислення в кожній точці модуля та напрямку градієнта, причому кут заокруглюється до значень, кратних 45^0 ;

3) придушення немаксимумів – позначаються лише локальні максимуми;

4) подвійна порогова фільтрація – залежно від модуля градієнта піксель або відмічається як потенційна межа, або відкидається;

5) трасування області неоднозначності – локальні максимуми градієнта з'єднуються по потенційних межах з більшим значенням градієнта.

Нехай S_{Π} – площа мікроорганізму, обмежена контуром, отриманим пороговою фільтрацією, а S_K – площа, обмежена контуром, отриманим за алгоритмом Кенні. Оптимальне значення порогу L_{Π} відповідає мінімуму модуля різниці між даними площами:

$$|S_{\Pi}(L_{\Pi}) - S_K| \rightarrow \min$$

З точки зору споживання обчислювальних ресурсів дана задача однопараметричної оптимізації, порівняно з рештою алгоритму роботи, не є затратною.

Додавання в програму пристрою даного алгоритму з періодичністю виклику 1 с при присутності в кадрі одночасно 5 об'єктів після зменшення

освітленості поля зору мікроскопа (що еквівалентно підвищенню колірності води) так, що середня інтенсивність фону у 8-бітній палітрі відтінків сірого збільшилась з 30 до 68, дозволило компенсувати збільшення середніх розмірів мікроорганізмів на 1,8 мкм, що мало місце при обробці програмою без включеного алгоритму. При цьому використання процесорного часу збільшилось на 5,3% [18].

2.7. Регулювання швидкості води в проточній комірці

Швидкість протікання води в полі зору мікроскопа через оптично прозору проточну комірку визначає відстань, яку пройде об'єкт у воді за час витримки кадру, й відповідно чіткість отриманого відеокадру. Падіння чіткості зображення, що використовується для класифікації за допомогою комп'ютерного зору, має значні негативні наслідки: збільшення похибки визначення геометричних параметрів, розпізнавання одного об'єкта як декількох менших тощо. Отже, визначення концентрації мікропланктону обробкою відеокадрів неперервного потоку води вимагає підтримання швидкості води в полі зору мікроскопа в певних межах: занадто швидкий рух води приводить до збільшення кількості помилок відстеження мікроорганізмів, спотворює форму об'єктів, не дозволяє встановити характер власного руху мікроорганізмів.

Для розробленого пристрою експериментально встановлено, що для успішного відстеження мікроорганізму швидкість не повинна перевищувати 10 пікселів за кадр, що відповідає приблизно 0,1 мм/с. З іншого боку, на початку роботи для зменшення часу проходження води по всмоктувальній трубці пристрою від точки забору до проточної комірки з мікроскопом швидкість повинна бути максимальною. Отже, існує потреба в створенні системи керування швидкістю води в полі зору мікроскопа, що забезпечувала б максимальну продуктивність насоса при пуску та зменшувала її для досягнення достатньої чіткості після заповнення досліджуваною водою.

Суть роботи системи керування швидкістю наступна [15]: прирости координат відстежуваних об'єктів за проміжок часу, що пройшов між сусідніми кадрами, усереднюються та групуються за діапазонами значень. Оскільки нерухомі організми мікропланктону рухаються зі швидкістю течії, а організми зоопланктону можуть рухатись в будь-якому напрямку із відмінною від течії швидкістю, то швидкість руху води визначається як швидкість руху найбільшої групи, адже саме руху за течією властиві рівні вектори швидкості мікроорганізмів. Ймовірність же того, що всі організми мікрозоопланктону рухатимуться з однією швидкістю й в одному напрямку в кількості, більшій, ніж кількість фітопланктону в кадрі, є надзвичайно малою.

Структурна схема реалізованої системи керування швидкістю води в проточній комірці [9] показана на рис. 2.19.

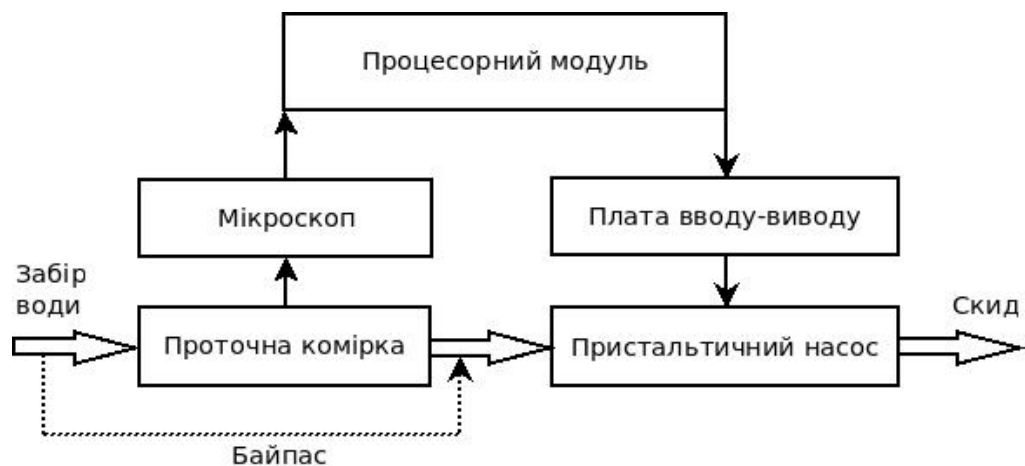


Рис. 2.19. Структурна схема системи керування швидкістю

В якості давача швидкості води використовується той самий мікроскоп, що і для аналізу, це дозволяє вимірювати швидкість з малим порогом чутливості та високою роздільною здатністю (близько 0,5 мкм/с у використаному в пристрої мікроскопі) вимірювати швидкість за наступним алгоритмом:

- 1) отримання кадру з мікроскопу;
- 2) перетворення кольорового зображення в одноканальне (відтінки

сірого);

- 3) перетворення зображення з відтінків сірого в бінарне (чорно-біле) застосуванням порогового фільтра;
- 4) виділення замкнених контурів;
- 4) визначення координат центрів контурів;
- 5) пошук нових, оновлення координат існуючих та видалення зниклих контурів порівнянням з координатами об'єктів на попередньому кадрі;
- 6) визначення переміщення об'єктів за час між сусідніми кадрами;
- 7) обчислення сумарного за m кадрів переміщення;
- 8) градація переміщень за кількістю об'єктів з таким переміщенням (рис. 2.20);

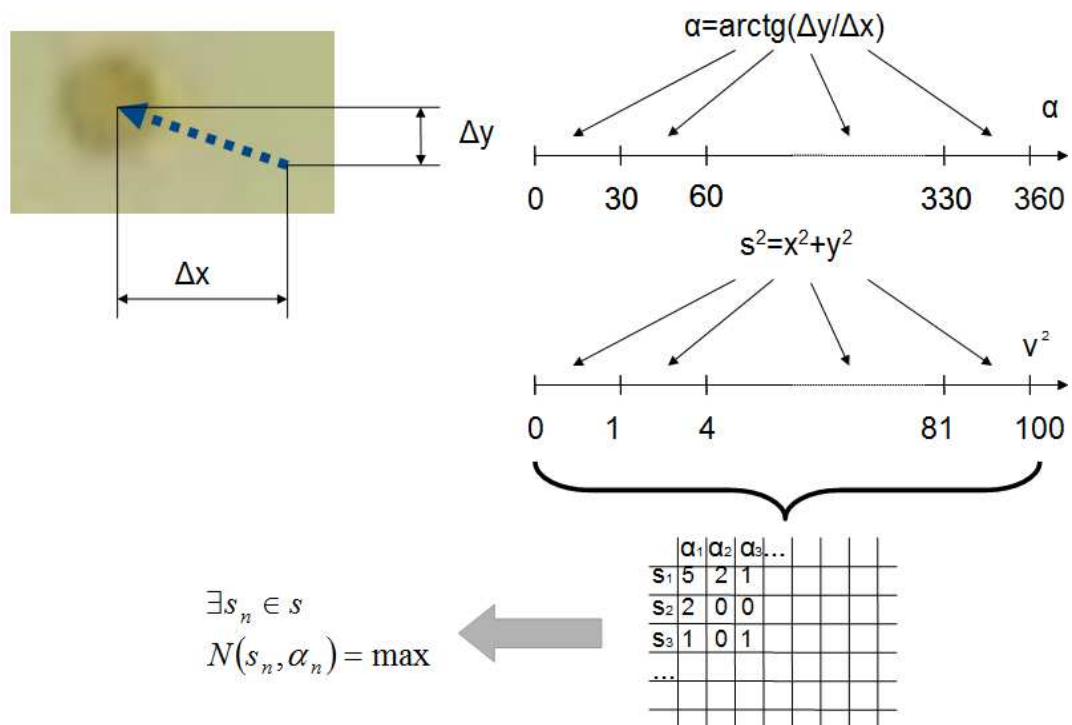


Рис. 2.20. Пошук швидкості потоку води

- 9) вибір значення переміщення s_n з найбільшою кількістю об'єктів та обчислення відповідної йому швидкості при поточній частоті кадрів f (25 с^{-1} у використаному в пристрої мікроскопі) за формулою

$$v = \frac{s_n f}{m} \quad (2.5)$$

Після ввімкнення пристрою, завантаження операційної системи і запуску програми вимірювання насос вмикається на максимальну продуктивність, щоб досліджувана вода за мінімальний час по трубках потрапила від точки забору до оптично прозорої проточної комірки. Час роботи насоса на максимальній продуктивності залежить від внутрішнього об'єму трубки, що використовується для забору води.

Далі швидкість регулюється для отримання кадрів допустимої чіткості. В якості оцінки чіткості служить максимальний модуль градієнта яскравості на зображенні. Величина градієнта отримується застосуванням оператора Собеля [67] до знайдених на зображенні контурів. Якщо чіткість мікроорганізмів у відеокадрі менша допустимої, формується команда зменшити продуктивність насосу. Якщо чіткість зображення мікроорганізмів впродовж останніх 30 с достатня, продуктивність збільшується на невелику величину, але не більше рівня обмеження максимальної швидкості в процесі вимірювання.

2.8. Виявлення багатоклітинних організмів

Колоніальні та багатоклітинні організми в частині випадків можуть розпізнаватись як сукупність окремих одноклітинних організмів. Щоб підвищити точність класифікації, а відповідно й точність вимірювання концентрації мікропланктону, запропоновано наступний алгоритм [5, 22]:

1) Для об'єктів, хоча б один з лінійних розмірів яких більше 40 мкм, виконується пошук внутрішніх елементів методом HoughCircles бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV, що використовує перетворення Хафа, з порівняно великим допустимим відхиленням від ідеального кола.

2) Отримані радіуси й координати центрів кіл аналізуються наступним чином. Якщо сума радіусів сусідніх внутрішніх об'єктів перевищує більше, ніж на 20%, відстань між центрами кіл (внутрішніх об'єктів), які описують ці радіуси, то такі об'єкти не розглядаються надалі як колоніальні або багатоклітинні організми. Також ігноруються об'єкти,

де відстань між центрами менша 50% радіуса.

3) Внутрішні об'єкти групуються за величинами радіуса в групи з радіусом $[R-e; R+e]$, де R -величина радіуса від 10 пікселів до мінімального лінійного розміру об'єкта, $e=8$ – відхилення, кількість пікселів, що визначає допустиме відхилення величини радіусів у групі.

4) Підраховується розмір кожної отриманої групи. Якщо в одній з груп виявиться понад 80% загальної кількості знайдених внутрішніх об'єктів (розміри хоча б 80% клітин приблизно однакові), то робиться висновок, що організм колоніальний або багатоклітинний (рис. 2.21).

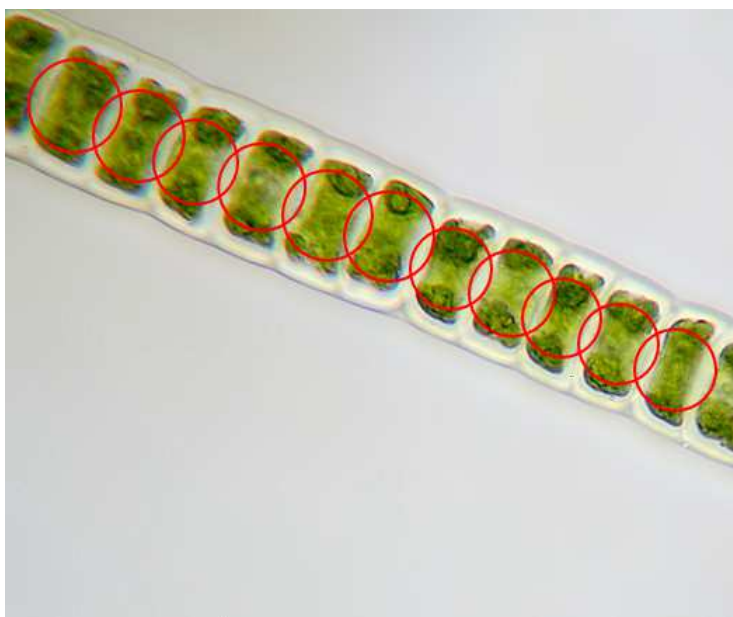


Рис. 2.21. Ілюстрація пошуку внутрішніх об'єктів алгоритмом в екземплярі водорості роду *Ulothrix*

5) Для перевірки, чи знайдений організм має лінійну форму з одного ряду клітин, перевіряються відстані сусідніми внутрішніми об'єктами в групі з понад 80% радіусів об'єктів: якщо знайдені лише 2 приблизно рівні відстані від одного внутрішнього об'єкта до двох інших, й ця закономірність істинна для як мінімум $\frac{3}{4}$ всіх внутрішніх об'єктів, то для такого об'єкта (мікроорганізму) ставиться ознака лінійності його форми.

Параметру «багатоклітинність» присвоюється значення 0 якщо висновок про наявність однакових клітин не був зроблений, та значення

кількості клітин у групі в протилежному випадку.

Польові випробування пристрою з вдосконаленим алгоритмом розпізнавання проводились на р. Устя м. Рівне [21]. Підраховувався відсоток правильно розпізнаних мікроорганізмів серед усіх мікроорганізмів, що потрапили в фокус мікроскопа та були записані на відео. Для порівняння точності перший раз відео файл оброблявся незміненою програмою, а другий раз алгоритм програми був змінений на вищеописаний. Застосування даного алгоритму дозволило збільшити точність розпізнавання водоростей роду *Ulothrix* та колоніальних мікроорганізмів, зокрема *Pediastrum duplex*, відповідно на 44% та 15% (рис. 2.22). Результати порівнювались із ручною класифікацією організмів мікропланктону по зробленому відеозапису (з можливістю зупинки та збільшення).

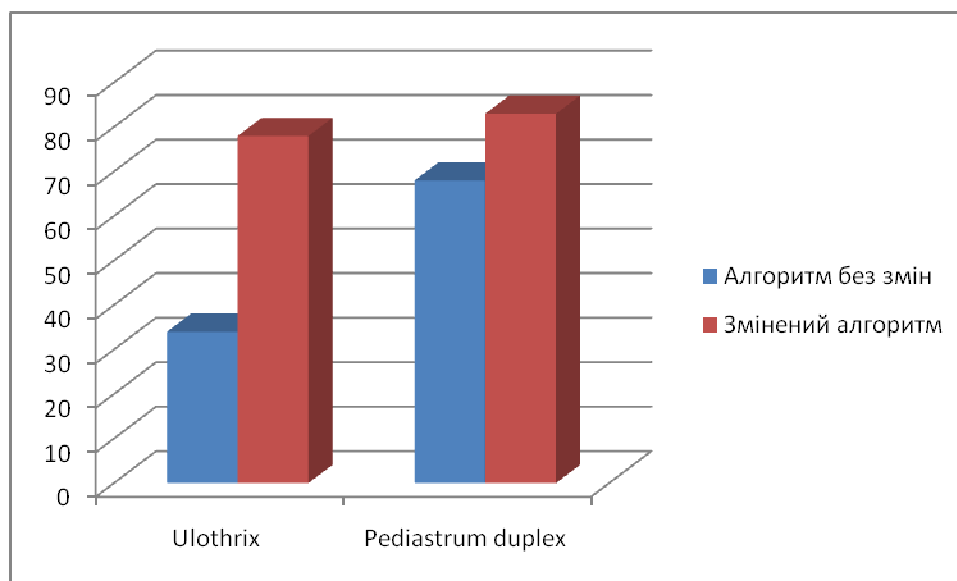


Рис. 2.22. Відсоток успішних розпізнавань організмів без та з запропонованою зміною алгоритму

Підвищення точності більшою мірою отримано за рахунок зменшення хибнопозитивних розпізнавань згаданих водоростей як декількох клітин інших мікроорганізмів, адже раніше одна колонія *Pediastrum duplex* могла бути розпізнана як більше десятка одноклітинних мікроорганізмів.

2.9. Вдосконалений метод вимірювання концентрації мікропланктону

З врахуванням викладеного в п.2.5-2.8 метод вимірювання концентрації мікропланктону за окремими класифікаційними групами в неперервному потоці води полягає в наступному:

1. Досліджувана вода з водойми прокачується перистальтичним насосом через оптично прозору проточну комірку з плоскопаралельними гранями. Перпендикулярно цим граням встановлюється оптична вісь цифрового мікроскопа, сфокусованого на шар води між гранями. Таким чином в об'єктиві (на світлочутливій матриці) мікроскопа формується зображення потоку води з наявними в ній мікроскопічними об'єктами, зокрема організмами мікропланктону.

2. Потік послідовних відеокадрів з мікроскопа надсилається у пристрій обробки відеопотоку, який виконує подальші операції.

3. Перетворення кольорового зображення в одноканальне (відтінки сірого). Для цього відеокадр у колірній моделі RGB перетворюється в колірну модель HSV. Далі з HSV-зображення виділяється V-компонента (Value), яка і використовується далі.

4. Перетворення зображення з відтінків сірого в бінарне (чорно-біле) застосуванням порогового фільтра.

5. Виділення замкнутих контурів у отриманому бінарному зображенні.

6. Визначення координат центрів контурів (центра мас фігури, обмеженої контуром).

7. Пошук нових, оновлення координат існуючих та видалення зниклих контурів порівнянням з координатами об'єктів дослідження на попередньому кадрі. Для кожного об'єкта, знайденого на попередньому кадрі, перевіряється, чи існує в околі v_{max} пікселів (величина v_{max} визначає найбільшу допустиму швидкість руху об'єкта) центр контуру, знайденого

на поточному кадрі; якщо існує, координати об'єкта оновлюються до координат центра контуру. Якщо після обходу всіх контурів на поточному кадрі для об'єкта з попереднього кадру не знайшлося відповідності, то центр об'єкта на попередньому кадрі вибирається центром ROI, площа якого встановлюється вдвічі більшою максимальної площі об'єкта впродовж його руху в полі зору мікроскопа S_{max} . До ROI повторно застосовується пороговий фільтр з порогом на 15% менше від початкового, але не менше, ніж на 2 одиниці; якщо площа отриманого об'єкта не перевищує S_{max} , але не менше величини шуму, відстеження продовжується на наступному кадрі; якщо площа менша, ніж мінімально допустима S_{min} , встановлена для фільтрації шуму, об'єкт вважається таким, що залишив поле зору; якщо площа більша, ніж S_{max} , то до того ж самого кадру застосовується пороговий фільтр зі збільшенням на 5%, але не менше 1, порогом. Якщо після двох послідовних збільшень порогу на одному кадрі площу отриманого об'єкта не вдалося зменшити до початкової, то робиться висновок, що об'єкт злився з фоном і його відстеження остаточно припиняється і він вважається таким, що покинув поле зору мікроскопа. Якщо на поточному кадрі залишилися контури, яким не знайдений відповідний об'єкт з попереднього кадру, вони вважаються новими об'єктами, які вперше з'явилися в полі зору.

8. Періодичне підлаштування порогового фільтра порівнянням з результатами застосування оператора Кенні.

9. Визначення переміщення об'єктів за час між сусідніми кадрами. Додавання переміщення в масив з переміщень за останні m кадрів з видаленням переміщення на найдавнішому кадрі.

10. Градація переміщень з певним кроком за кількістю об'єктів з таким переміщенням. Вибір значення переміщення s_n з найбільшою кількістю об'єктів та обчислення відповідної йому швидкості при поточній частоті кадрів f . Отримана швидкість приймається за швидкість потоку

води.

11. Розрахунок градієнту яскравості для контурів застосуванням оператора Собеля та регулювання швидкості води в полі зору мікроскопа. Якщо максимальний градієнт яскравості менше мінімально допустимого значення, то формується команда зменшити продуктивність насосу. В протилежному випадку продуктивність поступово збільшується з малою швидкістю наростання.

12. Обчислення класифікаційних параметрів об'єктів у кадрі: абсолютних довжини і ширини, відносної ширини, еквівалентного діаметру, коефіцієнта випуклості, коефіцієнта заповнення, компактності, радіусу середньої лінії, середнього кольору, швидкості руху відносно потоку, швидкості зміни довжини, багатоклітинності.

13. Обчислені значення параметрів об'єкта x_j проходять фазифікацію та обчислюються ступені приналежності A_{ij} об'єкта до кожної класифікаційної групи за кожним параметром. Для кожної i -ої класифікаційної групи мікропланктону з n , які повинні розпізнатись, в базу даних вносяться числові діапазони m параметрів (геометричної форми, кольору, рухливості) та функції приналежності $\mu_{ij}(x_j)$ кожного j -го параметра, і під час роботи пристрою. Форма функцій приналежності описує ступінь вірогідності того, що об'єкт з таким значенням параметру належить до даного виду.

14. Обчислюється добуток ступенів приналежності кожного об'єкта по всім параметрам $A_i = \prod_{j=1}^m \mu_{ij}(x_j)$ до кожної класифікаційної групи. Після обчислення ступенів приналежності до класифікаційних груп (виду, роду) об'єкт відносять до тієї, до якої добуток максимальний $\forall i, A_i^{\max} \geq A_i$.

15. Обчислюється концентрація кожного виду мікропланктону як відношення кількості розпізнаних екземплярів до об'єму води, що пройшов у фокусі мікроскопа. Об'єм води, що пройшов у фокусі мікроскопа, визначається як добуток швидкості води в комірці v на час Δt , за який

проводиться вимірювання, на ширину поля зору мікроскопа b та на товщину h шару води в комірці, на яку сфокусований мікроскоп:

$$V=bhv\Delta t. \quad (2.6)$$

2.10. Класифікація за допомогою штучної нейронної мережі

Альтернативним варіантом класифікації об'єктів, що перебувають в потоці води у полі зору мікроскопа, є використання штучної нейронної мережі. Штучні нейронні мережі можуть реалізовувати складні залежності між вхідними та вихідними величинами, зокрема між параметрами об'єкта і ступенями приналежності його до різних класифікаційних груп. Щоб штучна нейронна мережа відтворювала потрібну залежність, проводять її навчання, яке полягає в підборі вагових коефіцієнтів та зміщень нейронів. Успішність застосування штучної нейронної мережі залежить від загальної структури (типу) нейронної мережі, функцій активації нейронів, кількості шарів і нейронів у шарах, методу навчання та критеріїв його закінчення.

Оскільки характер взаємозв'язків вхідних та вихідних параметрів невідомий, то структуру штучної нейронної мережі потрібно підбирати експериментально. Те, до якої класифікаційної групи буде віднесено об'єкт у полі зору мікроскопа, визначається будовою та властивостями самого об'єкта й не залежить від попередніх об'єктів, тому можна одразу відкинути штучні нейронні мережі з елементами затримок і зворотних зв'язків, які використовуються для апроксимації даних, де кожен наступний набір вхідних сигналів залежить від попереднього. Тому для подальшого дослідження обрано нейронні мережі прямого поширення Feed-forward та Cascade-forward [68].

В штучних нейронних мережах Feed-forward вхідна інформація послідовно проходить вхідний, приховані та вихідний шари (рис. 2.23)

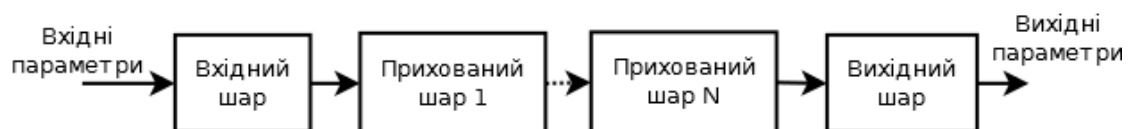


Рис. 2.23. Схема поширення інформації в нейронних мережах Feed-forward

В штучних нейронних мережах Cascade-forward наявні каскадні зв'язки, тобто сигнал з виходу нейронів кожного шару подається на входи нейронів усіх наступних шарів (рис. 2.24).



Рис. 2.24. Схема поширення інформації в нейронних мережах Cascade-forward

Для виконання класифікації на входи нейронних мереж подаються ті самі класифікаційні параметри, що використовувались для класифікації з використанням нечіткої логіки. Вихідні параметри штучної нейронної мережі – ступені приналежності об'єкта до кожної класифікаційної групи.

В загальному випадку кількість нейронів у штучній нейронній мережі визначається складністю взаємозв'язку між вхідними та вихідними параметрами. Більш складні й нелінійні зв'язки вимагають більшої кількості нейронів у мережі, що тягне за собою підвищення обчислювальної складності та часу навчання. Завелике число нейронів може призвести до перенавчання нейронної мережі, тобто надмірної адаптації до навчальної вибірки замість узагальнення. Надто мала кількість нейронів не дозволяє нейронній мережі достатньо точно описувати складні залежності, що призводитиме до помилок класифікації.

Для навчання штучної нейронної мережі було створено базу зображень організмів мікропланктону з класифікаційних груп (100 зображень кожного класу), з кожного зображення програмно отримано значення класифікаційних параметрів, в результаті в Matlab сформовано 2 матриці: одна – зі значеннями класифікаційних параметрів для кожного об'єкта, друга – зі значеннями ступеня приналежності (0 або 1) до кожної класифікаційної групи. 10% даних не заносились в матриці для навчання, а використовувались для перевірки роботи навченої штучної нейронної

мережі на даних, що не використовувались при навчанні. Функції активації нейронів підбирались експериментально з-поміж *tansig*, *purelin*, *logsig* [69], що доступні в Matlab.

Було складено моделі штучних нейронних мереж з різною структурою (Feed-forward та Cascade-forward), різною кількістю шарів (2 або 3), різною кількістю нейронів у шарах (до 200) та різними функціями активації нейронів. Всього 144 моделі. Кожна модель була навчена за допомогою алгоритму градієнтного спуску на вибірці з 900 пар «вектор параметрів об'єкта – вектор ступенів приналежності».

Оцінка ефективності класифікації розробленими штучними нейронними мережами показала [6], що при подачі 100 векторів тестувальної вибірки найменшу середню квадратичну помилку 0,012 має двохарова Feed-forward з 95 нейронами у першому шарі та функцією активації *tansig* для нейронів обох шарів (рис. 2.25). Ваги та зміщення нейронів мережі наведені в додатку А.

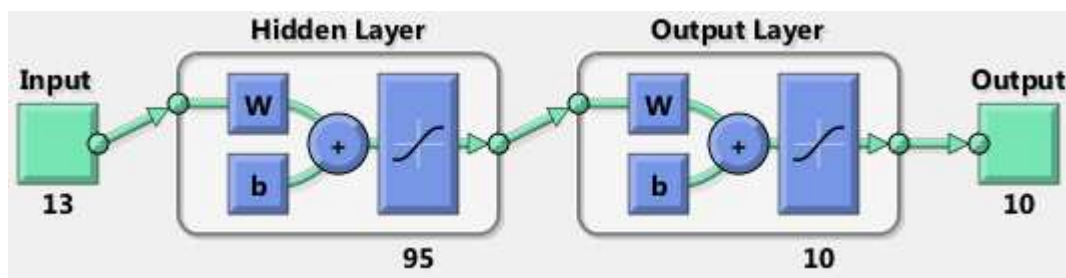


Рис. 2.25. Структура штучної нейронної мережі для класифікації мікропланктону

Успішність розпізнавання об'єктів різних класів розробленою штучною нейронною мережею неоднакова, тому для оцінки точності класифікації об'єктів до різних класифікаційних груп побудуємо гістограми розподілу похибок класифікації (рис. 2.26-2.27).

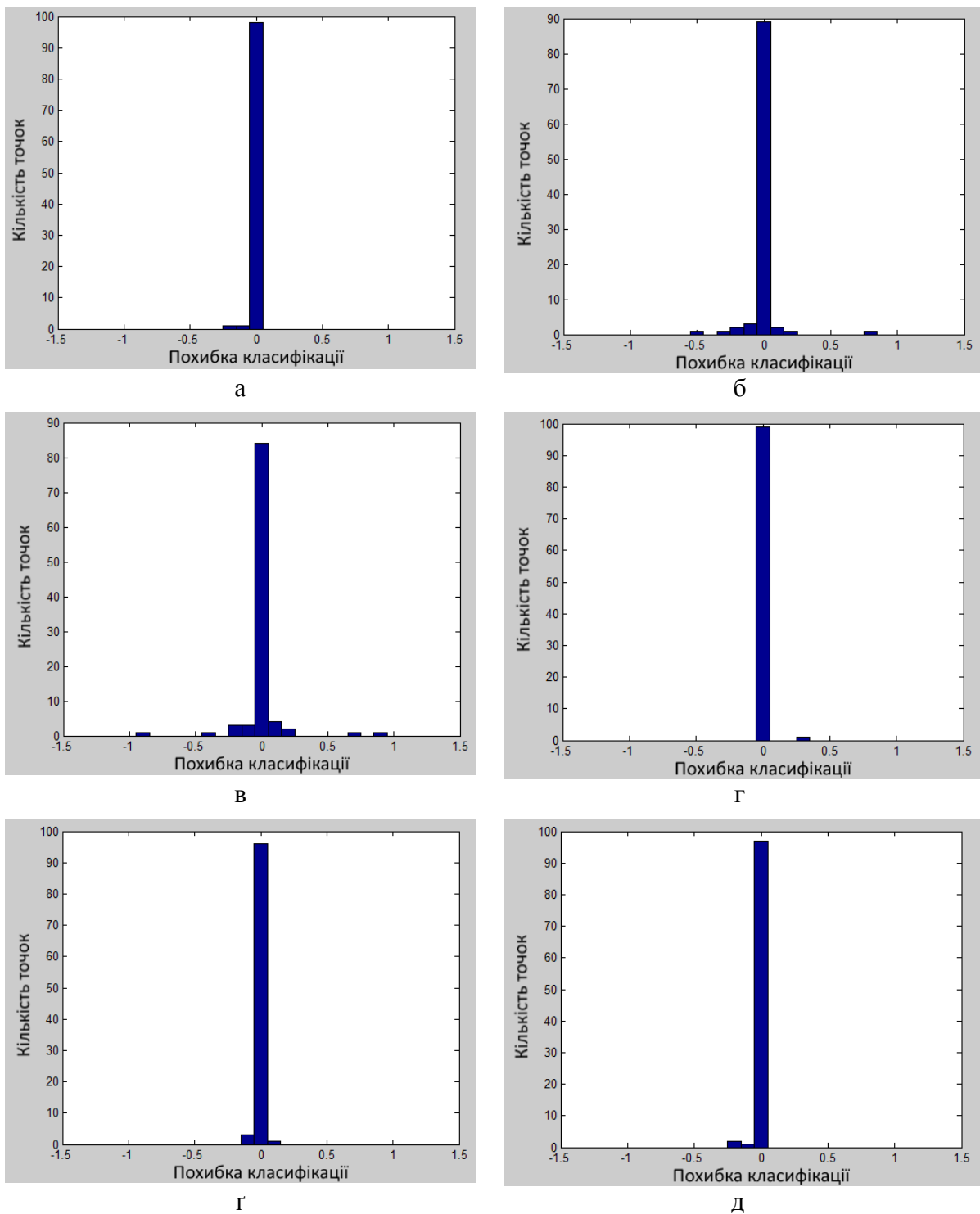


Рис. 2.26. Гістограми розподілу похибок класифікації штучною нейронною мережею до класифікаційних груп: а - Amoeba, б - Chlorella, в - Coelastrum microporum, г - Cyclops varius, г - Euglena viridis, д - Paramecium caudatum

З гістограм розподілу похибок класифікації штучною нейронною мережею можна побачити, що похибки класифікації всіх класифікаційних груп знаходяться в діапазоні $[-0,15; 0,15]$ для більш, ніж 90% точок.

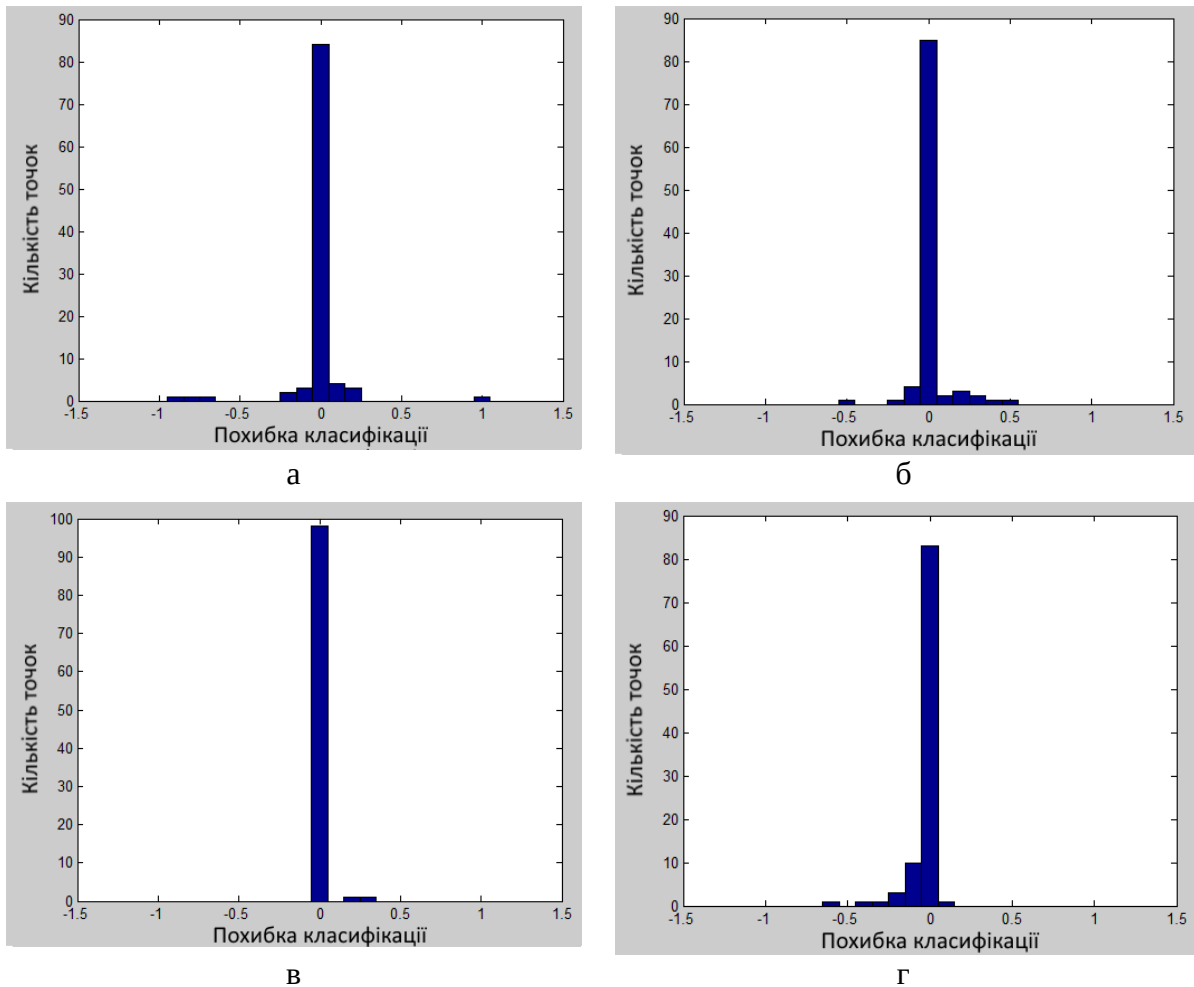


Рис. 2.27. Гістограми розподілу похибок класифікації штучною нейронною мережею до класифікаційних груп: а - *Pediastrum*, б - *Trachelomonas volvocina*, в - *Ulothrix zonata*, г - повітряна бульбашка

Класифікація організмів мікропланктону виду *Coelastrum microporum* та роду *Pediastrum* супроводжується поодинокими взаємними хибними розпізнаваннями колоній *Coelastrum microporum* як колоній *Pediastrum* і навпаки.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено метод вимірювання концентрації окремих груп мікропланктону шляхом неперервного відстеження кожного мікроорганізму при проходженні потоку досліджуваної води в полі зору мікроскопа з одночасним підрахунком об'єму досліджуваної води, регулюванням швидкості води і чіткості зображення, врахуванням власного руху організмів мікропланктону.

2. Вперше в якості параметрів для класифікації використовуються швидкість руху мікроорганізму та швидкість зміни довжини, що забезпечується шляхом автоматичного регулювання швидкості потоку води в вимірювальній комірці.

3. Розроблена база класифікаційних параметрів організмів мікропланктону для класифікації за допомогою нечіткої логіки.

4. Розроблено штучну нейронну мережу, яка використовується для класифікації мікропланктону при вимірюванні його концентрації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАНКТОНУ

3.1. Розробка структурної схеми пристрою

При розробці структури пристрою для вимірювання концентрації мікропланктону [7, 19] доцільно передбачити наступні вимоги до пристрою.

1. Виконання вимірювання концентрації в автоматичному режимі, без необхідності втручання користувача в процес розпізнавання та класифікації мікроорганізмів. Це дозволить знизити вимоги до кваліфікації персоналу та збільшити швидкість аналізу заданого об'єму води.

2. Автоматичний забір проби води безпосередньо з водойми. Це дозволить виключити етап забору порцій води з водойми в проміжні резервуари й відкине необхідність їх додаткової дезінфекції, а отже зменшить працемісткість вимірювання.

3. Автономне живлення. Пристрій повинен надавати можливість виконувати вимірювання в місці пробовідбору без потреби в підключенні зовнішніх кабелів живлення, оскільки можливість підключення до джерела електричної енергії біля водойми часто відсутня.

4. Можливість забору води з різної глибини. Виконання гідробіологічних досліджень передбачає оцінку популяції гідробіонтів на різних глибинах [70].

5. Відображення результату вимірювання в місці відбору проби, без потреби транспортувати пристрій назад у лабораторію для зчитування даних, що дозволить оперативніше виявляти зміну концентрацій груп мікропланктону й реагувати на неї, якщо ця зміна свідчить про наявність загрозливих рівнів забруднення.

6. Збереження результатів вимірювання в пам'ять пристрою.

7. Передача результатів вимірювання на інший комп'ютер для

опрацювання, ведення статистики, передачі даних вимірювання в системи моніторингу водних об'єктів, організації доступу до них зацікавлених осіб.

8. Можливість запису оброблюваного відеопотоку з мікроскопа одночасно з результатами класифікації організмів мікропланктону для періодичного контролю людиною правильності класифікації, а також пошуку видів та родів мікропланктону, які варто додати в базу класифікаційних параметрів.

Для виконання запропонованого в розділі 2 методу в пристрої повинні бути передбачені: оптично прозора проточна вимірювальна комірка, насос з блоком керування витратою, мікроскоп з інтерфейсом передачі відео, ЕОМ (наприклад, одноплатний комп'ютер), дисплей, трубки для переміщення досліджуваної води. Для виконання вищенаведених вимог потрібно передбачити автономне джерело живлення (акумуляторну батарею), роз'єми для підключення до комп'ютерних мереж, можливість забору води з різної глибини або занурення пристрою на глибину вимірювання.

Пропонується два варіанти структурної схеми пристрою (рис. 3.1).

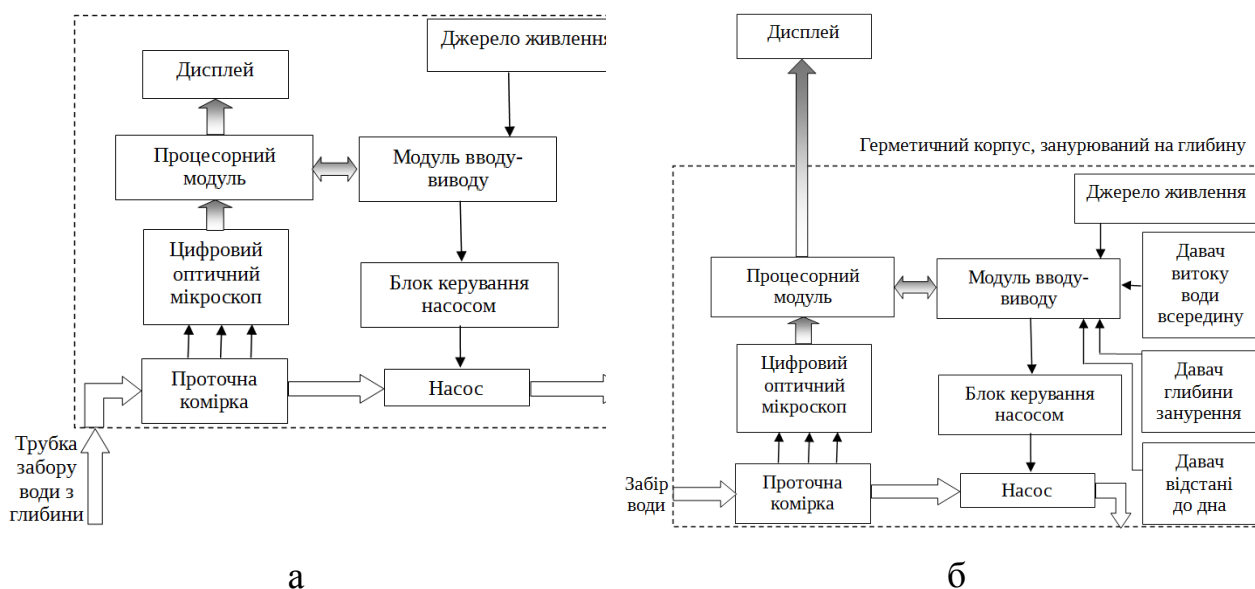


Рис. 3.1. Структурна схема пристрою вимірювання концентрації мікропланктону:

а – розміщеного на поверхні з забором води з глибини,

б – занурюваного на глибину з винесенням дисплею на поверхню

Схема, зображена на рис. 3.1.a дозволяє проводити вимірювання на поверхні, в процесі вимірювання здійснювати передачу даних через бездротові мережі, а отже, за умови безперебійного живлення, використовуватись для онлайн-моніторингу біологічних показників якості вод поверхневих водойм. Герметичність вимагається лише для з'єднань оптично прозорої проточної комірки та насоса. Це спрощує підключення зовнішніх пристроїв, заряджання або заміну акумуляторів у джерелі живлення. Недоліком такої схеми є значне транспортне запізнення при заборі води з глибини. Це пояснюється тим, що насос повинен забезпечувати швидкості руху води менше 1 мм/с, тому використовуються малопотужні перистальтичні насоси з продуктивністю одиниці-десятки мілілітрів за хвилину, на які подається знижена напруга живлення для зменшення швидкості обертання. Навіть при подачі максимальної напруги живлення такий насос може підіймати воду з глибини понад хвилину. Щоб зменшити цю затримку перед вимірюванням, потрібно здійснювати підйом води допоміжним насосом з вищою продуктивністю (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Структурна схема пристрою з допоміжним насосом

Використання продуктивнішого допоміжного насосу дозволяє підіймати досліджувану воду з більшою швидкістю, а отже зменшить вказане транспортне запізнення. Водночас споживана пристроєм потужність зростає, а час роботи від акумулятора – зменшиться.

Зменшити транспортне запізнення, зберігши час автономної роботи пристрою, дозволяє розміщення насоса, проточної комірки та мікроскопа в герметичному корпусі, що занурюється на задану глибину (рис. 3.1.б). В такому випадку час прокачування проби від точки забору води до вимірювальної комірки зменшується до мінімуму і залежить від продуктивності насоса та внутрішнього діаметра трубки забору води. Занурення основного корпуса пристрою на глибину вимагає використання герметичних роз'ємів для підключення зовнішніх пристроїв та для заряджання. Чим більша глибина занурення, тим вищий тиск води повинна витримувати герметизація пристрою. Щоб попередити засмоктування донного мулу, ґрунту, відстань до дна вимірюється за допомогою давача відстані, спрямованого донизу. Глибина занурення вимірюється за допомогою давача глибини, в ролі якого використовується давач гідростатичного тиску.

3.2. Розробка конструкції та програмного забезпечення приладу

Відповідно до структурної схеми, зображеної на рис. 3.1.б, було розроблено та виготовлено пристрій для вимірювання концентрації мікропланктону [4, 8]. Структурна схема пристрою зображена на рис. 3.3.

Пристрій складається з герметичного корпуса, який занурюється в досліджувану воду, та дисплейного модуля, який складається з резистивного сенсорного дисплею, мікроконтролерної плати та прийомопередавача інтерфейсу RS-485 [20].

В герметичному корпусі розміщуються процесорний модуль, що являє собою одноплатний комп'ютер, перетворювач інтерфейсів USB - RS485, модуль введення-виведення – мікроконтролерна плата Arduino Uno,

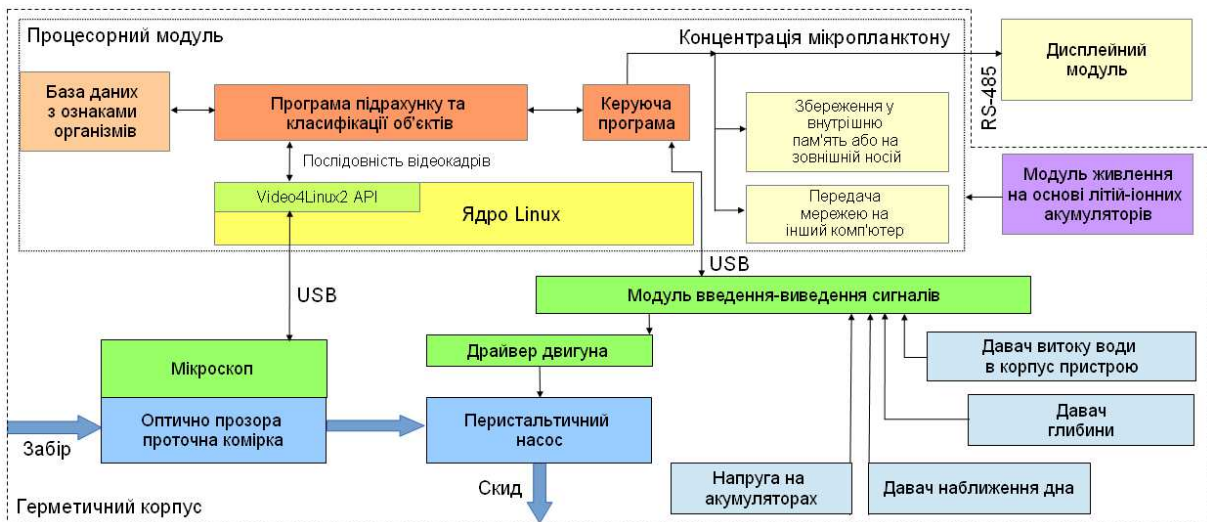


Рис. 3.3. Структурна схема пристрою

інфрачервоний давач відстані, спрямований через прозору кришку донизу (давач наближення дна), давач глибини занурення, давач витоку води всередину герметичного корпусу, модуль живлення, що складається з літій-іонних акумуляторів типорозміру 18650, підвищувача напруги та схеми заряджання, оптичний мікроскоп з інтерфейсом USB, оптично прозора проточна вимірювальна комірка, перистальтичний насос і драйвер двигуна.

3.2.1. Модуль введення-виведення

Модуль введення-виведення служить для зчитування сигналів від давачів та формування сигналів керування на привод насоса процесорним модулем. Він підключається до процесорного модуля за допомогою інтерфейсу USB. Мікроконтролерна плата містить мікроконтролер ATmega328P та мікросхему-перетворювач інтерфейсів USB-UART (з логічними рівнями TTL 5V). Обмін даними між процесорним модулем та модулем введення-виведення відбувається через послідовний інтерфейс за протоколом Modbus RTU. Адреса модуля в мережі Modbus – 8.

Модуль забезпечує зчитування вихідних сигналів з інфрачервоного давача наближення Sharp GP2Y0A21YK, спрямованого донизу для вимірювання відстані до дна, давача тиску води, який використовується для

визначення глибини занурення, давача витoku води в герметичний корпус пристрою, а також вимірювання напруги на акумуляторах модуля живлення. Для вимірювання всіх перелічених напруг використовується 10-розрядний АЦП, вбудований в мікроконтролер ATmega328P. Програма мікроконтролера модуля наведена в додатку Б.

Модуль забезпечує формування сигналу керування напрямком та продуктивністю насоса (ШІМ напруги розрядністю 8 біт) на драйвер двигуна L9110S, до якого підключений перистальтичний насос.

На модулі вводу-виводу передбачені наступні регістри, доступ до яких можна отримати за протоколом Modbus RTU:

1. Регістр напруги на акумуляторах і витoku води.

Адреса регістра – 40001.

Вміст регістра показано на рис. 3.4.

w1	0	0	0	0	0	0	va9	va8	va7	va6	va5	va4	va3	va2	va1	va0
----	---	---	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Рис. 3.4. Вміст регістра напруги на акумуляторах і витoku води

Старший біт регістра (біт w1) – ознака витoku води: 1 – всередині корпусу наявна вода, 0 – вода всередині корпусу відсутня. Встановлюється в 1 модулем вводу-виводу, якщо напруга з давача витoku води перевищує поріг спрацювання, та скидається ним в 0, якщо напруга менше порогу спрацювання.

Біти va9...va0 – значення результату аналогово-цифрового перетворення напруги на акумуляторах. 10-розрядне двійкове число, яке може приймати значення в діапазоні 0...1023.

2. Регістр керування насосом.

Адреса регістра – 40002.

Вміст регістра показано на рис. 3.5.

ma	mr	0	0	0	0	0	0	ms7	ms6	ms5	ms4	ms3	ms2	ms1	ms0
----	----	---	---	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Рис. 3.5. Вміст регістра керування насосом

Біт m_a – ввімкнення насосу в прямому напрямку: 1 – напрямок обертання насосу - аверс, 0 – напрямок обертання не задано.

Біт m_r – ввімкнення насосу в зворотному напрямку: 1 – напрямок обертання насосу - реверс, 0 – напрямок обертання не задано.

Обидва біти m_a та m_r встановлюються та скидаються процесорним модулем залежно від потрібного напрямку прокачування води.

Біти $ms_7...ms_0$ – значення, що задає продуктивність насоса. 8-розрядне двійкове число, яке може приймати значення в діапазоні 0...255. Числу 255 відповідає максимальна продуктивність насоса. В поточній реалізації пристрою використовується колекторний двигун постійного струму, тому значення цього числа – це коефіцієнт заповнення (скважність) напруги живлення на приводі насоса, промасштабований з діапазону 0...100% у діапазон 0...255.

3. Регістр тиску води.

Адреса регістра – 40003.

Регістр використовується для передачі результату аналогово-цифрового перетворення напруги з давача тиску води від модуля вводу-виводу в процесорний модуль. Регістр може містити значення з діапазону 0...1023, що визначається розрядністю АЦП модуля вводу-виводу.

4. Регістр відстані до дна.

Адреса регістра – 40004.

Регістр використовується для передачі результату аналогово-цифрового перетворення напруги з інфрачервоного давача відстані до дна від модуля вводу-виводу в процесорний модуль. Регістр може містити значення з діапазону 0...1023, що визначається розрядністю АЦП модуля вводу-виводу.

3.2.2. Дисплейний модуль

Дисплейний модуль забезпечує людино-машинний інтерфейс. Він

містить (рис. 3.6):

- 1) рідкокристалічний дисплей роздільною здатністю 240x320 пікселів з контролером дисплею SPFD5408A;
- 2) резистивний сенсорний екран, розміщений над дисплеєм;
- 3) мікроконтролеру плати Arduino Uno;
- 4) прийомопередавач інтерфейсу RS-485;
- 5) кнопку живлення.

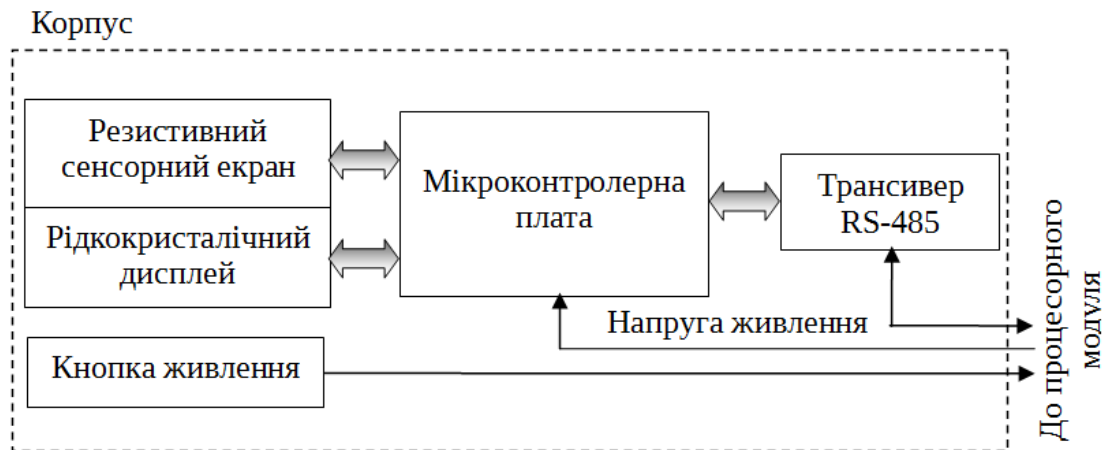


Рис. 3.6. Структурна схема дисплейного модуля

Для обміну даними між дисплейним модулем та основною частиною пристрою (процесорним модулем) використовується інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU. Адреса модуля в мережі Modbus – 9.

Дисплейний модуль підключений до решти пристрою за допомогою багатожильного кабеля, одна пара провідників якого використовується як сигнальні провідники інтерфейсу RS-485, друга – для підключення кнопки живлення, третя і четверта – для подачі живлення. Програма мікроконтролера модуля наведена в додатку В.

В дисплейному модулі передбачені наступні регістри, доступ до яких можна отримати за протоколом Modbus RTU:

1. Регістр статусу та режиму роботи.

Адреса регістра – 40001.

Вміст регістра показано на рис. 3.7.

m9	m8	r5	r4	r3	r2	r1	r0	m7	m6	m5	m4	m3	m2	m1	m0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Рис. 3.7. Вміст регістра статусу та режиму роботи.

Біти r5...r0 використовуються для збереження номера режиму роботи:

0 – початкова ініціалізація та налаштування, виведення повідомлення «Очікування готовності процесорного модуля» та перехід до очікування даних від процесорного модуля.

1 – очікування даних про готовність процесорного модуля. Оскільки в процесорному модулі встановлена операційна система загального призначення, потрібен час для її запуску, визначення підключених пристроїв та завантаження відповідних модулів ядра, перевірку файлової системи тощо. Цей час в рази більший, ніж час, потрібний для запуску й підготовки до роботи дисплейного модуля.

2 – виведення повідомлення про успішний початок обміну даними з процесорним модулем та прийом від процесорного модуля тексту, що містить список підключених USB-пристроїв. Передача символів тексту відбувається з використанням регістра 40002.

3 – періодичне виведення поточних значень глибини та відстані до дна, зчитаних з регістрів 40009 та 40010 відповідно, та повідомлення «Торкніться дисплею для продовження». У випадку дотику користувача до сенсорного екрану відбувається перехід до наступного режиму.

4 – пауза перед переходом до вимірювання, потрібна для прокачування досліджуваної води по трубці від точки забору до оптично прозорої вимірювальної комірки. Під час цього користувач може викликати меню і перейти в режим налаштувань, якщо доторкнеться до дисплея до закінчення зворотного відліку, який відображається на екрані. Якщо користувач не виконає жодних дій, то пристрій ввійде в режим «робота» (режим 5). Перехід в меню відповідає переходу в режим 10.

5 – вхід в режим «робота». Виконується виведення на дисплей

заголовків «Проаналізовано об'єктів», «Середня швидкість», «Виконано», а також запуск таймера оновлення інформації на дисплеї. Перехід в режим 6.

6 – режим «робота». Режим, в якому і проводиться процес вимірювання. В цьому режимі продовжується обмін даними з процесорним модулем та періодично виводяться на дисплей значення кількості проаналізованих об'єктів, середньої швидкості потоку досліджуваної води та прогресу вимірювання (відношення об'єму проаналізованої води до заданого об'єму проби, виражене у відсотках). В нижній частині екрану додатково виводяться значення глибини занурення та відстані до дна. При спрацюванні давача витoku води всередину корпусу нижня частина дисплею забарвлюється в синій колір. Доторкнувшись до дисплею, користувач може викликати меню та перейти з цього режиму в режим налаштування (режим 10).

7 – виведення результату вимірювання. Після проходження заданого об'єму води через оптично прозору вимірювальну комірку процесорний модуль формує команду переходу з режиму 6 в режим 7, після чого надсилає масив символів, що являє собою повідомлення з результатами проведеного вимірювання. Отримавши останній символ, дисплейний модуль виводить повідомлення на дисплей та переходить в режим 8.

8 – очікування ознайомлення з результатом вимірювання. У цьому режимі дисплейний модуль очікує дотику користувача до дисплея. Доки користувач не доторкнувся до дисплея, на ньому відображається повідомлення з результатами вимірювання. Дотик до дисплея сигналізує пристрою, що користувач ознайомився з результатами вимірювання та їх відображення на дисплеї вже не потрібно, пристрій переходить до режиму 5. Незалежно від часу, який затрачає користувач на ознайомлення з результатами вимірювання, пристрій продовжує прокачувати досліджувану воду та виконує вимірювання концентрації мікропланктону в наступній пробі заданого об'єму. Якщо на момент готовності результатів

вимірювання наступної проби користувач не підтвердить ознайомлення з результатом вимірювання (не доторкнеться до дисплею), вміст дисплею буде перезаписано результатами вимірювання нової проби. Обмін даними з процесорним модулем триває.

10 – виведення пунктів головного меню на дисплей («Передача результатів», «Виправлення роботи», «Налаштування», «Вихід») та перехід в режим 11.

11 – очікування вибору пункту головного меню. В цьому режимі продовжується обмін даними з процесорним модулем, опитується сенсорний екран та, у випадку дотику, обчислюються координати дотику. За координатами дотику визначається, який елемент меню обрав користувач, та виконується перехід в режим відповідно 20, 30, 40 або 5.

20 – виведення меню передачі результатів. Пропонуються варіанти «Ethernet», «Wi-Fi», «USB flash», «Вихід». Після виводу модуль переходить до очікування відповіді користувача в режимі 21.

21 – очікування вибору в меню передачі результатів. При виборі «Ethernet» біт m7 встановлюється в одиницю. При виборі «Wi-Fi» біт m6 встановлюється в одиницю. При виборі «USB flash» біт m5 встановлюється в одиницю. Процесорний модуль періодично зчитує регістр статусу і режиму роботи й залежно від вибору користувача виконує потрібні підготовчі дії. В цей час дисплейний модуль виводить повідомлення «Зачекайте» та переходить в режим 22, якщо вибрано «Ethernet», 24, якщо вибрано «Wi-Fi», або 26, якщо вибрано «USB flash».

22 – виведення інформації щодо отримання даних з пристрою по інтерфейсу «Ethernet». Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем і чекає скидання біта m7 в регістрі 40001 в нуль. Це сигналізує про початок передачі процесорним модулем даних для відображення. Дисплейний модуль послідовно зчитує символи з власного регістра 40002 та виводить їх на дисплей. Перед цим процесорний модуль

за допомогою виклику зовнішніх програм `ifconfig`, `grep` і `awk` формує текст з даними про IP-адресу пристрою й апаратну (MAC) адресу. Тому на момент вибору пункту меню «Ethernet» до процесорного модуля повинен бути підключений USB-Ethernet адаптер (мережева карта) та має минути кілька секунд, потрібних для виявлення нового пристрою на завантаження відповідного модуля ядра з драйвером пристрою. В файлі налаштувань `/etc/network/interfaces` обрано автоматичне отримання IP-адреси за допомогою DHCP, тому час очікування залежить також від часу відповіді DHCP-сервера на запит отримання IP-адреси. Отже, для успішного підключення пристрою до мережі Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet потрібно завчасно підключити відповідний мережевий адаптер до порту USB та доторкатись до пункту меню «Ethernet» лише тоді, коли пристрій отримає свою IP-адресу. IP та MAC-адреси відображаються на дисплеї пристрою доти, доки користувач не доторкнеться до екрану – це поверне пристрій в режим 5. Файли з результатами вимірювань доступні для зчитування за протоколом SMB (Server Message Block). Якщо мережа має підключення до Інтернет, то по завершенню вимірювання кожної проби результати вимірювання надсилаються MQTT-брокеру (параметри підключення до якого задаються в налаштуваннях) і стають доступні всім пристроям, підписаним на отримання повідомлень з результатами вимірювання.

24 – виведення інформації щодо отримання даних з пристрою по інтерфейсу «Wi-Fi». Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем і чекає скидання біта тб в регістрі 40001 в нуль. Це сигналізує про початок передачі процесорним модулем даних для відображення. Дисплейний модуль послідовно зчитує символи з власного регістра 40002 та виводить їх на дисплей. При завантаженні процесорний модуль викликає `bash`-скрипт для підключення до заданої Wi-Fi мережі з іменем «HydroLab» (можна змінити), а якщо мережа відсутня – за

допомогою програми iw створюється Ad-hoc мережа з іменем «MPA» (microplankton analyzer). Перед скиданням біта m6 в нуль процесорний модуль за допомогою виклику зовнішніх програм ifconfig, grep і awk формує текст з даними про IP-адресу пристрою й апаратну (MAC) адресу. Можливе використання зовнішніх USB-WiFi адаптерів, які необхідно підключати до порту USB пристрою, проте перед цим повинні бути змінені налаштування пристрою (скрипт налаштування Wi-Fi мережі та /etc/network/interfaces) для використання зовнішнього, а не вбудованого WiFi-адаптера. Отже, при використанні зовнішнього адаптера для успішного підключення пристрою до мережі Wi-Fi потрібно завчасно підключити відповідний мережевий адаптер до порту USB та доторкатись до пункту меню «Wi-Fi» лише тоді, коли пристрій отримає свою IP-адресу. IP та MAC-адреси відображаються на дисплеї пристрою доти, доки користувач не доторкнеться до екрану – це поверне пристрій в режим 5. Файли з результатами вимірювань доступні для зчитування за протоколом SMB. Якщо мережа має підключення до Інтернет, то по завершенню вимірювання кожної проби результати вимірювання надсилаються MQTT-брокеру (параметри підключення до якого задаються в налаштуваннях) і стають доступні всім пристроям, підписаним на отримання повідомлень з результатами вимірювання.

26 – запис даних, отриманих в результаті вимірювання, на зовнішній USB-накопичувач (наприклад, USB flash-пам'ять). На момент вибору цього пункту меню USB-накопичувач має бути підключений до порту USB. Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем і чекає скидання біта m5 в регістрі 40001 в нуль. При виборі цього пункту меню на USB-накопичувач буде скопійовано всі файли з результатами вимірювання за поточну добу, виконане відмонтування файлової системи та скинуто біт m5 в регістрі 40001 в нуль. Це сигналізує про початок передачі процесорним модулем даних для відображення, а саме

повідомлення «Скопійовано _ файлів». Дисплейний модуль послідовно зчитує символи з власного регістра 40002 та виводить їх на дисплей. Повідомлення відображається на дисплеї пристрою доти, доки користувач не доторкнеться до екрану – це поверне пристрій в режим 5.

30 – виведення меню виправлення роботи пристрою. Пропонуються варіанти «Прокачати» (воду з максимальною продуктивністю), «Перезапустити програму аналізу», «Перезавантажити процесорний модуль». Після виводу модуль переходить до очікування відповіді користувача в режимі 31.

31 – очікування вибору в меню виправлення роботи. В цьому режимі продовжується обмін даними з процесорним модулем, опитується сенсорний екран та, у випадку дотику, обчислюються його координати. За координатами дотику визначається, який елемент меню обрав користувач. Якщо обрано «Прокачати», виводиться меню «Прокачати» з кнопками «Аверс», «Реверс», «Стоп/Вихід» та виконується перехід в режим 32. Якщо обрано «Перезапустити програму аналізу», виконується перехід в режим 34, якщо «Перезавантажити процесорний модуль» – 36.

32 – очікування дотику користувача до сенсорного екрану. Якщо координати дотику відповідають натисканню кнопки «Аверс» - встановлюється біт m3 у регістрі 40001 в одиницю та на дисплей виводиться ">>>". У відповідь процесорний модуль вмикає насос на максимальну потужність і продуктивність, зберігаючи «пряму» полярність напруги живлення на приводі насоса. Якщо координати дотику відповідають натисканню кнопки «Реверс» - встановлюється біт m2 у регістрі 40001 в одиницю та на дисплей виводиться " <<<". У відповідь процесорний модуль вмикає насос на максимальну потужність і продуктивність, проте змінює полярність напруги живлення на приводі насоса на протилежну. Якщо натиснуто «Стоп/Вихід», біти m3 і m2 скидаються в нуль та виконується перехід в режим 5.

34 – перезапуск програми аналізу. В реєстрі статусу і режиму роботи 40001 встановлюється біт m4 в одиницю, модуль переходить в режим 35.

35 – очікування перезапуску програми аналізу. Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем, перевіряє вміст реєстра 40001 і, якщо біт m4 скинуто в нуль, виводить повідомлення «Перезапущено». Далі процесорний модуль переводить дисплейний модуль в режим 2 і виконується описана вище послідовність переходу пристрою до виконання вимірювання концентрації.

36 – перезавантаження процесорного модуля. В реєстрі статусу і режиму роботи 40001 встановлюється біт m1 в одиницю, модуль переходить в режим 37.

37 – очікування перезавантаження пристрою. Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем, перевіряє вміст реєстра 40001 і, якщо біт m1 скинуто в нуль, виводить повідомлення «Перезавантаження системи». Після перезавантаження процесорного модуля він переводить дисплейний модуль в режим 2 і виконується описана вище послідовність переходу пристрою до виконання вимірювання концентрації.

40 – виведення меню налаштування. Пропонуються варіанти «Об'єм проби» та «Вихід». Після виводу модуль переходить до очікування відповіді користувача в режимі 41.

41 – очікування вибору в меню налаштування. В цьому режимі продовжується обмін даними з процесорним модулем, опитується сенсорний екран та, у випадку дотику, обчислюються його координати. За координатами дотику визначається, який елемент меню обрав користувач. Якщо обрано «Об'єм проби», виводиться цифрова клавіатура з кнопками «ОК» та «Вихід» та виконується перехід в режим 42. Якщо натиснуто «Вихід», виконується перехід в режим 5.

42 – очікування дотику користувача до сенсорного екрану. Якщо

координати дотику відповідають натисканню цифри, то вона додається до відображуваного на дисплеї значення об'єму проби (в мілілітрах). Якщо натиснуто «ОК», то значення об'єму проби записується в регістр 40003, в регістрі статусу та режиму роботи 40001 встановлюється біт m0, що сигналізує процесорному модулю про зміну об'єму проби, та виконується перехід в режим 43. Якщо натиснуто «Вихід», то введене нове значення об'єму проби не зберігається та виконується перехід в режим 5.

43 – очікування застосування нового значення об'єму проби процесорним модулем пристрою. Дисплейний модуль продовжує обмін даними з процесорним модулем, перевіряє вміст регістра 40001 і, якщо біт m0 скинуто в нуль, виводить повідомлення «Збережено», після чого виконується перехід в режим 5.

Біт m9 не використовується (зарезервовано для майбутніх функцій).

Біт m8 – біт наявності витоку води всередину герметичного корпусу: 1 – наявна вода, що замкнула контакти датчика витоку води, 0 – вода відсутня.

Біт m7 – біт запиту інформації (IP- і MAC-адреси) щодо мережевого підключення за допомогою Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet: 1 – процесорний модуль обробляє запит; 0 – процесорний модуль не обробляє запит. Біт встановлюється в 1 дисплейним модулем при виборі відповідного пункту меню користувачем та скидається в 0 процесорним модулем, коли запитувані дані готові до відправки.

Біт m6 – біт запиту інформації (IP- і MAC-адреси) щодо мережевого підключення за допомогою Wi-Fi: 1 – процесорний модуль обробляє запит; 0 – процесорний модуль не обробляє запит. Біт встановлюється в 1 дисплейним модулем при виборі відповідного пункту меню користувачем та скидається в 0 процесорним модулем, коли запитувані дані готові до відправки.

Біт m5 – біт збереження результатів вимірювання на зовнішній USB-

накопичувач: 1 – процес збереження зараз виконується, 0 – збереження на зовнішній накопичувач не виконується. Біт встановлюється в 1 дисплейним модулем при виборі користувачем відповідного пункту меню та скидається в 0 процесорним модулем після закінчення ним процедури запису та відмонтування файлової системи пристрою.

Біт m4 – біт перезапуску програми аналізу: 1 – виконується перезапуск програми аналізу відео та класифікації мікропланктону, 0 – перезапуск програми аналізу відео та класифікації не виконується (завершено або не розпочато). Біт встановлюється в 1 дисплейним модулем при виборі користувачем відповідного пункту меню та скидається в 0 процесорним модулем після закінчення ним процедури перезапуску програми.

Біт m3 – біт прокачки оптично прозорі вимірювальної комірки та трубок забору і скиду насосом з максимальною продуктивністю: 1 – прокачка виконується, насос працює з максимальною продуктивністю, 0 – прокачка не виконується, продуктивність насоса регулюється програмно. Біт встановлюється та скидається дисплейним модулем при виборі відповідних пунктів меню користувачем.

Біт m2 – біт зворотної прокачки оптично прозорі вимірювальної комірки та трубок забору і скиду насосом з максимальною продуктивністю: 1 – прокачка виконується в режимі реверсу, насос реверсовано й він працює з максимальною продуктивністю, 0 – прокачка не виконується, продуктивність насоса регулюється програмно. Біт встановлюється та скидається дисплейним модулем при виборі відповідних пунктів меню користувачем.

Біт m1 – біт запиту перезавантаження процесорного модуля: 1 – виконується запит на перезавантаження процесорного модуля; 0 – запит на перезавантаження процесорного модуля не виконується (виконано або запиту не надходило). Біт встановлюється в 1 дисплейним модулем при

виборі користувачем відповідного пункту меню та скидається в 0 процесорним модулем за 1 с перед початком перезавантаження.

Біт m_0 – прапорець зміни значення об'єму проби: 1 – значення об'єму проби змінено, 0 – значення об'єму проби не змінювалось. Біт встановлюється дисплейним модулем в 1 після зміни об'єму проби в регістрі 40003 та скидається в 0 процесорним модулем після застосування ним нового значення об'єму проби.

2. Регістр - текстовий буфер.

Адреса регістра – 40002.

Регістр використовується для передачі символних масивів від процесорного модуля до дисплейного модуля для відображення на тексті дисплеї. Перед початком передачі дисплейний модуль встановлює значення в цьому регістрі рівним $FFFF_{(16)}$. Процесорний модуль записує код символу в регістр 40002 і, виявивши зміну, дисплейний модуль виводить цей символ на дисплей, знову перезаписує вміст регістра числом $FFFF_{(16)}$ й чекає наступного символу. Якщо отриманий код символу $FE_{(16)}$ (ознака кінця масиву символів), дисплейний модуль не очікує наступного символу, а завершує виведення тексту на дисплей. В якості символу кінця рядка використовується $0A_{(16)}$.

3. Регістр об'єму проби.

Адреса регістра – 40003.

Регістр використовується для передачі значення об'єму проби в мілілітрах у процесорний модуль. Об'єм проби може бути заданий з діапазону 1...65535 мл.

4. Регістр прогресу вимірювання проби.

Адреса регістра – 40004.

Регістр використовується для передачі відсоткового значення прогресу вимірювання проби з процесорного модуля в дисплейний модуль для індикації. Регістр може містити значення з діапазону 0...100.

5. Регістри кількості знайдених об'єктів.

Адреси реєстрів – 40005, 40006.

Пара реєстрів, що використовуються для передачі кількості знайдених в процесі вимірювання об'єктів у досліджуваній пробі, містить 32-розрядне двійкове число в межах 0...4294967294. Процесорний модуль періодично надсилає кількість знайдених об'єктів на дисплейний модуль, який виконує її індикацію.

6. Регістр напруги на акумуляторах.

Адреса реєстра – 40007.

Регістр використовується для передачі результату аналогово-цифрового перетворення напруги з акумуляторів процесорного модуля в дисплейний модуль. Оскільки АЦП в процесорному модулі 10-розрядний, то результат перетворення, записаний в реєстр, може приймати значення з діапазону 0...1023. Залежно від значення реєстра під час роботи (в режимі б) в кутку дисплея виводиться символ елемента живлення повністю заповнений, заповнений на 3/4, заповнений наполовину, заповнений на 1/4 або пустий. В інших режимах роботи дисплейного модуля напруга на акумуляторах ніяк не відображається.

7. Регістр швидкості потоку води.

Адреса реєстра – 40008.

Регістр використовується для передачі швидкості потоку води в полі зору мікроскопа з процесорного модуля в дисплейний модуль для індикації.

8. Регістр глибини занурення.

Адреса реєстра – 40009.

Регістр використовується для передачі глибини занурення від процесорного модуля в дисплейний модуль для індикації.

9. Регістр відстані до дна.

Адреса реєстра – 40010.

Регістр використовується для передачі відстані до дна від процесорного модуля в дисплейний модуль для індикації.

3.2.3. Модуль живлення

За основу модуля живлення використано портативну батарею Qidian QD182SX з літій-іонними акумуляторами типорозміру 18650 номінальною ємністю 2600 мА·год кожен. Підвищувальний перетворювач напруги в її складі забезпечує стабільну вихідну напругу +5 В при тривалому навантаженні номінальним струмом 2А. Споживаний струм розробленого пристрою при виконанні вимірювання становив 1,47 А від джерела напруги +5 В, тому тривалість автономної роботи пристрою за умови використання двох літій-іонних акумуляторів ємністю 2,6 А·год при ККД підвищувального перетворювача напруги 85% дорівнює:

$$t_p = \frac{E}{U_c I_c} = \frac{U_a q_a \eta}{U_c I_c} = \frac{3,7 \cdot 2,6 \cdot 0,85}{5 \cdot 1,47} = 2,225_{год} = 2 \text{ год } 14 \text{ хв.}$$

За необхідності збільшити час автономної роботи паралельно до наявних акумуляторів підключаються додаткові. Час заряджання пристрою з додатковими акумуляторами збільшується, оскільки при заряджанні обмежується сумарний струм всіх паралельно підключених акумуляторів. Зменшити тривалість заряджання пристрою можна заміною плати зі схемою заряджання на ту, що забезпечує більший струм заряджання акумуляторів.

Кнопка увімкнення живлення винесена за допомогою провідників на дисплейний модуль, що залишається над поверхнею. Натискання на кнопку живлення вмикає модуль, напруга живлення +5 В подається на процесорний модуль і починається завантаження пристрою. Якщо процесорний модуль отримав команду вимкнення, він виконує дії, потрібні для штатного завершення роботи (завершення процесів, синхронізацію та відмонтування файлових систем тощо), та вимикається, зменшуючи споживання струму до сотих ампера. Виявивши, що процесорний модуль зменшив споживання струму до величин нижче порогового значення,

протягом хвилини портативна батарея припиняє подачу напруги +5 В на навантаження і вимикається.

Також живлення пристрою можна в будь-який момент відключити довгим натисканням на кнопку живлення. При цьому дані, що записувались у файлову систему процесорного модуля, можуть бути пошкоджені.

3.2.4. Процесорний модуль

Процесорний модуль являє собою одноплатний комп'ютер з 2-ядерним процесором Rockchip RK3066 архітектури ARM Cortex-A9 з тактовою частотою 1,2 ГГц і 1 ГБ оперативної пам'яті. Операційна система Ubuntu 12.10 завантажується з картки пам'яті формату microSD. Вибір ARMv7 зумовлений меншим енергоспоживанням системи порівняно з x86-системою з близькою продуктивністю. Ядром операційної системи є Linux 3.0.8, скомпільоване з підтримкою наступних можливостей:

Підтримка USB-Ethernet адаптерів на базі чіпів:

- Kawasaki LSI KL5USB101;
- ASIX AX88179, AX88178A, AX88178, AX88772C, AX88772B, AX88772A, AX88172A, AX88772, MCS7830;
- Davicom DM9601;
- Microchip LAN7500, LAN9500, LAN9500A, LAN9512, LAN9512i, LAN9513, LAN9513i, LAN9514, LAN9514i;
- Conexant CX82310.

Підтримка підключення пристрою до USB іншого комп'ютера за допомогою кабелів на базі чіпів:

- GeneSys GL620USB-A;
- NetChip 1080;
- ALi M5632;
- Anchor Chips AN2720.

Підтримка підключення USB-WiFi адаптерів на базі чіпів:

- Ralink RT2500USB, RT2501USB, RT2571W, RT2070, RT2770, RT2870, RT3070, RT3071, RT3072, RT3370, RT3572, RT5370, RT5372, RT5572
- Realtek 8192CU, 8188E;
- Marvell Libertas 8388USB;
- Atheros AR9271, AR9170, AR7010;
- Realtek 8187, 8187B;
- ZyDAS ZD1201;
- Atmel AT76C503, AT76C505, AT76C505A.

Збереження даних вимірювання може здійснюватись на USB-накопичувачі з файловими системами:

- Ext4/ Ext3/ Ext2;
- ReiserFS;
- JFS;
- XFS;
- FAT;
- NTFS.

До процесорного модуля за допомогою інтерфейсу USB підключаються 3 пристрої:

1. Мікроскоп. Для успішного підключення камера мікроскопа повинна відповідати класу USB-пристроїв UVC (USB video device class). Програма аналізу відео встановлює розмір відеокадрів з мікроскопа 640x480, якщо він підтримується. Більший розмір кадру дозволяє виявляти дрібніші об'єкти й отримувати більш деталізоване зображення, проте вимагає більшої обчислювальної потужності.

2. Модуль введення-виведення. Дозволяє процесорному модулю отримувати сигнали від датчиків та формувати керуючий вплив на привод насоса. Оскільки на модулі присутній перетворювач USB-UART, то обмін даними з ним, з точки зору прикладної програми, відбувається через

послідовний інтерфейс.

3. Перетворювач інтерфейсів USB - RS-485. Використовується для зв'язку процесорного модуля з дисплейним модулем по інтерфейсу RS-485.

Четвертий порт залишається вільним і до нього можуть підключатись додаткові пристрої.

Процесорний модуль отримує живлення +5 В від модуля живлення та постачає його решті пристроїв, підключених до USB.

Після подачі живлення виконується завантаження операційної системи процесорного модуля та запускається керуюча програма. Налаштування керуючої програми зберігаються в каталозі з програмою. Доступ до них здійснюється за допомогою бібліотеки *libconfig*, яка і визначає формат запису кожного налаштування у файлі налаштувань.

Керуюча програма зчитує налаштування, створює підключення до дисплейного модуля та модуля введення-виведення за протоколом Modbus RTU, створює чергу повідомлень для обміну даними з програмою аналізу відео та класифікації, формує список підключених USB-пристроїв викликом програми *lsusb* та надсилає його дисплейному модулю записом у регістр 40002. З цього моменту починається періодичне зчитування регістра статусу і режиму роботи 40001 дисплейного модуля, регістра напруги на акумуляторах і витоку води 40001, тиску води 4003 і відстані до дна 40004 модуля введення-виведення, а також запис значень у регістр напруги на акумуляторах 40007, регістр глибини занурення 40009, регістр відстані до дна 40010 дисплейного модуля.

Користувач занурює пристрій на потрібну глибину, слідкуючи за значеннями глибини і відстані до дна на дисплеї. Коли пристрій досягає потрібної глибини забору проби, користувач торкається дисплею, що переводить дисплейний модуль в режим 4. Як тільки зчитане значення режиму роботи дисплейного модуля стане рівне 4, керуюча програма встановлює в одиницю біт та в регістрі керування насосом 40002 модуля

введення-виведення й в цьому ж реєстрі задає максимальну продуктивність насоса. Трубка забору води і оптично прозора проточна вимірювальна комірка максимально швидко заповнюються досліджуваною водою. Керуюча програма очікує, коли значення режиму роботи в реєстрі 40001 стане 5 або 6, після чого починає власне процес вимірювання.

Щоб запустити процес вимірювання концентрації мікропланктону, керуюча програма створює дочірній процес і запускає в ньому програму аналізу відео та класифікації мікропланктону (додаток Г). В якості аргумента цій програмі передається значення заданого об'єму проби. На основі цього значення програма розраховує цільове значення змінної-лічильника об'єму. Запущена програма аналізу відео та класифікації мікропланктону під'єднується до створеної черги повідомлень для обміну даними з керуючою програмою, підключається до програми-сервера баз даних MySQL та зчитує межі класифікаційних параметрів для кожної групи, за допомогою функцій бібліотеки OpenCV отримує доступ до камери мікроскопа, задає параметри відеопотоку та починає покадрово отримувати зображення досліджуваної води, перетворювати отримані відеокадри з колірної моделі RGB в колірну модель HSV. Далі з HSV-зображення виділяється V-компонента (Value), до якої застосовується згладжування, вирівнювання яскравості та пороговий фільтр, в результаті чого отримується бінарне зображення. У отриманому бінарному зображенні виділяються замкнуті контури, визначаються координати центрів контурів та їх площі. Далі здійснюється оновлення координат існуючих та видалення зниклих контурів порівнянням з координатами об'єктів дослідження на попередньому кадрі в рахуванням викладеного в п. 2.5. Якщо на поточному кадрі залишилися контури, яким не знайдений відповідний об'єкт з попереднього кадру, вони вважаються новими об'єктами, які вперше з'явилися в полі зору, за умови, що їх площа не менше S_{min} .

Періодично, 1 раз на 10 секунд, виконується підлаштування порогового фільтра порівнянням з результатами застосування оператора Кенні.

Далі програма аналізу відео та класифікації мікропланктону визначає переміщення об'єктів за час між сусідніми кадрами, додає їх в масив з переміщень за останні $m=10$ кадрів з видаленням переміщення на найдавнішому кадрі. Підраховується кількість об'єктів, що мають певне значення сумарного переміщення з m кадрів, та записується в масив сумарних переміщень. Для кожного елемента s_i з цього масиву виконується обчислення середнього арифметичного з чотирма найближчими елементами в масиві (тобто з проміжку $[s_{i-2}; s_{i+2}]$) і в якості сумарного переміщення потоку води обирається переміщення, якому відповідає максимальна середня кількість об'єктів. Якщо максимумів декілька, то використовується значення переміщення, визначене при обробці попереднього кадру. Далі програма обчислює швидкість множенням переміщення на поточну частоту кадрів $f=25 \text{ c}^{-1}$ і через чергу повідомлень передає її керуючій програмі. Отримана швидкість приймається за швидкість потоку води. На кожному кадрі значення змінної-лічильника об'єму збільшується на величину швидкості води в кадрі. Також програма аналізу відео та класифікації мікропланктону розраховує градієнт яскравості для контурів застосуванням оператора Собеля та передає його керуючій програмі.

Керуюча програма здійснює керування швидкістю води в полі зору мікроскопа. Якщо максимальний градієнт яскравості менше заданого значення, то формується команда зменшити продуктивність насоса, для чого в реєстр керування насосом 40002 модуля введення-виведення записується попереднє значення, зменшене на одиницю. В протилежному випадку продуктивність поступово збільшується, але не більше, ніж на 5 одиниць за секунду.

Далі програма аналізу відео та класифікації мікропланктону розраховує класифікаційні параметри об'єктів у кадрі: абсолютних довжини і ширини, відносної ширини, еквівалентного діаметру, коефіцієнта випуклості, коефіцієнта заповнення, компактності, радіусу середньої лінії, середнього кольору, швидкості руху відносно потоку, швидкості зміни довжини, багатоклітинності. Обчислені значення параметрів об'єкта проходять фазифікацію та обчислюються ступені приналежності об'єкта до кожної класифікаційної групи за кожним параметром із використанням меж нечітких множин, зчитаних з бази даних MySQL. Програма обчислює добуток ступенів приналежності кожного об'єкта по всім параметрам до кожної класифікаційної групи. Після обчислення ступенів приналежності до класифікаційних груп об'єкт класифікується до тієї групи, для якої добуток максимальний, за умови, що він не менше 0,25.

Після досягнення значенням змінної-лічильника об'єму цільового значення обчислюється концентрація кожного виду мікропланктону як відношення кількості розпізнаних екземплярів до об'єму води, що пройшов у фокусі мікроскопа.

Результат вимірювання через чергу повідомлень надсилається керуючій програмі, зберігається в JSON-файлі з назвою, що містить дату та час закінчення вимірювання, у форматі "тг-хх-сс_дд-мм-рррр.json", а також, за наявності підключення до Інтернет, надсилається MQTT-брокеру. Лічильник об'єму води скидається в нуль та починається вимірювання нової дози. Керуюча програма, отримавши результат вимірювання, змінює режим роботи дисплейного модуля в реєстрі 40001 на 7 та посимвольно передає його через реєстр 40002.

Якщо користувач під час виконання вимірювання натискає на екран, відображається головне меню та користувач здійснює вибір потрібного пункту. В цей час програма аналізу відео продовжує виконуватись, а

досліджувана вода прокачуватись через проточну комірку.

Якщо керуюча програма виявила, що в реєстрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт m6 або m7, виконується конвеєр з програм *ifconfig*, *grep* і *awk*, який повертає поточну IP- та MAC-адресу пристрою. Отримавши текст, що містить ці адреси, керуюча програма скидає в нуль біт, який був встановлений в одиницю, та починає передачу цього тексту в дисплейний модуль, використовуючи реєстр 40002. Повідомлення про адресу пристрою відображається на дисплеї та користувач має змогу підключитись до нього. Процесорний модуль налаштовано на отримання IP-адреси та інших параметрів, необхідних для роботи в мережі за допомогою протоколу DHCP. Якщо в мережі потрібно використовувати статичну IP-адресу, то мережеві параметри можуть бути задані у файлі */etc/network/interfaces*.

Спроба підключення пристрою до мережі відбувається вперше ще під час завантаження операційної системи. Якщо вона виявилась невдалою, то повторні спроби будуть виконуватись при підключенні зовнішніх мережевих адаптерів (як Ethernet, так і Wi-Fi). У разі вдалого підключення в користувача з'являється доступ до файлів з результатами вимірювання за протоколом SMB (наприклад, в Windows за допомогою служби спільного доступу до файлів та принтерів), за забезпечення якого відповідає сервер Samba. За наявності доступу до Інтернет керуюча програма намагається за допомогою програми *mosquitto_pub* відправити поточний результат вимірювання на адресу вказаного у налаштуваннях MQTT-брокера. Зацікавлені в результатах вимірювання користувачі можуть підписуватись на відповідний топик у MQTT-брокера й в режимі реального часу отримувати результати вимірювань. Для підключення до комп'ютерної мережі герметичний корпус повинен знаходитись на поверхні.

Після завантаження операційної системи процесорний модуль виконує спробу підключення за допомогою вбудованого Wi-Fi-модуля до

бездротової мережі «HydroLab». У випадку невдачі, Wi-Fi-модуль налаштовується в режим IBSS й створюється Ad-Нос-мережа «МРА», до якої може підключитись користувач для копіювання файлів з результатами вимірювання. Імена й паролі підключення до мереж можуть бути задані в файлі */etc/network/interfaces*. В разі використання зовнішнього Wi-Fi-адаптера BSSID та пароль підключення задаються в цьому ж файлі.

Якщо керуюча програма виявила, що в реєстрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт m5, виконується послідовність команд з монтування файлової системи підключеного USB-накопичувача в каталог */mnt/usb*, копіювання файлів з результатами вимірювань на нього та відмонтування файлової системи. Після цього керуюча програма скидає біт m5 в нуль у реєстрі 40001 дисплейного модуля та починає передачу повідомлення про результат копіювання через реєстр 40002. Дисплейний модуль послідовно зчитує символи повідомлення «Скопійовано _ файлів» і виводить їх на дисплей. Запис результатів вимірювання здійснюється в перший розділ USB-накопичувача, який повинен бути відформатованим у одну з файлових систем, перелічених вище. В налаштуваннях прав доступу до кореневого каталога файлової системи повинен бути ввімкнений дозвіл на запис.

Якщо керуюча програма виявила, що в реєстрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт m4, то процес програми аналізу відео й класифікації завершується викликом програми *killall*. Далі керуюча програма знову створює дочірній процес і запускає в ньому програму аналізу відео та класифікації мікропланктону. Після цього керуюча програма скидає біт m4 в нуль у реєстрі 40001 дисплейного модуля. Підрахунок кількості мікроорганізмів та об'єму дози починається спочатку.

Якщо керуюча програма виявила, що в реєстрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт m2 або m3, то процес

програми аналізу відео та класифікації завершується викликом програми `killall`, на модуль введення-виведення надсилається нове значення регістра керування насосом 40002. Якщо біт `m3` встановлений в одиницю, то в одиницю встановлюється біт `ma` в регістрі керування насосом, а якщо біт `m2` – `mr`. Продуктивність насоса задається максимальною (255). У відповідь на скидання біта `m2` або `m3` дисплейним модулем керуюча програма записує в регістр керування насосом модуля введення-виведення нуль, що призводить до зупинки насоса. Далі керуюча програма знову створює дочірній процес і запускає в ньому програму аналізу відео та класифікації мікропланктону. Підрахунок кількості мікроорганізмів та об'єму дози починається спочатку.

Якщо керуюча програма виявила, що в регістрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт `m1`, вона за допомогою програми `dbus-send` ініціює перезавантаження системи та скидає цей біт в нуль.

Якщо керуюча програма виявила, що в регістрі статусу та режиму роботи 40001 дисплейного модуля встановлено біт `m0`, вона зчитує значення об'єму проби з регістра 40003 дисплейного модуля. Далі процес програми аналізу відео та класифікації завершується викликом програми `killall`, керуюча програма знову створює дочірній процес і запускає в ньому програму аналізу відео та класифікації мікропланктону, але вже з новим значення об'єму дози, що передається як аргумент виклику. Значення об'єму дози в файлі налаштувань перезаписується новим. Після цього керуюча програма скидає біт `m0` в нуль у регістрі 40001 дисплейного модуля. Підрахунок кількості мікроорганізмів та об'єму дози починається спочатку.

Якщо керуюча програма виявила, що в регістрі напруги на акумуляторах і витoku води 40001 модуля введення-виведення встановлений біт `w1`, то в регістрі статусу та режиму роботи 40001

дисплейного модуля встановлюється біт m8, в результаті чого користувач на поверхні побачить відповідну сигналізацію. В регістр керування насосом 40002 модуля введення-виведення записується нуль, що призводить до відключення насоса.

3.3. Калібрування камери мікроскопа

При вимірюванні концентрації різних груп мікропланктону в воді для виконання класифікації мікроорганізмів до певної групи виконується вимірювання лінійних розмірів мікроорганізмів. На цифрових зображеннях мікроорганізмів, що надходять з камери мікроскопа, розміри об'єктів та координати точок визначаються в пікселях, а для виконання класифікації ці розміри мають бути подані в одиницях довжини (мікрометрах). Тому під час калібрування необхідно визначити коефіцієнт перетворення оптичної системи відеокамери приладу K_{oc} . При цьому було використано калібрувальну сітку зі шкалою для мікроскопів (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Калібрувальна сітка та шкала, що використовувались при калібруванні

Для визначення K_{oc} калібрувальну сітку було розміщено під склом тієї ж товщини, що використовувалось для виготовлення проточної оптично прозорої комірки, та розташовано на місці проточної комірки. Після цього мікроскоп був сфокусований на калібрувальну сітку зі шкалою та зроблено

знімок калібрувальної сітки (рис. 3.9).

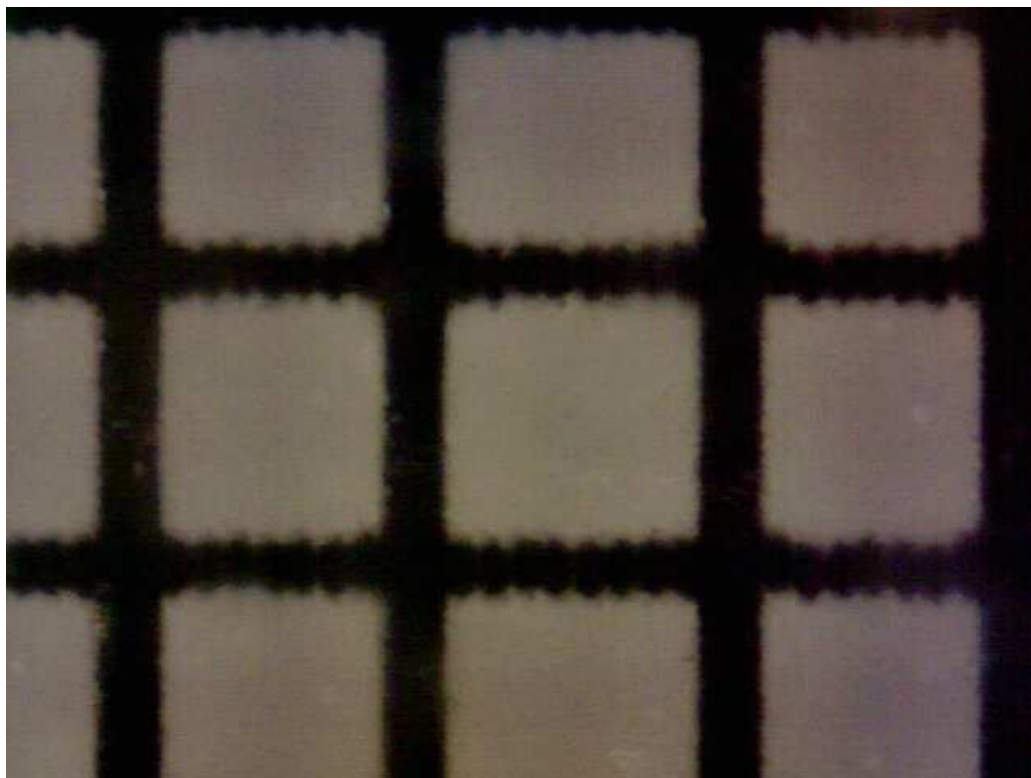


Рис. 3.9. Зображення калібрувальної сітки через мікроскоп

Крок сітки, заявлений виробником – 0,1 мм. Роздільна здатність відео, що захоплюється з мікроскопа, становить 640x480 пікселів. Для визначення відстані між першою та четвертою вертикальними лініями на зображенні виконано 15 вимірювань відстані на різній відстані від верхньої межі зображення, в результаті чого отримано середнє арифметичне значення відстані $N_k=545,833$ пікселі, що відповідає відстані 0,3 мм, або $h_k=300$ мкм. Отже, значення коефіцієнта перетворення оптичної системи відеокамери пристрою дорівнює:

$$K_{oc} = \frac{N_k}{h_k} = \frac{545,833}{300} = 1,8194 \text{ (пікселів/мкм)}.$$

Розраховане для пристрою значення використовується для визначення лінійних розмірів об'єктів у полі зору мікроскопа на основі відстаней між елементами зображення, визначеними у пікселях.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено структурні схеми портативних пристроїв для вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом, які дозволяють здійснювати вимірювання у неперервному потоці за місцем відбору проби.

2. Розроблено конструкцію та виготовлено пристрій для вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом із занурюваним герметичним корпусом, що дозволяє скоротити час на забір проби або збільшити час автономної роботи.

3. Розроблено 4 програми для елементів пристрою: керуючу програму, програму аналізу відео та класифікації мікропланктону, програму, що забезпечує інтерфейс користувача, для дисплейного модуля, програму опитування датчиків на керування двигуном для модуля введення-виведення.

4. Для зв'язку елементів пристрою використовується протокол Modbus RTU, що дозволяє за потреби використовувати промислові засоби автоматизації.

5. Результати вимірювання зберігаються в файлах JSON та надсилаються протоколом MQTT, що спрощує їх опрацювання в інформаційних системах.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДУ І ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАНКТОНУ

4.1. Аналіз невизначеностей вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом

При оцінюванні точності та достовірності результатів будь-якого вимірювання виникає невизначеність даних результатів вимірювання. Невизначеність вимірювання вказує на те, що для даного результату вимірювання фізичної величини немає єдиного (істинного) значення, а є нескінчене число значень, розсіяних навколо результату, які узгоджуються з усіма спостереженнями та даними, і ці значення із різним ступенем упевненості можуть бути приписані вимірюваній величині.

Розрахунок невизначеності результатів вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом вимірювання концентрації організмів мікропланктону проводився згідно рекомендацій [71, 72], що встановлюють загальні правила оцінювання і представлення невизначеності вимірювання.

Згідно [71] складають модельне рівняння, що виражає залежність між вихідною Y та вхідними X_1, X_2, \dots, X_m величинами $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m)$. Оскільки у запропонованому методі вимірювання концентрації організмів мікропланктону відсутня явна аналітична залежність між вихідною величиною (концентраціями класифікаційних груп мікропланктону) та вхідними величинами, то було проведено аналіз впливу вхідних величин та їх невизначеностей на отриманий результат вимірювання. Використання у запропонованому методі нейронних мережі з нелінійними функціями активації та нечіткої логіки, а також умовних операторів для класифікації суттєво ускладнює вираження вихідної концентрації по кожній класифікаційній групі як функції від вхідної множини пікселів кожного відеокадру.

При аналізі процесу вимірювання концентрації мікропланктону розробленим методом вимірювання концентрації організмів мікропланктону було досліджено, що на результат вимірювання концентрації впливають такі стандартні невизначеності:

Невизначеності, що складають сумарну невизначеність вимірювання об'єму $u(V)$:

1. Невизначеність вимірювання розмірів поля зору цифрового мікроскопа. Потік досліджуваної води в полі зору мікроскопа організовано так, що він рухається вздовж більшої сторони кадру. Тому на результати вимірювання чинить вплив невизначеність вимірювання висоти поля зору (ширини потоку води в полі зору) $u(b)$, оскільки саме вона використовується для розрахунку об'єму (2.6).

2. Невизначеність визначення товщини шару води, на який сфокусовано мікроскоп, $u(h)$.

Невизначеність вимірювання частоти кадрів $u(f)$ не впливає на сумарну невизначеність вимірювання об'єму, оскільки в підсумку об'єм проби відповідає сумарному шляху води, пройденому за час вимірювання. Наприклад, зменшення частоти кадрів призведе до зменшення шляху, який проходить об'єкт в кадрі, й досліджувана вода пройде той самий шлях за більшу кількість кадрів.

3. Невизначеність вимірювання швидкості потоку води $u(v)$. За швидкість потоку води приймається швидкість найбільшої групи об'єктів у полі зору мікроскопа. Ця невизначеність включає невизначеність вимірювання шляху $u(s)$, пройденого об'єктами в кадрі, та невизначеність вимірювання часу між кадрами $u(T_k)$. Остання не впливає на сумарну невизначеність вимірювання об'єму з тих самих причин, що і невизначеність вимірювання частоти кадрів. Невизначеність вимірювання шляху $u(s)$ включає невизначеність визначення координат центру об'єкта $u(\zeta_0)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

Невизначеність визначення координат центру об'єкта $u(\zeta_o)$ включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$ та невизначеність вимірювання координат точок об'єктів у цифровому форматі $u(pix)$. У свою чергу невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$ включає невизначеність визначення відстані між лініями сітки на її цифровому зображенні $u(N_k)$ та невизначеність точності виготовлення сітки $u(h_k)$.

Далі наведені невизначеності, що входять у сумарну невизначеність вимірювання кількості мікроорганізмів $u(n_i)$, віднесених до класифікаційних груп.

4. Невизначеність вимірювання довжини об'єкта $u(l_o)$ та ширини $u(b_o)$, яка включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат крайніх точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

5. Невизначеність обчислення відносної ширини об'єкта $u(b_{ro})$, яка включає невизначеності вимірювання довжини об'єкта $u(l_o)$ та ширини $u(b_o)$.

6. Невизначеність визначення еквівалентного діаметра об'єкта $u(d_{екво})$, яка включає невизначеність визначення площі об'єкта $u(S_o)$, що включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

7. Невизначеність визначення коефіцієнта випуклості об'єкта $u(k_{eo})$, яка включає невизначеність визначення площі об'єкта $u(S_o)$, що включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

8. Невизначеність визначення коефіцієнта заповнення об'єкта $u(k_{zo})$,

яка включає невизначеність вимірювання довжини об'єкта $u(l_o)$ та ширини $u(b_o)$ і невизначеність визначення площі об'єкта $u(S_o)$, що включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

9. Невизначеність визначення компактності об'єкта $u(c_o)$, яка включає невизначеність визначення площі об'єкта $u(S_o)$, що включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

9. Невизначеність визначення радіуса середньої лінії об'єкта $u(R_{co})$, яка включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$.

10. Невизначеність визначення середнього кольору об'єкта $u(HSV_o)$, яка включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(ko)$, невизначеність вимірювання координат точок контура у цифровому форматі $u(pix)$, невизначеність квантування по рівню відеосигналу при перетворенні зображення в цифрову форму $u(kv)$, невизначеність, обумовлена шумами в світлочутливій матриці $u(sm)$.

11. Невизначеність вимірювання швидкості руху об'єкта відносно потоку досліджуваної води $u(v_o)$, яка включає невизначеність визначення швидкості потоку води в полі зору мікроскопа $u(v)$, невизначеність вимірювання шляху $u(s)$, пройденого об'єктом в кадрі, та невизначеність вимірювання часу між кадрами $u(T_k)$, яка визначається невизначеністю частоти кадрів $u(f)$. Остання включає невизначеність частоти тактового генератора $u(f_{osc})$. Невизначеність вимірювання шляху $u(s)$, пройденого об'єктом в кадрі, включає невизначеність визначення координат центру

об'єкта $u(\zeta_0)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$. Невизначеність визначення координат центру об'єкта $u(\zeta_0)$ включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(\kappa_0)$ та невизначеність вимірювання координат точок об'єктів у цифровому форматі $u(pix)$.

12. Невизначеність вимірювання швидкості зміни довжини об'єкта $u(dl_0)$, яка включає невизначеність визначення координат центру об'єкта $u(\zeta_0)$, невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{oc})$, невизначеність вимірювання часу між кадрами $u(T_k)$, яка визначається невизначеністю частоти кадрів $u(f)$. Остання включає невизначеність частоти тактового генератора $u(f_{osc})$. Невизначеність визначення координат центру об'єкта $u(\zeta_0)$ включає невизначеність визначення контура об'єкта $u(\kappa_0)$ та невизначеність вимірювання координат точок об'єктів у цифровому форматі $u(pix)$.

13. Невизначеність визначення багатоклітинності об'єкта $u(mc_0)$.

14. Невизначеність класифікації об'єктів до різних класифікаційних груп $u_i(кл)$. При використанні нечіткої логіки для класифікації мікропланктону це невизначеність опису різноманіття форм мікропланктону обмеженою кількістю нечітких множин $u_i(нл)$. При використанні штучної нейронної мережі для класифікації мікропланктону це невизначеність репрезентативної вибірки $u(vнм)$ для навчання штучної нейронної мережі та невизначеність обробки вхідної інформації штучною нейронною мережею $u_i(онм)$.

На рис. 4.1. наведено схему обчислення сумарної стандартної невизначеності вимірювання концентрації мікроорганізмів i -ої класифікаційної групи $u_c(C_i)$ на основі невизначеностей вхідних величин, що присутні при вимірюванні концентрації мікропланктону запропонованим методом і приладом.

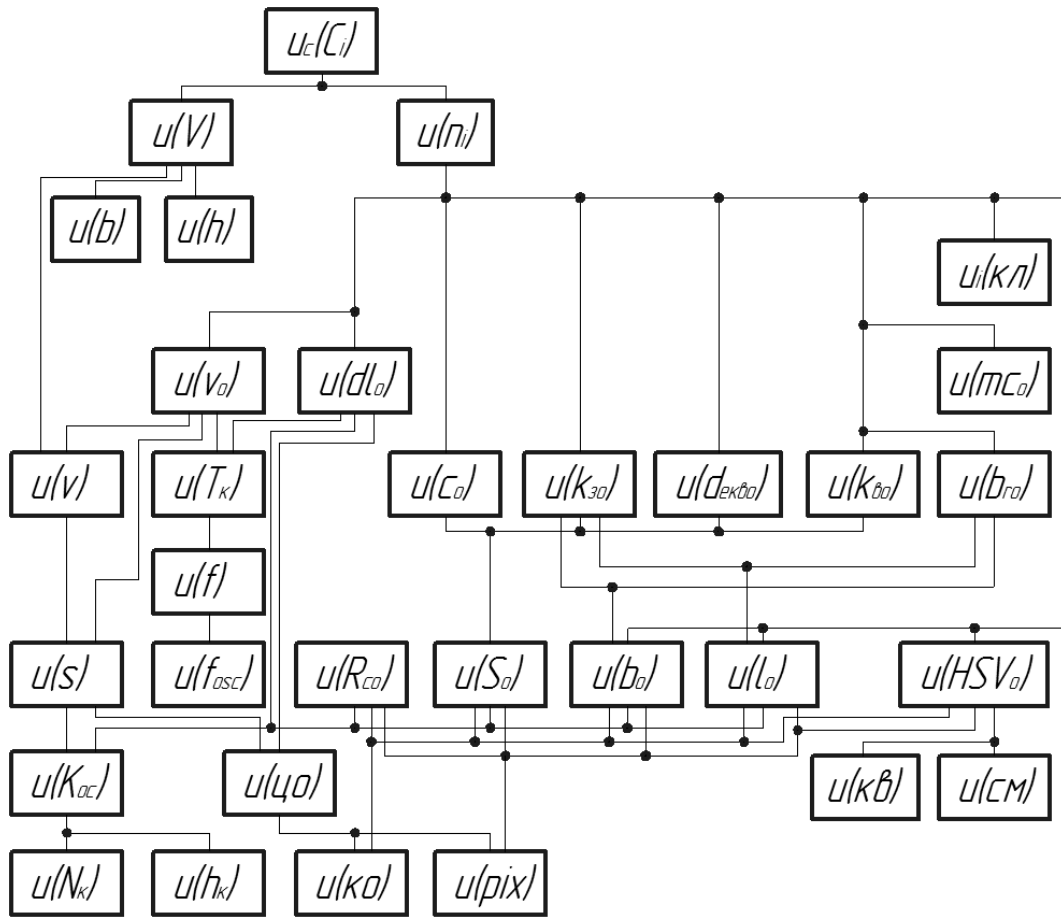


Рис. 4.1. Складові сумарної стандартної невизначеності вимірювання концентрації мікропланктону запропонованим методом і приладом

Сумарна стандартна невизначеність є оцінкою стандартного відхилення вимірюваної величини Y і характеризує розкид значень, які із достатньою вірогідністю можуть бути присвоєні даній величині [73-74]:

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(Y)}, \quad (4.1)$$

де $u_i(Y)$ – внесок невизначеності кожної вхідної величини X_i у сумарну невизначеність вимірюваної величини $u_c(Y)$ і визначається як добуток коефіцієнта чутливості на невизначеність вхідної величини [73]:

$$u_i(Y) = |c_i| u(X_i), \quad (4.2)$$

де c_i – коефіцієнт чутливості, що показує, як оцінка вихідної величини змінюється зі зміною оцінок вхідних величин. Розраховується як часткові похідні вихідної величини по кожній із вхідних величин, оцінених при

значеннях вхідних величин [74]:

$$c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i}. \quad (4.3)$$

Оскільки відсутня явна аналітична залежність між вихідною та вхідними величинами, а тому неможливо розрахувати часткові похідні залежності вихідної величини по кожній із вхідних величин, то невизначеність вимірювання концентрації визначено експериментально.

4.2. Оцінка точності вимірювання концентрації мікропланктону розробленим пристроєм

Для оцінки невизначеності вимірювання концентрації мікропланктону пристроєм була відібрана проба води об'ємом 1 дм³ з озера Басів Кут (координати місця відбору 50°36'16.6"N 26°15'06.1"E).

Об'єм проби подавався у трубку забору проби пристрою й досліджувана вода відводилась у іншу ємність. Далі вода, концентрація мікропланктону в якій вже була виміряна пристроєм, повторно подавалась на вхід пристрою. Ці дії було повторено доти, доки кількість вимірювань проби не досягла $n=25$. Отримані значення концентрації за кожною i -ою класифікаційною групою використані для розрахунку стандартної невизначеності типу А [70] за формулою:

$$u_{A,i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^{n_i} (C_{iq} - \bar{C}_i)^2}, \quad (4.4)$$

де C_{iq} – концентрація організмів i -ої класифікаційної групи в q -му вимірюванні. Отримані значення невизначеностей вимірювання концентрації за кожною класифікаційною групою наведені в таблиці 4.1.

Після закінчення аналізу проби води пристроєм концентрація мікропланктону була визначена лабораторним методом за допомогою ручного підрахунку по полях зору мікроскопа.

Таблиця 4.1. Невизначеності вимірювання концентрації мікропланктону за кожною класифікаційною групою

Класифікаційна група (вид, рід)	Стандартна невизначеність за типом А
Amoeba	11,169
Chlorella	2,077
Coelastrum microporum	11,091
Cyclops varius	0
Euglena viridis	0,957
Paramecium caudatum	4,486
Pediastrum	15,015
Trachelomonas volvocina	4,238
Ulothrix zonata	5,128

Отримані значення були прийняті за істинні значення концентрації мікропланктону та обчислені середні похибки вимірювання (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2. Середні похибки вимірювання концентрації мікропланктону за кожною класифікаційною групою

Класифікаційна група (вид, рід)	Відносна похибка, %
Amoeba	+12,0
Chlorella	+1,3
Coelastrum microporum	+12,8
Cyclops varius	0
Euglena viridis	+1,2
Paramecium caudatum	+5,2
Pediastrum	-24,6
Trachelomonas volvocina	-7,8
Ulothrix zonata	-3,5

Потрібно зазначити, що визначення приналежності організму до певного біологічного виду людиною-лаборантом лише за зовнішнім виглядом не можна вважати абсолютно достовірним. Виконання й аналіз результатів біохімічних досліджень, оцінювання ступенів подібності

геномів організмів збільшує достовірність визначення видової приналежності організмів, проте вимагає непропорційно більших матеріальних ресурсів. Оскільки публікацій досліджень щодо оцінки точності ручної класифікації мікропланктону до згаданих видів не знайдено, то при визначенні похибки будемо вважати, що похибку вимірювання концентрації мікропланктону лабораторним методом з ручною класифікацією складає лише похибка вимірювання об'єму проби, яка дорівнює $\pm 0,5$ мл, а похибкою вимірювання кількості організмів у пробі знехтуємо.

Найменша точність вимірювання концентрації спостерігається для колоніальних зелених водоростей *Pediastrum* та *Coelastrum microporum*, що спричинене значною подібністю цих організмів за винятком показника компактності (та відповідними взаємними хибними розпізнаваннями), а також у *Atoeba*, що пов'язане в мінливістю її форми.

Чутливість і поріг чутливості пристрою дорівнюють один екземпляр класифікованого об'єкта на об'єм проби.

Верхня межа діапазону вимірювання пристрою залежить від площі та периметру об'єктів, що рухаються в полі зору мікроскопа. Лімітуючим фактором є обчислювальна складність відстеження та класифікації об'єктів. Одна й та сама кількість об'єктів більшого периметра потребує більших затрат процесорного часу, ніж об'єктів меншого периметра.

Щоб здійснити порівняння точності класифікації мікропланктону за допомогою нечіткої логіки та штучної нейронної мережі, був виконаний забір проб води та збереження відеопотоку з мікроскопа на зовнішню USB-флеш пам'ять. Отриманий відеофайл подавався як вхідний відеопотік програмам аналізу відео та класифікації, а також аналізувався вручну, що дозволило переглянути кожен кадр, провести ручну класифікацію мікроорганізмів та обчислити частку хибних розпізнавань, що наведена в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Порівняння точності класифікації мікропланктону

Класифікаційна група (вид, рід)	Правильно класифіковано, % від загальної кількості	
	Нечітка логіка	Нейронна мережа
Amoeba	84	89
Chlorella	97	98
Coelastrum microporum	75	87
Cyclops varius	100	100
Euglena viridis	95	99
Paramecium caudatum	85	95
Pediastrum	48	75
Trachelomonas volvocina	87	92
Ulothrix zonata	96	96
Середнє	85	92

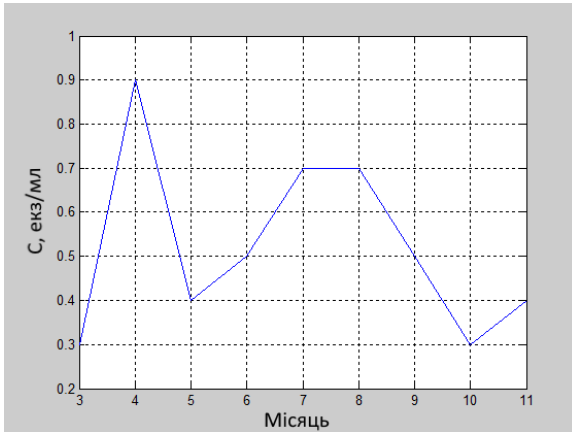
В переважній більшості програма аналізу відео та класифікації мікропланктону, що використовувала штучну нейронну мережу, показала вищу точність класифікації порівняно з початковою програмою, що використовувала нечітку логіку.

4.3. Випробування розробленого пристрою та аналіз результатів

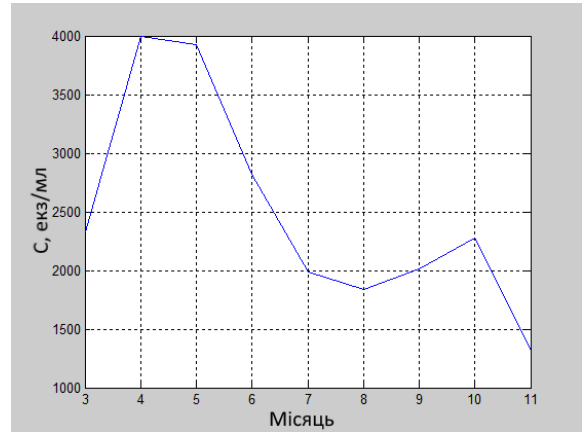
За допомогою розробленого пристрою, що реалізує метод вимірювання концентрації мікропланктону, були проведені дослідження концентрації мікропланктону в оз. Басів Кут і р. Устя.

Впродовж 2018 року щомісяця (окрім зимових місяців) виконувалось вимірювання концентрації організмів мікропланктону вищезазначених класифікаційних груп в пробах, відібраних у поверхневому шарі води озера Басів Кут з берега за координатами 50°36'16.6"N 26°15'06.1"E. Об'єм проби в налаштуваннях пристрою був встановлений рівним 10 мл.

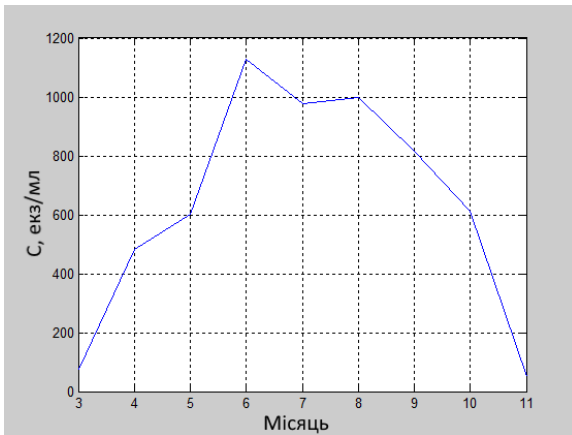
Графіки виміряної пристроєм концентрації мікропланктону наведені на рис. 4.2-4.3.



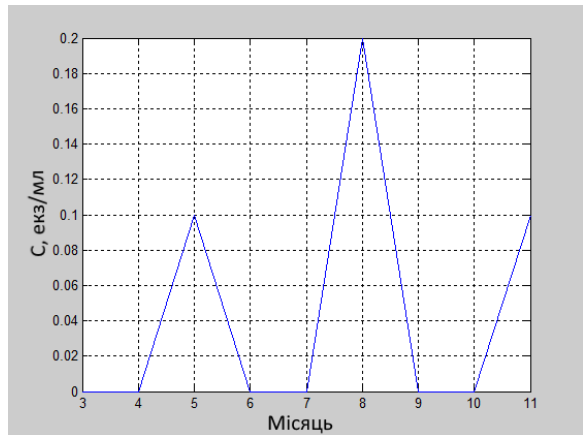
а



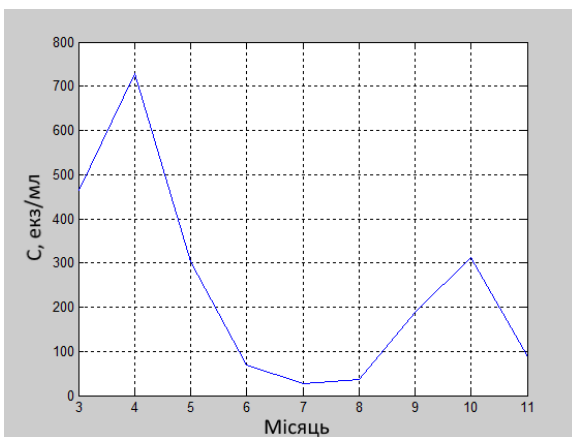
б



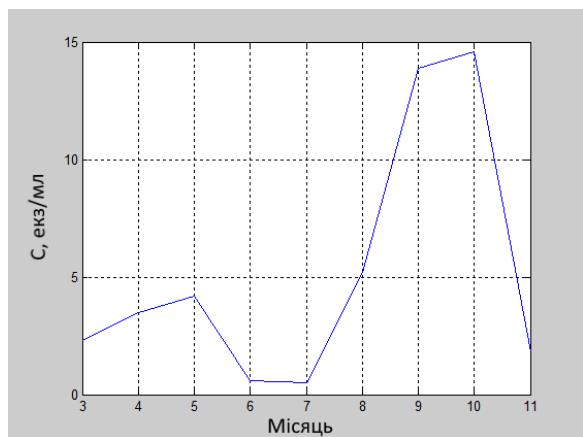
в



г

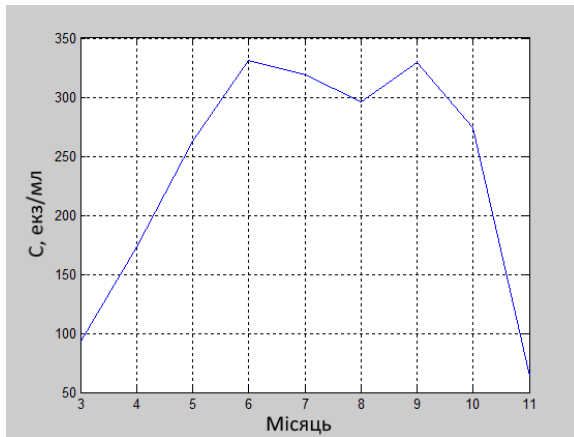


д

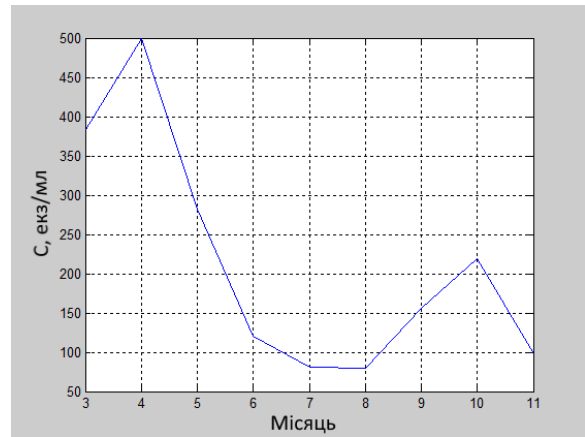


е

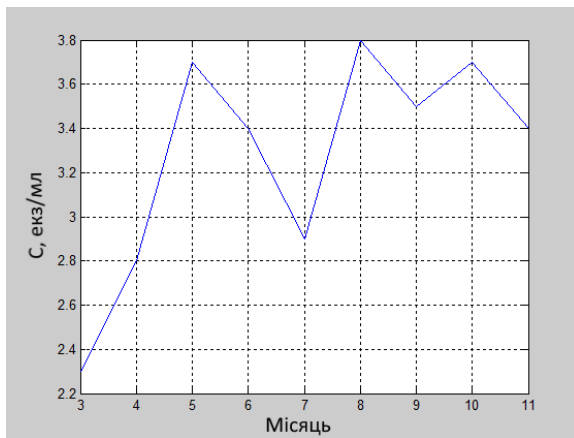
Рис. 4.2. Концентрація мікропланктону в воді озера Басів Кут: а - Амoeba, б - Chlorella, в - Coelastrum microporum, г - Cyclops varius, д - Euglena viridis, е - Paramecium caudatum



а



б



в

Рис. 4.3. Концентрація мікропланктону в воді озера Басів Кут: а – *Pediastrum*, б - *Trachelomonas volvocina*, в - *Ulothrix zonata*

З рис. 4.2.в та рис. 4.3.а можна побачити, що концентрація зелених водоростей *Coelastrum microporum* та роду *Pediastrum* збільшувалась із зростанням тривалості сонячного дня та температури до червня. Липень-серпень відмічені невеликим спадом популяції. Дані зелені водорості є індикаторами евтрофного забруднення водойми. Проблемою озера впродовж декількох останніх років є несанкціоноване скидання побутових каналізаційних стоків з приватної малоповерхової забудови навколо озера. Це підтверджується також неоднократним декількаразовим перевищенням вмісту *Escherichia coli* у воді озера, що регулярно виявлялось Рівненським обласним лабораторним центром МОЗ України.

Рис. 4.2.б показує швидкий ріст популяції зелених водоростей роду

Chlorella навесні, який закінчується падінням концентрації влітку внаслідок конкуренції з боку ціанобактерій, що розвиваються в набагато більших кількостях.

Евгленові *Euglena viridis* та *Trachelomonas volvocina* відповідно до рис. 4.2.д та рис. 4.3.б досягають максимальної кількості навесні, а впродовж літніх місяців популяція зменшується, хоча концентрація *Trachelomonas volvocina* падає не так сильно, як *Euglena viridis*.

Концентрація *Cyclops vernalis* є низькою, було знайдено 1-2 організми в пробі об'ємом 10 мл (рис. 4.3.г), що говорить про необхідність збільшувати об'єм проби при необхідності контролю популяції цих організмів.

Найпростіші *Amoeba* та *Paramecium caudatum* порівняно з фітопланктоном розвивались в значно менших кількостях. Кількість амеб досягла піку в квітні, також локальний максимум спостерігався у липні-серпні (рис. 4.2.а). Інфузорії *Paramecium caudatum* мали максимальну популяцію в теплі осінні місяці (рис. 4.3.е).

Концентрація *Ulothrix zonata* згідно рис.4.3.в збільшується навесні, проте в липні спостерігався яскравовиражений мінімум. Оскільки *Ulothrix zonata* прикріплюється до водних предметів, а в планктоні спостерігаються лише фрагменти цієї водорості, то неможливо однозначно сказати, де зміна концентрації пов'язана зі збільшенням популяції цієї водорості, а де – із зміною інтенсивності фрагментації ниток водорості.

Висновки до розділу 4

1. Проаналізовано невизначеності, що виникають при вимірюванні концентрації мікропланктону розробленим методом і пристроєм. Найбільший внесок у сумарну невизначеність вносить класифікатор (штучна нейронна мережа або нечітка логіка), а точність вимірювання лінійних розмірів, що використовуються для класифікації, головним чином визначається розмірами пікселя мікроскопа.

2. Оцінено точність вимірювання концентрації мікропланктону різних

класифікаційних груп з використанням штучної нейронної мережі в якості класифікатора. Отримані значення невизначеностей і похибок вказують на придатність використання розробленого пристрою для експрес-аналізу поверхневих вод.

3. Виконано випробування розробленого пристрою впродовж 9 місяців на озері Басів Кут в межах міста Рівне. Значна концентрація водоростей *Pediastrum* і *Coelastrum microporum* та порівняно мала частка діатомових водоростей свідчать про забруднення водойми органічними речовинами.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача – розширення функціональних можливостей та значне зменшення тривалості вимірювання засобів вимірювань концентрації організмів мікропланктону в відкритих водоймах. Головні результати і висновки по роботі:

1. Проаналізовано відомі методи і пристрої вимірювання концентрації організмів мікропланктону та біологічних показників якості вод, що використовуються для оцінки екологічного стану водойм, виявлення надходження забурдників у воду та встановлено, що необхідно здійснювати вимірювання в неперервному режимі безпосередньо на об'єкті вимірювання.

2. Створено новий метод вимірювання концентрації окремих груп мікропланктону. Він полягає у отриманні відеопотоку із зображенням мікроорганізмів у проточній оптично прозорій комірці, алгоритмічній обробці отриманого відео та класифікації мікроорганізмів за допомогою нечіткої логіки.

3. Вперше в якості параметрів для класифікації використовуються швидкість руху мікроорганізму та швидкість зміни довжини, що забезпечується у розробленому пристрої шляхом автоматичного регулювання швидкості потоку води в вимірювальній комірці.

4. Розроблено і застосовано штучні нейронні мережі для підвищення точності неперервного визначення концентрації мікроорганізмів, що дозволило зменшити похибку розпізнавання до 8% для 10 класифікаційних груп мікроорганізмів.

5. Проаналізовано процес вимірювання концентрації організмів мікропланктону й визначено, що при вимірюванні виникають невизначеності, які суттєво впливають на точність класифікації організмів мікропланктону. Серед невизначеностей визначальними є невизначеність

класифікації та невизначеність, пов'язана з дискретизацією кадру цифрового відеопотоку. Вони визначають максимальну точність вимірювання.

6. Розроблено пристрій для автоматичного неперервного вимірювання концентрації мікропланктону у відкритих водоймах. Цей портативний пристрій має розширені функціональні можливості, підвищену швидкість вимірювань у порівнянні із іншими відомими засобами вимірювань і дозволяє здійснювати визначення концентрації за 30 секунд процесу вимірювання.

Наукові та практичні результати впроваджено в каналізаційні очисні споруди на базі фітотехнології глибокого біологічного очищення води, що дало можливість більш оперативно контролювати процес очищення, а також у навчальний процес кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисципліни «Інтелектуальні системи управління» при підготовці магістрів за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Результати дисертації можуть бути використані в різних галузях господарства України, зокрема для створення автоматизованої системи моніторингу екологічного стану рік та відкритих водойм, а також в рибному господарстві, водопостачанні тощо.

Подальші дослідження можливі у напрямках розпізнавання деталей внутрішньої будови мікроорганізмів як для підвищення точності класифікації мікропланктону, так і для оцінки забруднень, які ще не спричинили істотної зміни концентрації організмів, але призвели до видимих змін у будові.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Реут Д. Т. Вимірювання концентрації мікропланктону в поверхневих водах з відслідковуванням у відеопотоці / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – №3,4. – С.261-264.
2. Реут Д. Т. Застосування порогового фільтра для визначення кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д. Т. Реут // Науково-технічний журнал “Методи і прилади контролю якості”. – 2013. – № 2 (31). – С.36-40.
3. Д. Т. Реут. Підвищення точності неперервного вимірювання концентрації мікропланктону / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – №3,4. – С.237-240.
4. Реут Д. Т. Пристрій визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Науково-технічний журнал “Методи і прилади контролю якості”. – 2016. – № 2 (37). – С. 38-43.
5. Реут Д.Т., Древецький В.В. Підвищення точності розпізнавання колоніальних і багатоклітинних організмів мікропланктону за допомогою комп'ютерного зору. Вісник Інженерної академії України. – 2018. – № 1. – С. 193-196.
6. Реут Д. Т. Використання нейронних мереж при вимірюванні концентрації організмів мікропланктону у неперервному потоці води / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – № 4. – С. 96-99.
7. Reut D. Device for determining biological indicators of surface water quality / D. Reut // Magyar Tudományos Journal. – 2017. – №9. – С. 26-31.
8. Патент України на винахід №112807, МПК G01N 21/85, G01N 33/18. Автоматичний проточний аналізатор складу мікропланктону / Д.Т. Реут. Заявник та власник Реут Д.Т. – № а201501213; заявл. 13.02.2015; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20.

9. Патент України на корисну модель №138448, МПК G01N 21/85 (2006.01). Спосіб вимірювання швидкостей рідин з тонкодисперсними домішками / Д.Т. Реут, В.В. Древецький. Заявник та власник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201905737; заявл. 27.05.2019 ; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.

10. Реут Д.Т. Вимірювання концентрації планктону в поверхневих водах за допомогою розпізнавання образів / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Сборник тезисов докладов Первой Всеукраинской научно-технической конференции “Современные тенденции развития приборостроения” [Електронний ресурс], 19-20 ноября 2012 г., г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Даля. – 2012. – С. 252-253.

11. Реут Д. Т. Використання комп'ютерного зору для оцінки кількості мікропланктону в поверхневих водах / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів”, 22-23 лютого 2013 р., м. Рівне. – Рівне: НУВГП, 2013. – С. 152.

12. Реут Д.Т. Автоматичне налаштування порогового фільтра при визначенні кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д.Т. Реут // Збірник тез доповідей четвертої науково-практичної конференції “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”, 26-27 листопада 2013 р., м. Івано-Франківськ, ФЕІІВТ, ІФНТУНГ. – 2013. – С. 152-153.

13. Реут Д.Т. Перспективи комп'ютерного зору в біологічному моніторингу / Д.Т. Реут // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Стратегічні рішення інформаційного розвитку економіки, суспільства та бізнесу», 11-15 лютого 2014 р., м. Рівне. – Рівне: НУВГП, 2014. – С. 152.

14. Реут Д.Т. Застосування комп'ютерного зору для контролю ефективності очисних споруд/ Д.Т. Реут // Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології: Матеріали Першої міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів; Київ, НТУУ “КПІ”, 16-17 квітня 2014 р. – К.: НТУУ “КПІ”, 2014. – С. 91-92.

15. Реут Д.Т. Використання комп'ютерного зору при керуванні швидкістю потоку води в полі зору мікроскопа. / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси. Сьома міжнародна науково-практична конференція 19-20 травня 2014 року, Київ, Україна. – К.: НАУ, 2014. – С. 238-239.

16. Реут Д.Т. Використання нечіткої логіки для класифікації мікроорганізмів при контролі якості вод / Д.Т. Реут // Матеріали міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів", 19-22 лютого 2015 р., м. Рівне. – Рівне: РДГУ, 2015. – С. 140.

17. Реут Д. Т. Використання нечіткої логіки при вимірюванні концентрації мікропланктону / Д. Т. Реут, В. В. Древецький // Збірник тез Восьмої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 18-19 травня 2015 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2015. – С. 152.

18. Реут Д.Т. Автоматичне налаштування порогового фільтра при визначенні кількості мікроорганізмів у воді за допомогою комп'ютерного зору / Д.Т. Реут // Збірник тез доповідей 5-ої науково-практичної конференції “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”, 24-25 листопада 2015 р., м. Івано-Франківськ, ФЕіІВТ, ІФНТУНГ. – 2015. – С. 168.

19. Реут Д. Т. Перспективи використання пристроїв автоматичної ідентифікації мікроорганізмів у екологічному моніторингу / Д. Т. Реут // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню води, 22 березня 2016 р., м. Київ. – Київ: Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2016. – С. 112.

20. Реут Д. Т. Пристрій визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Збірник тез Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 17-18 травня 2016 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2016. – С. 175.
21. Реут Д. Т. Підвищення точності пристрою визначення біологічних показників якості поверхневих вод / Д.Т. Реут, В.В. Древецький // Збірник тез Десятої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси", 16-17 травня 2017 р., м. Київ. – Київ: НАУ, 2017. – С. 127.
22. Реут Д.Т., Древецький В.В. Підвищення точності розпізнавання колоніальних і багатоклітинних організмів мікропланктону за допомогою комп'ютерного зору. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018). Одинадцята міжнародна науково-практична конференція 22-23 травня 2018 року, Київ, Україна (збірка тез). – К.: НАУ, 2018. С. 251-252.
23. Клименко М. О. Моніторинг довкілля: Підручник / М. О. Клименко, А. М. Прищеп, Н. М. Вознюк. – Київ: Видавничий центр «Академія», 2006. – 360 с.
24. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод: Постанова Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-poryadku-zdijsnennya-derzhavnogo-monitoringu-vod> (дата звернення: 29.01.2020).
25. Мальцев В. І. Визначення якості води методами біоіндикації: науково-методичний посібник / В. І. Мальцев, Г.О. Карпова, Л. М. Зуб – Київ: Науковий центр екомоніторингу та біорізноманіття мегаполісу НАН Україна, Недержавна наукова установа Інститут екології Національного екологічного центру України, 2011. – 112 с.
26. Удод В.М. Екологічні критерії оцінки якості води гідроекосистем

на при кладі водозбірного басейну р. Прут / В.М. Удод, В.В. Трофімович, М.Ю. Яців // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. пр. – Київ, 2010. – Вип. 5. – С. 84-93.

27. Романенко В.Д. Методологические предпосылки для установления и использования экологических нормативов качества поверхностных вод / В.Д. Романенко, В.Н. Жукинский, О.П. Окслюк.// Гидробиологический журнал, Т. 35, № 3, 1999. – С. 3-14.

28. Єфремова, О. О. Основи гідрології та охорона поверхневих вод: підручник / О. О. Єфремова, О. М. Коржик, В. В. Рибак. – Львів: Новий Світ–2000, 2014. – 140 с.

29. Наблюдение рек: пособие для проведения экологического мониторинга. – СПб.: Друзья Балтики / Коалиция Чистая Балтика, 2015. – 32 с.

30. Юрасов С. М. Оцінка якості природних вод. / С. М. Юрасов, Т. А. Сафранов, А. В. Чугай. – Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2011. – 164 с.

31. Жемеров О. О. Оцінка якості поверхневих вод суші / О. О. Жемеров, В. Г. Доц: Методичний посібник для студентів-географів вищих навчальних закладів. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2011. – 48 с.

32. Боярин М. В. Б 86 Основи гідроекології: теорія й практика: навч. посіб. / М. В. Боярин, І. М. Нетробчук. – Луцьк: Вежа-Друк, 2016. – 365 с.

33. Гриб О.М. Антропогенний вплив на водні екосистеми / О.М. Гриб. – Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2018. – 194 с.

34. Хільчевський В. К. Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона: навч. посібник / В. К. Хільчевський, М. Р. Забокрицька, Р. Л. Кравчинський, О. В. Чунар'єв / за ред. В. К. Хільчевського – К.: ВПЦ "Київський університет", 2015. – 172 с.

35. Omori M. Methods in Marine Zooplankton Ecology / M. Omori, T. Ikeda. – Malabar, USA: Krieger Publishing Company, 1992. – 332 с.

36. ДСТУ ISO 5667-2:2003 Якість води. Відбирання проб. Частина 2. Настанови щодо методів відбирання проб. – Київ: Держспоживстандарт України, 2004. – 14 с.
37. ДСТУ ISO 5667-3-2001 Якість води. Відбирання проб. Частина 3. Настанови щодо зберігання та поводження з пробами. – Київ: Держспоживстандарт України, 2002. – 38 с.
38. ДСТУ ISO 5667-14:2005 Якість води. Відбирання проб. Частина 14. Настанови щодо забезпечення якості відбирання та оброблення проб природних вод. – Київ: Держспоживстандарт України, 2002. – 22 с.
39. Патент на винахід № 88673 Україна, МПК C02F 3/00 (2009). Спосіб ідентифікації фітопланктонних водоростей у пробах води з водних об'єктів / Е. А. Аристархова, Т. О. Єльнікова, Ю. О. Подчашинський. Заявник та власник Житомирський державний технологічний університет. – № а200709275; заявл. 14.08.2007; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.
40. Ishikawa K. Application of autonomous underwater vehicle and image analysis for detecting the three-dimensional distribution of freshwater red tide *Uroglena americana* (Chrysophyceae) / K. Ishikawa, M. Kumagai, R. F. Walker // *Journal of Plankton Research* (Oxford Journals). – 2005. – № 27 (1). – С. 129-134.
41. Патент на винахід № 2347224 Російська Федерація, МПК G01N 33/49 (2006.01), G01N 21/01 (2006.01). Сканирующий проточный цитометр / В. П. Мальцев, К. А. Семьянов, П. А. Тарасов. Заявники та власники Інститут химической кинетики и горения СО РАН, ООО «Цитонова». – № 2007101151/15; заявл. 10.01.2007; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5.
42. CytoBuoy flow cytometry solutions: сайт. URL: <https://www.cytobuoy.com/> (дата звернення 29.01.2020)
43. Патент на корисну модель № 74380 Україна, МПК G01N 21/21 (2006.01). Пристрій для контролю концентрацій частинок у полідисперсних водних середовищах / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський,

О. Є. Кватернюк, О. О. Цвенько. Заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u201204439; заявл. 09.04.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

44. Патент № US6005964А Сполучені Штати Америки, МПК G01N15/14, G06T7/00. Automatic machine vision microscope slide inspection system and method / J. F. Reid, J. O'Brien. Заявник і власник Board Of Trustees Of The University Of Illinois. – № US08/592,721; заявл. 24.01.1996; опубл. 21.12.1999.

45. Патент № US6122396А Сполучені Штати Америки, МПК C12M41/48. Method of and apparatus for automating detection of microorganisms / C. F. King, R. A. Hallowitz. Заявник і власник Bio-Tech Imaging Inc. – № US09/376,052; заявл. 16.12.1996; опубл. 19.09.2000.

46. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 928 с.

47. Лукьяница А. А. Цифровая обработка видеоизображений / А. А. Лукьяница, А. Г. Шишкин. – М.: «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. – 518 с.

48. Е. С. Борисов. О задаче поиска объекта на изображении. Часть 2: Применение методов машинного обучения. URL: <http://mechanoid.kiev.ua/cv-image-detector2.html> (дата звернення: 29.01.2020).

49. Аристархова Е.О. Визначення та математичне моделювання показників розвитку водоростей у водосховищах на основі цифрової обробки відеозображень Е.О. Аристархова, Ю.О. Подчашинський, Т.О. Шавурська (Єльнікова) // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – №2 (33). – Житомир, 2005. – С. 101-107.

50. Клименко М.О. Гідроекологія: підручник / М.О. Клименко, Ю.В. Пилипенко, Ю.Р. Гроховська, О.В. Лянзберг, О.О. Бедункова. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – 272 с.

51. Amoeba proteus - Microworld - world of amoeboid organisms. URL: <https://www.arcella.nl/amoeba-proteus/> (дата звернення: 29.01.2020).

52. Green algae Chlorella vulgaris - The database of useful biological numbers. URL: <https://bionumbers.hms.harvard.edu/bionumber.aspx?id=101481&ver=7> (дата звернення: 29.01.2020).

53. Görs M. The potential of ergosterol as chemotaxonomic marker to differentiate between “Chlorella” species (Chlorophyta). M. Görs, R. Schumann, L. Gustavs, U. Karsten // Journal of Phycology, 2010. – №46(6). – с. 1296-1300. Також доступний за DOI: 10.1111/j.1529-8817.2010.00920.x.

54. Coelastrum microporum Nägeli in A. Braun | Nordic Microalgae. URL: <http://nordicmicroalgae.org/taxon/Coelastrum%20microporum> (дата звернення: 29.01.2020).

55. Coelastrum Nägeli, 1849 :: AlgaeBase. URL: https://www.algaebase.org/search/genus/detail/?tc=accept&genus_id=43467&-session=abv4:AC1F24C8081602047CJOE228EE0A (дата звернення: 29.01.2020).

56. WoRMS - World Register of Marine Species - Cyclops varius Lilljeborg, 1901. URL: <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=350632> (дата звернення: 29.01.2020).

57. Protist Images: Euglenida: Euglena viridis. URL: http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/mastigophora/euglena/viridis/viridis_10.html (дата звернення: 29.01.2020).

58. Голлербах М. М. Определитель пресноводных водорослей СССР. Эвгленовые водоросли / М. М. Голлербах, В. И. Полянский, В. П. Савич. – М.: Государственное издательство «Советская наука», 1955. – 282 с.

59. Protist Images: Paramecium caudatum. URL: http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/Ciliophora/Paramecium/caudatum/intactcells/sp_04.html (дата звернення: 29.01.2020).

60. Protist Images: Pediastrum simplex. URL:

<http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/Chlorophyta/Pediastrum/simplex/simplex4с.html> (дата звернення: 29.01.2020).

61. *Pediastrum duplex* Meyen 1829 :: Algaebase. URL: https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=27511 (дата звернення: 29.01.2020).

62. *Trachelomonas* Morphology. URL: <https://www.nies.go.jp/chiiki1/protoz/morpho/flagella/trac-nas.htm#Trachelomonas%20volvocina> (дата звернення: 29.01.2020).

63. Poniewozik M. Element composition of trachelomonas envelopes (euglenophyta) / M. Poniewozik // Polish Botanical Journal, 2017. – №62(1). – с. 77-85. Також доступний за DOI: 10.1515/pbj-2017-0007.

64. Protist Images: *Ulothrix zonata*. URL: http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB/Images/Chlorophyta/Ulothrix/zonata_3.html (дата звернення: 29.01.2020).

65. Мошкова Н. А. Определитель пресноводных водорослей СССР. Зеленые водоросли. Класс Улотриксые / Н. А. Мошкова, М. М. Голлербах. – Ленинград: Издательство «Наука», 1986. – 360 с.

66. Canny J., A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. – Vol. 8, №6. – с. 679–698.

67. Sobel I. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing / I. Sobel, G. Feldman // Pattern Classification and Scene Analysis, 1973. – с. 271-272.

68. Shankar P. Performance Analysis of Different Feed Forward Networks in Non-Linear Classification / Poorna Shankar // International Journal of Soft Computing and Engineering, 2013. – Volume 3, Issue 2. – с. 332-337.

69. Multilayer Shallow Neural Network Architecture - MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/multilayer-neural-network-architecture.html> (дата звернення: 29.01.2020).

70. Хижняк М.І. Методологія вивчення угруповань водних організмів [Навчальний посібник] / М. І. Хижняк, М. Ю. Євтушенко. – Київ: Український фітосоціологічний центр, 2014. – 269 с.

71. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування Руководства по выражению неопределенности измерений (РМГ 43-2001, IDT). – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 28 с.

72. Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results. EUROLAB Technical Report 1/2006, 2006. – 49 с.

73. Слізков А. М. Оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних вимірювань / А. М. Слізков, Л. А. Дмитренко // Вісник Хмельницького національного університету, 2012. – №2. – с. 219-224.

74. EA-4/02 M:2013 Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні. URL: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2015/06/EA-4_02.pdf (дата звернення: 29.01.2020).

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1. Ваги першого шару нейронної мережі для класифікації мікропланктону

Довж.	шир.	відн. шир.	Декв	Кв	Кз	компак.	Рсл	Н	S	V	швид-кість	шв. зміни довж.	багатокл.
-1,322	0,147	0,310	-1,406	-0,511	0,315	-0,724	-0,709	-0,543	0,857	-0,453	1,382	0,299	0,742
-0,750	-0,268	-0,735	-0,976	-0,971	0,372	-1,247	-0,214	-0,134	-0,379	1,098	-0,804	0,186	2,258
0,536	0,707	-0,395	1,018	1,227	2,010	0,761	-0,552	0,290	-0,091	-0,188	0,138	-0,639	-0,707
0,478	0,495	-0,102	0,605	-0,259	0,902	0,298	0,028	-0,148	0,630	0,555	0,621	-0,236	0,569
-0,368	0,008	0,303	0,170	1,452	-0,093	0,449	0,293	0,066	-0,223	-0,001	1,640	0,020	0,477
0,262	-0,435	-1,317	-0,704	0,157	-0,446	0,211	-0,252	-2,019	0,355	-1,203	-1,323	-0,595	1,663
-0,672	0,041	-0,152	0,397	-0,141	1,084	-0,747	0,122	-0,523	-0,722	0,248	-0,443	-0,389	-0,277
0,487	2,371	-1,836	2,614	-2,051	-0,593	0,135	-0,519	-1,755	0,365	-0,342	-0,902	-2,807	1,986
1,107	-0,157	-1,842	0,733	-0,343	0,514	0,297	1,916	-0,448	-2,269	0,547	0,054	1,783	-2,183
2,422	0,446	-3,227	1,070	-1,860	-1,463	-0,222	0,265	-0,792	0,413	-2,194	-0,156	-2,609	0,092
0,386	0,419	0,335	-0,527	-1,017	0,031	2,398	0,638	0,022	1,149	0,217	1,034	0,273	-0,444
-0,250	-0,203	0,079	0,238	-1,038	0,527	0,017	1,788	-0,738	1,054	0,890	-0,235	-0,778	-0,559
2,081	0,891	-2,633	0,858	-0,376	-1,707	-0,397	-1,243	-0,188	-0,649	0,130	-0,062	0,844	2,323
-0,886	-1,233	-1,092	-1,715	1,304	-0,496	-1,544	-0,320	0,062	-0,342	-1,655	-0,516	1,613	0,057
0,686	0,132	0,022	0,374	-1,267	-0,827	1,176	1,403	-0,593	-0,752	-0,089	1,300	-0,533	0,323
1,844	0,856	-0,460	0,605	-1,320	0,138	1,860	0,192	0,408	0,456	-0,231	1,219	1,431	0,877
-1,036	0,513	0,500	0,330	0,196	1,017	-0,822	-0,608	0,139	-0,295	1,183	-0,784	-1,106	-1,188
1,275	1,260	-0,403	-0,130	0,067	0,510	0,637	1,460	0,084	0,486	-0,543	0,513	-0,137	0,376
-1,552	-0,310	-0,689	-2,177	-0,101	-1,506	-0,814	-1,281	0,279	0,248	0,300	2,698	0,547	2,378
0,250	-0,260	0,057	0,188	2,253	1,412	-0,732	1,845	-1,480	-0,023	-0,571	-0,817	-0,815	1,149
1,079	0,180	-0,996	0,546	-0,288	0,509	1,521	-0,011	1,492	1,695	0,743	-0,613	-0,318	-1,144
0,488	-0,042	-1,571	1,029	-0,303	-1,925	0,417	2,358	0,984	-0,493	1,395	-1,062	-0,268	3,014
-0,855	-0,066	-0,064	-0,917	1,209	0,845	-2,150	1,025	-1,150	-0,113	-0,437	-1,026	0,007	-1,208
-1,631	-0,848	-0,439	-0,439	0,507	0,890	-1,916	-0,310	-1,851	0,748	0,033	-1,478	1,024	1,074
-0,929	-1,830	-0,536	-1,301	0,640	0,268	-1,613	0,192	-0,577	-1,648	2,358	0,180	-2,780	0,317
0,374	-1,260	-1,607	-1,502	0,351	-1,723	0,457	-2,665	-0,107	-0,681	0,805	0,438	1,836	-0,647
-0,659	-1,203	-3,078	-1,636	0,657	-0,072	-2,612	-1,383	0,519	-2,011	-0,832	-0,473	-0,905	-2,431
0,260	-0,538	-1,556	0,139	1,294	-1,388	0,269	-0,946	0,839	0,441	-1,145	0,594	2,009	-0,300
1,188	0,805	-1,195	0,893	-0,813	-1,263	-0,385	-0,557	0,928	-0,690	-0,316	0,591	0,412	2,870
1,829	1,062	-2,156	0,807	-0,286	-2,149	-0,094	-0,625	0,709	1,946	-0,703	-0,146	0,659	2,316
0,838	1,009	1,054	0,545	-1,400	0,627	1,273	0,926	0,811	0,678	-0,028	2,435	0,492	1,617
-0,056	-0,839	1,523	-1,285	3,147	1,980	-0,659	0,745	0,849	-0,513	-1,168	0,307	-2,370	-1,358
-1,697	-0,667	1,571	-1,409	-0,133	0,141	-1,329	1,128	-1,021	0,156	-1,936	-2,182	-2,546	0,624
-1,379	-0,754	1,387	-2,138	0,305	1,290	0,307	-0,629	0,200	1,338	0,914	-0,034	-0,488	-2,529
-1,467	-0,323	1,639	-0,681	0,944	1,264	-1,411	-0,898	-1,115	-0,658	0,081	-0,058	-0,401	-2,505
-0,166	0,193	0,704	-0,247	0,273	1,978	-0,369	1,626	-0,320	2,289	-1,497	-1,116	1,605	-1,418
1,555	-0,264	-3,374	0,595	-1,553	-1,642	0,789	-3,049	-0,870	-0,362	2,422	-1,913	0,152	-1,520
-0,204	-0,395	2,072	-0,571	-0,371	0,101	1,175	0,186	-1,932	-1,397	1,711	-0,575	-1,850	-1,020
-1,487	1,055	-0,709	1,450	1,363	2,165	-0,913	-0,814	-0,887	0,434	2,166	-2,076	2,453	1,788
0,365	-0,386	-1,072	0,533	-0,886	-0,745	0,588	-1,188	1,900	-2,394	2,541	-0,593	-2,049	1,651
1,383	1,727	0,388	2,225	-1,468	0,783	0,840	1,696	-0,012	-2,085	0,361	-0,979	-0,228	-0,925
2,284	1,572	-2,869	1,331	-1,278	-0,094	0,679	1,727	0,290	-0,992	-0,540	1,782	-0,709	1,590
1,719	1,677	-0,506	1,946	0,391	0,233	-0,501	0,103	0,227	-2,073	0,805	1,981	-0,210	0,149
0,211	1,306	1,739	0,125	-2,247	-0,190	1,955	0,588	-0,173	-0,884	-2,040	1,282	-1,388	-1,244
1,658	0,478	-0,857	0,731	0,517	0,109	0,110	-2,577	-0,564	0,548	0,155	2,481	1,570	-0,967
-1,748	-0,899	-0,340	-0,486	1,011	0,603	-1,148	-0,089	-1,854	-2,593	0,964	-0,821	-0,932	-3,146

1,285	0,405	-1,154	-0,130	-1,218	-1,107	2,541	-0,410	0,995	-0,035	0,654	2,232	-0,160	0,189
0,170	-0,049	-0,756	0,119	-0,690	-0,878	-0,267	-0,403	-1,629	1,910	-1,465	0,846	0,209	3,770
0,582	-0,597	0,206	-0,907	0,527	1,615	-1,482	0,105	0,358	-0,867	0,500	-1,567	-1,494	-1,000
1,214	-0,346	-2,490	1,024	2,267	-0,107	0,232	-1,162	1,649	-3,269	1,249	0,052	2,688	0,669
0,905	0,752	-0,841	1,432	-2,258	-2,221	1,835	-1,817	0,842	1,269	-0,219	0,254	-0,239	2,201
-2,586	-2,943	1,559	-2,385	1,746	1,064	-1,298	3,137	-0,386	2,394	-2,107	-1,317	-2,173	-2,178
0,611	1,626	-2,327	1,098	-0,152	-1,386	1,241	0,509	0,076	-0,830	-0,950	0,301	2,761	-0,228
0,550	-0,710	-2,094	0,611	-1,313	-2,363	-0,627	1,035	-0,840	-0,239	1,926	0,466	-1,186	3,253
2,787	1,711	-2,590	3,033	-0,865	-2,603	0,273	-1,911	-0,174	-2,234	-0,347	3,042	3,271	-2,323
0,526	0,709	-1,641	0,460	-1,027	-1,751	1,269	0,423	1,121	-0,035	0,868	0,365	1,155	-0,389
1,729	1,770	1,324	0,730	-0,252	0,287	-0,318	2,542	0,920	-0,241	-2,578	0,163	1,232	4,706
-1,290	-2,471	1,708	-1,360	1,492	1,902	-2,024	1,783	0,952	-0,700	2,089	-2,873	-1,656	1,386
0,532	-1,182	-0,520	0,299	2,769	-0,440	-0,610	-0,728	-0,726	1,563	0,872	-1,136	-0,226	0,833
-2,191	-1,666	1,260	-1,906	1,091	1,272	-1,545	0,606	-1,889	0,173	0,094	-3,425	-0,412	3,344
1,450	0,715	-1,184	-0,257	1,217	-1,274	0,724	-0,814	0,726	0,844	-1,071	1,368	0,775	-0,208
-1,709	-0,455	0,060	-2,314	-0,517	0,131	-0,623	-0,646	-0,400	0,746	0,123	0,506	-1,332	0,290
1,391	2,563	1,280	2,055	0,163	0,497	1,286	1,529	2,887	-0,126	0,638	1,724	0,283	1,468
-1,514	-0,359	1,265	-1,296	-0,463	0,052	1,700	0,278	-0,741	3,183	0,011	0,867	-1,759	1,599
0,043	0,353	-2,108	-0,118	0,215	-0,592	0,958	0,008	0,621	0,645	0,741	0,434	-0,059	0,783
0,594	-0,852	-1,484	-1,549	0,021	-0,325	-0,436	-0,179	-0,518	0,785	0,910	-0,689	0,862	0,542
1,615	1,381	-0,040	1,280	-1,786	-2,585	1,954	-1,403	-0,287	-1,452	0,656	0,364	0,537	2,529
-1,445	-1,210	-1,077	-1,654	1,381	-1,064	-2,377	-0,965	-0,867	0,480	1,712	-2,282	0,028	-2,074
0,644	-0,506	-4,360	-1,060	1,570	-0,530	-0,615	-1,827	0,113	-0,321	0,770	-0,901	0,873	-0,643
1,190	1,377	-0,108	0,916	-1,314	-0,439	0,012	-0,785	1,180	0,456	1,229	0,788	1,110	-0,768
-0,267	0,219	0,551	-0,312	0,716	-0,057	0,959	1,136	0,718	-0,044	-0,605	1,989	0,324	-0,772
-0,540	1,003	-0,126	0,492	-0,833	-1,069	2,022	0,014	0,574	0,838	-0,651	0,418	-0,310	1,130
-1,002	-0,682	-0,256	-1,743	1,981	1,672	-0,094	-0,403	0,198	0,021	-1,607	0,572	0,302	-3,179
-1,292	-1,501	1,072	0,349	0,771	0,845	-1,049	2,673	-1,118	-1,056	-0,403	1,523	-1,580	-2,125
0,356	0,293	0,696	-0,698	-1,264	-0,339	1,002	-2,335	-0,499	0,418	-0,247	0,949	2,975	-2,753
1,744	1,262	-0,402	1,119	0,797	-0,985	-0,124	-0,464	-0,065	0,697	0,116	2,520	2,217	2,628
1,317	-0,553	-1,019	-0,235	-1,416	-1,368	2,329	2,752	0,758	2,261	0,865	-2,250	-0,455	3,299
0,140	0,207	-0,361	-0,604	-3,149	-1,865	1,749	-2,899	1,167	-0,871	1,938	0,981	1,589	0,318
0,210	-0,722	0,309	0,427	-0,752	0,665	-0,980	0,618	0,625	-0,577	2,054	-0,986	-0,066	-1,658
0,167	-0,416	0,355	-0,742	1,960	0,710	-0,316	-1,127	0,910	0,900	0,409	-2,198	0,150	1,114
0,327	-0,435	-1,158	0,544	-0,908	0,237	1,189	-0,458	0,611	0,591	-0,330	1,038	0,686	0,935
-1,058	-1,490	-0,129	-0,189	0,526	-1,247	-2,100	0,133	-0,163	0,209	0,729	-0,555	-1,641	0,240
0,761	-0,544	-1,045	-0,162	-1,502	-0,735	0,996	-0,316	0,295	0,899	0,060	0,782	-0,573	1,401
-1,977	-0,438	1,979	-1,833	-0,749	1,226	-0,058	-1,212	-0,261	0,363	2,024	-0,472	-1,332	-2,227
-0,806	-2,044	-0,922	-1,608	0,963	-0,678	-1,521	0,508	-2,871	0,622	-0,590	0,384	0,813	1,010
-0,278	-0,045	0,332	-0,169	-0,308	-1,065	-1,808	0,662	-1,412	-0,475	-2,019	-1,836	-0,737	1,518
-1,122	0,253	1,017	-1,560	-0,530	0,452	-1,771	-2,647	-0,925	1,611	-1,728	-1,280	0,749	-0,951
-0,748	1,419	1,706	-0,006	-1,546	2,035	-0,593	-0,801	1,071	-0,001	1,632	0,892	-1,562	-1,232
1,174	1,150	-2,243	-0,246	-3,217	-2,652	3,085	-0,437	1,122	2,869	-0,396	5,159	1,811	2,896
0,600	-0,981	-0,366	-0,448	1,444	1,569	-0,643	1,206	-0,863	0,856	-0,446	-0,423	-1,658	1,969
-0,647	0,284	-0,453	0,337	0,700	-0,241	0,437	0,054	0,638	-0,316	-0,333	0,881	-0,727	0,468
1,107	1,404	0,008	0,975	-1,943	-0,006	1,676	-1,515	0,914	0,674	-0,905	0,729	1,757	1,407
1,097	0,492	-1,732	-0,751	0,536	0,703	0,467	-3,674	1,894	-0,380	1,638	-0,460	1,828	-0,569
0,001	0,700	-3,493	-0,428	0,436	-0,816	0,075	3,081	-0,534	-0,885	1,301	0,351	-3,229	-2,224
-0,890	-0,055	2,710	-1,705	2,127	2,232	-1,221	2,870	-2,303	0,300	0,690	-0,475	0,408	-0,701

Таблиця А.2. Зміщення першого шару нейронної мережі для класифікації мікропланктону

Номер нейрона	Зміщення	Номер нейрона	Зміщення	Номер нейрона	Зміщення
---------------	----------	---------------	----------	---------------	----------

1	-2,00088	33	0,495998	65	0,841253
2	-2,05375	34	0,735254	66	-0,71246
3	1,858323	35	-0,40182	67	-0,83623
4	1,761257	36	0,403523	68	-0,94679
5	-1,91272	37	0,382212	69	0,957046
6	-1,91812	38	0,447744	70	0,972098
7	-1,69169	39	-0,50902	71	0,940102
8	1,689417	40	-0,22202	72	-1,03256
9	-1,68361	41	0,367774	73	1,006506
10	1,614485	42	0,255408	74	-1,11492
11	1,710071	43	0,301774	75	-1,38063
12	1,503572	44	0,050961	76	1,120813
13	-1,51851	45	-0,18201	77	-1,20247
14	1,443428	46	-0,23043	78	-1,27239
15	0,921042	47	0,079436	79	-1,32587
16	-1,41669	48	0,162605	80	-1,30116
17	1,203803	49	0,044435	81	1,553381
18	-1,45965	50	0,076182	82	-1,106
19	-1,16207	51	0,227793	83	1,626166
20	-1,09903	52	-0,32569	84	-1,43086
21	-1,36405	53	-0,1881	85	-1,46857
22	1,081424	54	0,143085	86	1,815173
23	-1,06498	55	-0,07405	87	1,71774
24	-0,99405	56	0,206133	88	-1,59243
25	0,91351	57	-0,2859	89	1,832341
26	-0,70336	58	0,493856	90	1,803899
27	-0,99837	59	0,334756	91	-1,89892
28	-0,97983	60	-0,44692	92	-1,92711
29	-0,66378	61	-0,72801	93	-1,76836
30	0,693629	62	-0,52815	94	-1,95698
31	0,739401	63	0,394895	95	2,145399
32	0,565588	64	-1,0136		

Таблиця А.3. Ваги другого шару нейронної мережі для класифікації мікропланктону

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-4,78E-05	0,057864	-0,07873	0,530844	0,636214	0,273409	-0,0324	-0,15238	0,263606	-0,80255
0,331991	0,083915	0,393392	-0,08155	-0,35122	0,399053	0,171533	0,10951	-0,06744	-0,00814
0,587937	0,154239	0,321919	0,06923	0,066337	0,081779	-0,17832	-0,26894	-0,08298	-0,02958
-0,08113	-0,12316	-0,30573	-0,39193	0,173361	0,106976	0,086077	-0,11538	0,332882	-0,53582
0,046358	0,017182	-0,5555	-0,22794	0,010453	-0,11874	-0,1064	-0,00661	-0,11568	-0,41542
0,16733	0,253792	0,020403	0,269503	-0,0289	0,100624	-0,22733	-0,00832	0,23687	-0,05259
-0,13766	0,205706	-0,32845	0,071816	0,44124	-0,16922	0,00553	-0,35015	-0,22501	0,048258
0,022666	-0,09193	0,287222	0,384346	-0,52461	0,106025	-0,01413	-0,19101	-0,21104	0,635363
-0,52231	0,222647	-0,37917	-0,16424	0,199995	0,382832	0,023546	-0,23005	0,096122	0,455496
-0,17277	0,26787	0,21733	-0,26496	-0,1921	-0,04984	-0,06529	-0,08647	0,442597	0,017531

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,14173	-0,2419	-0,47692	0,082824	1,076324	0,215567	-0,23853	0,134794	-0,10159	0,10775
-0,1315	0,405657	-0,67245	-0,24442	0,076374	-0,48269	0,243118	-0,06482	0,25033	-0,1767
-0,09363	0,197282	0,268975	-0,19437	-0,34873	0,675977	0,317673	0,315236	-0,44864	-0,28771
-0,11428	0,193705	-0,28129	-0,26804	-0,20332	0,389304	0,097609	0,217094	0,453831	0,41672
-0,03522	-0,01057	0,679165	-0,09017	0,519482	0,057064	-0,04183	0,120219	0,01408	0,168265
0,223135	-0,18832	0,292448	-0,02542	-0,24985	0,245339	-0,22325	0,190186	0,687279	-0,35253
-0,3678	0,434039	-0,30658	-0,04509	0,173936	-0,00841	-0,46113	-0,19411	0,08749	-0,15422
0,183817	0,470786	0,33229	0,01001	-0,05512	-0,2981	0,13054	-0,16305	-0,40151	0,238389
-0,19597	-0,16235	-0,11934	-0,61409	-0,24006	-0,10341	-0,23452	0,250579	-0,02874	-0,07837
0,069851	-0,4316	-0,10777	0,183824	0,465707	0,020248	-0,16211	-0,33107	-0,01491	0,187626
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0,272137	-0,48458	0,325735	0,471007	0,07174	-0,28274	0,652834	-0,34197	0,348182	0,199199
0,150526	-0,04812	-0,10252	-0,07037	0,037169	0,36932	-0,19025	0,161361	-0,35813	0,229286
-0,01206	-0,06752	-0,33993	-0,31	-0,15031	0,238717	-0,02167	0,236214	0,312587	0,668835
0,404374	-0,03786	0,604169	-0,04664	-0,04986	0,592464	0,055415	-0,18971	0,345635	0,046701
-0,0568	-0,16579	-0,28172	0,36254	0,08915	0,039633	0,191706	-0,2868	0,15455	-0,06854
0,108431	0,282767	-0,15577	0,075252	-0,18137	-0,54767	0,150168	0,195702	-0,51822	-0,02423
0,025836	0,287375	0,224217	0,046581	-0,1475	0,28863	0,485274	0,322671	-0,16163	0,233479
0,365713	-0,1741	-0,35557	-0,02984	0,169727	-0,62805	-0,17425	0,371995	-0,64702	0,280148
0,108284	0,24326	0,211799	0,319528	0,095836	0,537043	0,182978	-0,06578	-0,20546	-0,49374
0,086184	0,009345	-0,07168	-0,01975	0,112629	-0,00191	0,092684	0,100027	0,312271	-0,3567
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
-0,27493	0,213855	0,029067	0,351155	0,078344	0,143058	0,16144	0,325031	0,137647	-0,55543
-0,20973	0,308388	-0,3452	-0,07213	-0,07694	0,003065	0,512028	-0,18943	-0,07837	0,674962
-0,09759	0,105696	0,212179	0,018403	-0,13787	0,257045	0,194525	-0,49621	0,307275	-0,06452
0,344083	-0,34986	-0,42292	-0,70296	-0,35815	0,101518	-0,20806	0,009252	0,607093	0,009736
0,280707	-0,43282	-0,22647	-0,05802	-0,13204	0,308491	-0,97628	0,265295	0,105049	0,098399
-0,16028	-0,14867	0,270478	-0,0907	0,361372	-0,03439	0,282248	-0,05833	0,087271	-0,00779
0,288166	-0,00316	-0,16506	-0,34236	-0,52404	-0,26632	-0,34406	-0,41131	-0,21456	-0,31986
0,012183	-0,16065	0,370542	0,846376	0,307098	0,072963	0,09169	0,056767	-0,38016	-0,20272
-0,29664	-0,27578	-0,08948	-0,06966	0,296034	-0,59094	-0,16265	0,25177	-0,82542	0,264978
-0,19875	0,256359	-0,11391	-0,09143	-0,10226	0,035873	0,011232	0,153564	0,03644	0,040307
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0,638409	-0,87282	-0,03977	0,422871	-0,2814	-0,61567	0,286563	0,000615	-0,08465	-0,23152
0,068616	0,181289	-0,3869	-0,79103	-0,10544	-0,08202	0,139636	0,508292	0,276236	0,3635
0,363229	0,87993	0,22526	-0,50682	-0,1081	0,178981	0,615755	0,063068	0,239879	0,503715
-0,1466	0,120358	-0,33717	-0,05299	0,253486	-0,10782	-0,15562	-0,20659	-0,44254	0,076019
0,175982	0,128681	0,382472	0,348916	0,1943	-0,1986	0,30089	0,010205	0,176132	-0,23441
-0,10011	-0,09938	0,095706	0,703028	0,163794	-0,42036	-0,21317	-0,07361	-0,13853	0,178809
-0,05767	0,17318	-0,0176	0,112301	-0,26653	0,132282	-0,38301	0,074606	0,456498	0,263503
0,230343	0,135231	-0,21801	-0,09232	-0,73322	0,255042	0,125963	0,234016	-0,29745	-0,34657
0,038332	-0,03188	0,236371	0,452145	0,158473	-0,29249	-0,15605	0,048292	0,13506	-0,04078
0,182462	-0,37404	-0,06875	0,132371	0,404208	0,704348	-0,21307	0,026917	-0,19772	0,184959

51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
-0,36807	0,416691	-0,40058	-0,40228	0,029693	-0,12659	0,059885	0,44753	-0,48337	0,00159
-0,01679	0,104737	-0,11493	0,125439	0,508987	-0,01273	0,910106	0,376872	-0,14748	0,214274
0,083104	-0,11779	-0,41156	0,274987	0,313533	0,029333	-0,35531	0,570189	0,205533	-0,12151
-0,52329	0,5069	-0,11098	-0,12844	0,123868	0,374329	0,138478	0,376889	-0,50165	-0,04724
0,413474	-0,32316	-0,2814	-0,21933	-0,2083	0,105555	0,19433	-0,1094	-0,03854	-0,10623
-0,19287	0,08167	0,012473	-0,12672	-0,50446	0,097883	-0,09799	-0,2504	-0,15284	0,10704
-0,25123	0,078082	-0,17685	-0,152	-0,05417	0,043881	-0,76959	0,299267	0,155324	0,189615
0,585974	-0,07831	-0,22425	0,222831	0,118802	-0,23264	-0,22229	-0,17351	-0,10996	0,125175
-0,06258	-0,22347	0,895254	-0,24495	-0,45753	-0,25607	-0,00617	-0,48289	-0,4516	-0,28661
-0,15109	0,027862	0,149147	-0,00638	0,416305	-0,01646	-0,06231	0,18908	0,395824	0,345124
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
0,186866	0,485335	0,110195	0,808678	-0,11488	0,076457	-0,18527	-0,11092	0,018077	0,225567
-0,63396	-0,39891	-0,17167	0,256423	0,169266	0,0872	0,140902	0,029777	-0,31366	0,419005
0,553768	0,360468	0,190697	-0,1076	-0,00933	-0,39121	0,138147	0,366538	-0,23649	-0,01979
0,422458	-0,282	0,199781	0,293918	0,093587	-0,27728	-0,27841	0,422935	0,143691	-0,97064
0,677544	0,174444	0,056696	0,17808	-0,30436	-0,09302	-0,00214	-0,12437	0,187467	-0,43193
0,234519	0,099246	-0,55805	0,104226	-0,22772	-0,10014	0,490296	-0,02298	0,025369	-0,33167
0,043689	0,208229	0,413279	0,093227	-0,32352	0,192811	-0,24757	-0,01865	-0,23647	-0,03647
-0,22842	0,063418	-0,55357	0,071502	-0,38965	0,385918	-0,2461	-0,47243	-0,50113	0,693924
-0,61819	-0,40337	0,035517	-0,14082	-0,13574	-0,37265	0,761679	-0,32624	-0,11856	0,214546
-0,09614	0,134794	-0,23817	0,083593	-0,12763	-0,42068	-0,17197	0,129287	-0,05639	-0,41573
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
0,461193	-0,12008	-0,39898	-0,14517	-1,04263	0,113512	-0,07263	-0,04106	0,436446	0,854197
0,113157	-0,01085	-0,42162	-0,08774	0,113685	0,025754	0,41191	0,156763	0,147201	-0,10883
0,028132	-0,13494	0,077254	0,038314	1,025699	0,089067	-0,20248	0,278278	0,065455	-0,07615
-0,05796	0,027622	0,309548	0,343106	0,408714	0,010299	-0,47089	0,12874	0,153001	0,08363
-0,17843	0,031078	0,14364	0,068233	-0,07885	0,451595	-0,09684	-0,05053	-0,03545	0,096716
0,114216	0,023247	0,02361	0,273128	-0,35454	0,32719	0,143218	0,028974	-0,19183	0,464957
-0,05992	-0,07016	-0,32069	0,508265	0,198605	0,104264	0,083299	0,28261	0,141645	-0,27323
-0,13531	-0,20698	-0,48905	0,057946	-0,50201	-0,31696	0,458709	0,023481	0,129803	-0,19678
-0,72137	0,114651	-0,2997	-0,32954	-0,59121	-0,40589	0,216223	0,251235	0,134738	-0,67488
0,002178	-0,22299	0,149577	-0,2669	0,056447	-0,13326	0,100123	-0,11125	0,038421	0,039001
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
-0,34213	-0,25612	-0,277	-0,09912	0,731403	-0,05248	-0,26773	0,021487	-0,12161	0,208723
-0,04437	-0,52154	-0,02307	0,094206	-0,31997	0,148029	-0,20134	-0,36498	0,144565	0,043651
0,268914	0,060812	-0,18251	0,063491	-0,17606	0,10835	-0,98586	-0,12808	-0,99348	0,080405
-0,39725	0,014178	0,245029	0,066364	-0,17206	-0,18351	0,298665	0,70093	0,245841	0,055663
-0,07331	0,085309	-0,34595	-0,12622	0,624404	-0,35017	0,144628	0,606886	-0,34113	0,161664
-0,42375	-0,38622	-0,39944	0,035934	0,472221	-0,17319	-0,30497	0,022339	-0,6736	-0,19013
-0,01381	-0,34134	0,038917	0,279666	-0,35544	-0,33745	-0,13854	-0,34374	0,082374	-0,21157
-0,08877	0,330949	-0,49819	0,161957	0,023078	-0,2918	0,083568	-0,65917	-0,40002	-0,47133
0,092818	0,178783	-0,00191	0,013338	0,156211	-0,09606	0,699796	0,082584	0,702213	0,083257
-0,18763	0,218559	-0,06709	-0,14349	0,066523	0,176088	0,089662	0,245673	0,191813	0,224721

91	92	93	94	95					
0,577306	0,394635	0,423855	0,172776	0,354801					
0,223537	0,387362	0,010221	0,136636	-0,20437					
0,206775	0,072798	0,365177	0,073608	-0,84184					
-0,20698	0,058727	0,330178	0,021521	-0,56057					
-0,00849	-0,18779	0,183169	-0,15519	-0,44276					
0,255303	0,006609	0,491402	-0,18572	0,116739					
-0,15854	0,313347	0,173079	-0,06137	0,279034					
0,47717	0,040076	-0,07147	0,37986	0,588318					
0,057459	0,010006	-0,09195	0,284007	0,082885					
-0,01112	0,227575	0,090767	-0,16105	0,183638					

Таблиця А.4. Зміщення першого шару нейронної мережі для класифікації мікропланктону

Номер нейрона	Зміщення
1	1,190033
2	0,869797
3	-0,81596
4	0,571859
5	-0,17419
6	-0,23209
7	-0,5196
8	-1,05771
9	-1,26997
10	-1,52534

Додаток Б

Програма мікроконтролера модуля введення-виведення

```
#include <modbus.h>
#include <modbusDevice.h>
#include <modbusRegBank.h>
#include <modbusSlave.h>
#define AIA 5
#define AIB 6
#define USE_485DE 1
#ifdef USE_485DE
    #include <avr/io.h>
    #include <avr/interrupt.h>
#endif
modbusDevice regBank;
modbusSlave slave;
byte modbusAddr=8;
int batVoltage;
int pressureSensorVoltage;
byte mspeed;
int distance;
#ifdef USE_485DE
ISR(USART_TX_vect) //якщо передача закінчена
{
    digitalWrite(13, LOW); //змінити режим MAX485 на прийом
}
#endif
void setup(void) {
    #ifdef USE_485DE
    pinMode(13, OUTPUT); //DE (!RE) pin
    UCSR0B|=(1<<TXCIE0); // дозволити переривання при закінченні передачі
    sei();          //дозволити переривання
    #endif
    regBank.setId(modbusAddr); //задати адресу в мережі Modbus
    regBank.add(40001); //сигнал з давача витoku води та напруга на акумуляторах
    regBank.add(40002); //напрямок включення та коефіцієнт заповнення напруги на
приводі насоса
    regBank.add(40003); //напруга з давача тиску
```

```

regBank.add(40004); //відстань від нижньої точки
slave._device = &regBank;
slave.setBaud(19200);
regBank.set(40002,0); //початкова напруга на насосі
pinMode(AIA, OUTPUT); //виходи для керування насосом
pinMode(AIB, OUTPUT);
mstop();
}
void loop(void) {
batVoltage=analogRead(A0);
if(analogRead(A2)>100) //якщо на АЦП більше 100, вважати, що наявна вода
regBank.set(40001,batVoltage|0x8000);
else regBank.set(40001,batVoltage);
pressureSensorVoltage=analogRead(A1);
regBank.set(40003,pressureSensorVoltage);
distance = analogRead(A3);
regBank.set(40004,distance);
slave.run(); //виконання операцій з обслуговування підключення по Modbus
mspeed=(byte)regBank.get(40002);
// перевірка старших бітів (напрямку)
if(regBank.get(40002)&0x8000) mforward(mspeed);
else if(regBank.get(40002)&0x4000) mbackward(mspeed);
else mstop();
}
void mbackward(byte speed) //ввімкнення насоса в зворотному напрямку
{ analogWrite(AIA,0);
analogWrite(AIB,speed);
}
void mforward(byte speed) //ввімкнення насоса в прямому напрямку
{ analogWrite(AIA,speed);
analogWrite(AIB,0);
}
void mstop() //зупинка насоса
{
analogWrite(AIA,0);
analogWrite(AIB,0);
}

```

Додаток В

Програма мікроконтролера дисплейного модуля

```
#include <UTFT.h>
#include "TouchScreen.h"
#include "Timer.h"
#include <modbus.h>
#include <modbusDevice.h>
#include <modbusRegBank.h>
#include <modbusSlave.h>
#define USE_485DE 1
#ifdef USE_485DE
    #include <avr/io.h>
    #include <avr/interrupt.h>
#endif
//налаштування резистивного сенсора
#define YP A1
#define XM A2
#define YM 7
#define XP 6
#define TS_MINX 150//0
#define TS_MINY 130//0
#define TS_MAXX 920//320
#define TS_MAXY 940//240
#define MINPRESSURE 10
#define MAXPRESSURE 1000
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SmallSymbolFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];
UTFT HMIGLCD(UNO_24,A2,A1,A3,A4); //ініціалізація контролера дисплея
TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 338); //задання параметрів сенсорного
екрану
Point p;
modbusDevice regBank;
modbusSlave slave;
byte modbusAddr=9; //адреса модуля в мережі Modbus
Timer t;
byte tPrewriteCountdown,tIndicationPeriod,tVBatUpdate,tDive;
```

```

byte runlevel;
byte countdownTime=9;
byte pressedKey;
byte x=0,y=0;
word regtxt;
unsigned int vProbe;
#ifdef USE_485DE //обробник переривання закінчення передачі через USART
ISR(USART_TX_vect) //якщо передача закінчена
{
    digitalWrite(13, LOW); //змінити режим MAX485 на прийом
}
#endif
void setup()
{
    #ifdef USE_485DE
    pinMode(13, OUTPUT); //DE (!RE) pin
    UCSRB|=1<<TXCIE0); //увімкнути переривання при закінченні передачі
    sei(); //увімкнути переривання
    #endif
    regBank.setId(modbusAddr);
    regBank.add(40001); // runlevel & біти меню mmmrrrrrrmmmmmmmmmm
    regBank.add(40002); // текстовий буфер
    regBank.add(40003); // об'єм для аналізу
    regBank.add(40004); // виконано (прогрес)
    regBank.add(40005); //
    regBank.add(40006); // кількість об'єктів
    regBank.add(40007); // напруга на акумуляторах
    regBank.add(40008); // швидкість води
    regBank.add(40009); // глибина занурення
    regBank.add(40010); // відстань до дна
    slave._device = &regBank;
    slave.setBaud(19200);
    regBank.set(40001,0x0100); //0 runlevel & біти меню mmmrrrrrrmmmmmmmmmm
    regBank.set(40002,0xFFFF); //1 текстовий буфер
    digitalWrite(13, LOW);
    // Ініціалізація LCD
    pinMode(A0,OUTPUT);

```

```

digitalWrite(A0,HIGH);// RD pin - high
HMIGLCD.InitLCD(PORTRAIT);
runlevel=0;
}
void loop()
{
switch(runlevel) {
case 0: //під'єднання до процесорного модуля
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
    HMIGLCD.print("O""\xA7""i""\x9F""y""\x97""a""\xA2\xA2\xAF", 0, 0);//Очікування
    HMIGLCD.print("\x98""o""\xA4""o""\x97\xA2""oc""\xA4""i", 0, 20);//готовності
    HMIGLCD.print("\xA3""po""\xA6""есор""\xA2""o""\x98""o", 0, 40); //процесорного
    HMIGLCD.print("\xA1""o""\x99""y""\xA0\xAF", 0, 60);//модуля
    runlevel=1;
    break;
case 1: //очікування дій процесорного модуля
    slave.run();
    runlevel=(0x3F00&regBank.get(40001))>>8;
    break;
case 2: //виведення списку знайдених пристроїв
    HMIGLCD.print("OK",0,100);
    do {slave.run();
    } while(regBank.get(40002)==0xFF);
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
    while(1) {
        regBank.set(40002,0xFFFF);
        do {slave.run();
            regtxt=regBank.get(40002);
        } while(regtxt==0xFFFF);
        pressedKey=(byte)regtxt;
        if(pressedKey==0xFE) break;
        if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;} //якщо символ кінця рядка
        else {HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y); x+=16;}
        pressedKey=(byte)(regtxt>>8);
    }
}
}

```

```

if(pressedKey==0xFE) break;
if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;}
    else HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y);
if(x>200) {y+=20; x=0;} else x+=16;
}
runlevel=3;
delay(2000);
HMIGLCD.clrScr();
HMIGLCD.setFont(BigFont);
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
HMIGLCD.print("\x81\xA0\x7D\x96\x7D\xA2""a",0,0);//Глибина
HMIGLCD.print("\x82""o ""\x99\xA2""a",0,120);//До дна
HMIGLCD.print("Top""\x9F\xA2""i""\xA4\xAC""c""\xAF",0,260);//Торкніться
HMIGLCD.print("\x99\x9D""c""\xA3\xA0""e""\xAE"" ""\x99\xA0\xAF",0,280);//дисплею

```

для

```

HMIGLCD.print("""o""o""e",0,300);//продовження
HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
slave.run();
tDive=t.every(1000, dive); //виведення глибини і відстані до дна кожну секунду
tVBatUpdate=t.every(30000, battVUpd); //оновлення напруги на батареї щопівхвилини
t.update();
break;
case 3: //очікування опускання пристрою на задану глибину
do {
    slave.run();
    t.update();
    pollTouch();
} while(!inRange());
t.stop(tDive);
//час перед стартом програми розпізнавання на вхід в настройки та прокачка
HMIGLCD.clrScr();
HMIGLCD.setFont(BigFont);
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
HMIGLCD.print("Top""\x9F\xA2""i""\xA4\xAC""c""\xAF",0,0);//Торкніться
HMIGLCD.print("\x99\x9D""c""\xA3\xA0""e""\xAE"" ""\x99\xA0\xAF",0,20);//дисплею

```

для

```

HMIGLCD.print("\x97\x9D\x9F\xA0\x9D\x9F""y""

```

```

""\xA1""e""\xA2\xAE",0,40);//виклику меню
    HMIGLCD.print("A""\xA2""a""\xA0""i""\x9C",0,100);//Аналіз
    HMIGLCD.print("po""\x9C\xA3""o""\xA7\xA2""e""\xA4\xAC""c""\xAF",0,120);//розпочнет
    ься
    HMIGLCD.print("a""\x97\xA4""o""\xA1""a""\xA4\x9D\xA7\xA2""o",0,140);//автоматично
    HMIGLCD.print("\xA7""epe""\x9C",0,160);//через
    HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    tPeworkCountdown=t.every(1000, countDown);
    slave.run();
    runlevel=4;
    break;
case 4: //очікування входу в меню
    t.update();
    slave.run();
    pollTouch();
    if (inRange()) {
        runlevel=10;
    }
    break;
case 5: //вхід в режим "робота"
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
    HMIGLCD.print("\x89""poa""\xA2""a""\xA0""i""\x9C""o""\x97""a""\xA2""o",0,10);//Проана
    лізовано
    HMIGLCD.print("o""\x96""\""\xAD\x9F\xA4""i""\x97",0,30);//об'єктів
    HMIGLCD.print("Сере""\x99\xA2\xAF",0,120);//Середня
    HMIGLCD.print("\xA8\x97\x9D\x99\x9F""іс""\xA4\xAC",0,140);//швидкість
    HMIGLCD.print("B""\x9D\x9F""o""\xA2""a""\xA2""o",0,230);//Виконано
    tIndicationPeriod=t.every(1000,workIndication);
    runlevel=6;
    break;
case 6: //усталений "робота"
    slave.run();
    t.update();
    pollTouch();
    if (inRange()) {

```



```

    runlevel=10;
    t.stop(tIndicationPeriod);
}
break;
case 7: //отримання результату вимірювання
do {slave.run();
} while(regBank.get(40002)==0xFF);
HMIGLCD.clrScr();
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
HMIGLCD.setFont(BigFont);
while(1) {
    regBank.set(40002,0xFFFF);
    do {slave.run();
        regtxt=regBank.get(40002);
    } while(regtxt==0xFFFF);
    pressedKey=(byte)regtxt;
    if(pressedKey==0xFE) break;
    if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;} //якщо символ кінця рядка
        else {HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y); x+=16;}
    pressedKey=(byte)(regtxt>>8);
    if(pressedKey==0xFE) break;
    if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;}
        else HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y);
    if(x>200) {y+=20; x=0;} else x+=16;
}
runlevel=8;
break;
case 8: //очікування ознайомлення з результатами
slave.run();
pollTouch();
if (inRange()) {
    runlevel=5;
}
break;
case 10: //виведення головного меню
HMIGLCD.clrScr();
HMIGLCD.setFont(BigFont);

```

```

HMIGLCD.setColor(VGA_AQUA); //передача результатів
HMIGLCD.drawRect(5,5,235,80);
HMIGLCD.print("\x89""epe""\x99""a""\xA7""a",55,20);
HMIGLCD.print("pe""\x9C""y""\xA0\xAC\xA4""a""\xA4""i""\x97",30,40);
HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW); //виправлення роботи
HMIGLCD.drawRect(5,85,235,160);
HMIGLCD.print("\x42""\x9D""\xA3""pa""\x97\xA0""e""\xA2\xA2\xAF",30,100);
HMIGLCD.print("po""\x96""o""\xA4\x9D",70,120);
HMIGLCD.setColor(VGA_FUCHSIA); //налаштування
HMIGLCD.drawRect(5,165,235,240);
HMIGLCD.print("Ha""\xA0""a""\xA8\xA4""y""\x97""a""\xA2\xA2\xAF",25,190);
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME); //вихід
HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);
HMIGLCD.print("\x42""\x9D""xi""\x99",80,270);
runlevel=11;
break;
case 11: //очікування вибору пункту головного меню
    slave.run();
    t.update();
    pollTouch();
    if (inRange()) {
        scaleTouch();
        if(p.y>5&&p.y<80) runlevel=20;
        if(p.y>85&&p.y<160) runlevel=30;
        if(p.y>165&&p.y<240) runlevel=40;
        if(p.y>245&&p.y<319) runlevel=5;
    }
    break;
case 20: //виведення меню передачі результатів
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.setColor(VGA_AQUA);
    HMIGLCD.drawRect(5,5,235,80);
    HMIGLCD.print("Ethernet",55,30);
    HMIGLCD.drawRect(5,85,235,160);
    HMIGLCD.print("Wi-Fi",80,110);
    HMIGLCD.drawRect(5,165,235,240);

```

```

HMIGLCD.print("USB flash",50,185);
HMIGLCD.print("drive",80,205);
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME); //вихід
HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);
HMIGLCD.print("\x42""\x9D""xi""\x99",80,270);
runlevel=21;
break;
case 21: //очікування вибору в меню передачі результатів
    slave.run();
    t.update();
    pollTouch();
    if (inRange()) {
        scaleTouch();
        if(p.y>5&& p.y<80) { //Ethernet
            regBank.set(40001,0x80|regBank.get(40001));
            slave.run();
            resTransWait();
            runlevel=22;
        }
        if(p.y>85&& p.y<160) { //Wi-Fi
            regBank.set(40001,0x40|regBank.get(40001));
            slave.run();
            resTransWait();
            runlevel=24;
        }
        if(p.y>165&& p.y<240) { //UFD
            regBank.set(40001,0x20|regBank.get(40001));
            slave.run();
            resTransWait();
            runlevel=26;
        }
        if(p.y>245&& p.y<319) runlevel=5;
    }
    break;
case 22: //Ethernet
    do {slave.run();
        } while(0x0080&regBank.get(40001)); //очікування скидання біта - ознака виконання

```

команди

```
HMIGLCD.clrScr();
x=0; y=0;
while(1) { //виведення переданих з проц.модуля рядків
  regBank.set(40002,0xFFFF);
  do {slave.run();
    regtxt=regBank.get(40002);
  } while(regtxt==0xFFFF);
  pressedKey=(byte)regtxt;
  if(pressedKey==0xFE) break;
  if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;} //якщо символ кінця рядка
  else {HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y); x+=16;}
  pressedKey=(byte)(regtxt>>8);
  if(pressedKey==0xFE) break;
  if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;}
  else HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y);
  if(x>200) {y+=20; x=0;} else x+=16;
}
delay(5000);
runlevel=5;
break;
case 24: //Wi-Fi
do {slave.run();
} while(0x0040&regBank.get(40001)); //очікування скидання біта - ознака виконання
```

команди

```
HMIGLCD.clrScr();
x=0; y=0;
while(1) { //виведення переданих з проц.модуля рядків
  regBank.set(40002,0xFFFF);
  do {slave.run();
    regtxt=regBank.get(40002);
  } while(regtxt==0xFFFF);
  pressedKey=(byte)regtxt;
  if(pressedKey==0xFE) break;
  if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;} //якщо символ кінця рядка
  else {HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y); x+=16;}
  pressedKey=(byte)(regtxt>>8);
```

```

    if(pressedKey==0xFE) break;
    if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;}
        else HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y);
    if(x>200) {y+=20; x=0;} else x+=16;
}
delay(5000);
runlevel=5;
break;
case 26: //USB flash drive
do {slave.run();
} while(0x0020&regBank.get(40001)); //очікування скидання біта - ознака виконання

```

команди

```

HMIGLCD.clrScr();
x=0; y=0;
while(1) { //виведення переданих з проц.модуля рядків
    regBank.set(40002,0xFFFF);
    do {slave.run();
        regtxt=regBank.get(40002);
    } while(regtxt==0xFFFF);
    pressedKey=(byte)regtxt;
    if(pressedKey==0xFE) break;
    if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;} //якщо символ кінця рядка
        else {HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y); x+=16;}
    pressedKey=(byte)(regtxt>>8);
    if(pressedKey==0xFE) break;
    if(pressedKey==0x0A) {y+=20; x=0;}
        else HMIGLCD.printChar(pressedKey,x,y);
    if(x>200) {y+=20; x=0;} else x+=16;
}
delay(5000);
runlevel=5;
break;
case 30: //виведення меню виправлення роботи
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
    HMIGLCD.drawRect(5,5,235,80);

```

```

        HMIGLCD.print("\x89""po""\x9F""a""\xA7""a""\xA4\x9D",50,35);//Прокачати
        HMIGLCD.drawRect(5,85,235,160);
        HMIGLCD.print("\x89""epe""\x9C""a""\xA3""yc""\xA4\x9D\xA4\x9D",18,100);//Пер
езапустити
        HMIGLCD.print("\xA3""p.a""\xA2""a""\xA0""i""\x9C""y",40,120);//пр.аналізу
        HMIGLCD.drawRect(5,165,235,240);
        HMIGLCD.print("\x89""epe""\x9C""a""\x97""a""\xA2\xA4"".",35,185);//Перезаванта
жити
        HMIGLCD.print("\xA3""po""\xA6"".""\xA1""o""\x99""y""\xA0\xAC",35,205);//проц.
модуль
        HMIGLCD.setColor(VGA_LIME); //Вихід
        HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);
        HMIGLCD.print("\x42""\x9D""xi""\x99",80,270);
        runlevel=31;
        break;
case 31: //очікування вибору в меню виправлення роботи
    slave.run();
    t.update();
    pollTouch();
    if (inRange()) {
        scaleTouch();
        if(p.y>5&&p.y<80) {
            HMIGLCD.clrScr();
            HMIGLCD.setFont(BigFont);
            HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
            HMIGLCD.print("\x89""po""\x9F""a""\xA7""a""\xA4\x9D",50,30);//Прокачати
            HMIGLCD.setColor(VGA_WHITE);
            HMIGLCD.drawRect(5,85,235,160);
            HMIGLCD.print("A""\x97""epc",80,110);//Аверс
            HMIGLCD.drawRect(5,165,235,240);
            HMIGLCD.print("Pe""\x97""epc",70,190);//Реверс
            HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
            HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);
            HMIGLCD.print("C""\xA4""o""\xA3""V""\x42""\x9D""xi""\x99",40,270);// Стоп/Вихід
            runlevel=32;
        }
        if(p.y>85&&p.y<160) runlevel=34;

```

```

    if(p.y>165&& p.y<240) runlevel=36;
    if(p.y>245&& p.y<319) runlevel=5;
}
break;
case 32: //аверс-реверс
    t.update();
    pollTouch();
    if (inRange()) {
        scaleTouch();
        if(p.y>85&& p.y<160) regBank.set(40001,0x08|regBank.get(40001)); //встановити біт
аверс
        if(p.y>165&& p.y<240) regBank.set(40001,0x04|regBank.get(40001)); //... реверс
        if(p.y>245&& p.y<319) {
            runlevel=5;
            regBank.set(40001,0xFFFF3&regBank.get(40001)); //скинути обидва біти
        }
    }
    slave.run();
    if(0x08&regBank.get(40001)) HMIGLCD.print(">>>",0,0);
    else if(0x04&regBank.get(40001)) HMIGLCD.print("<<<",0,0);
    else HMIGLCD.print(" ",0,0);
    break;
case 34: //перезапуск програми аналізу
    regBank.set(40001,0x10|regBank.get(40001));
    slave.run();
    runlevel=35;
    HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
    HMIGLCD.fillRect(5,85,235,160);
    break;
case 35:
    do {slave.run();
    } while(0x0010&regBank.get(40001));
    HMIGLCD.setColor(VGA_BLACK);
    HMIGLCD.fillRect(0,0,239,80);
    HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
    HMIGLCD.setFont(BigFont);

```

```

        HMIGLCD.print("\x89""EPE""\x85""A""\x89\x8A\x8F""ЕНО",20,20);//перезапусче
        но
runlevel=5;
delay(800);
break;
case 36: //перезавантаження процесорного модуля
    regBank.set(40001,0x02|regBank.get(40001));
    slave.run();
    runlevel=37;
    HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
    HMIGLCD.fillRect(5,165,235,240);
    break;
case 37:
    do {slave.run();
    } while(0x0002&regBank.get(40001));
    HMIGLCD.setColor(VGA_BLACK);
    HMIGLCD.fillRect(0,0,239,80);
    HMIGLCD.setColor(VGA_YELLOW);
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.print("\x89""EPE""\x85""АВАНТА""\x84""E-",5,10);
    HMIGLCD.print("НН""\x95""С""\x86""СТЕМ""\x86""...",5,30);
    runlevel=5;
    delay(800);
    break;
case 40: //виведення меню налаштування
    HMIGLCD.clrScr();
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.setColor(VGA_FUCHSIA);
    HMIGLCD.drawRect(5,5,235,80);
    HMIGLCD.print("О""\x96""\xAD""\xA1"" ""\xA3""po""\x96""\x9D",35,35);//Об'єм
проби
    HMIGLCD.drawRect(5,85,235,160);
    HMIGLCD.print(" ",18,100);//
    HMIGLCD.print(" ",40,120);//
    HMIGLCD.drawRect(5,165,235,240);
    HMIGLCD.print(" ",35,185);//
    HMIGLCD.print(" ",35,205);//

```



```

HMIGLCD.setColor(VGA_LIME); //Вихід
HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);
HMIGLCD.print("\x42""\x9D""xi""\x99",80,270);
runlevel=41;
break;
case 41: //очікування вибору в меню налаштування
slave.run();
t.update();
pollTouch();
if (inRange()) {
scaleTouch();
if(p.y>5&&п.y<80) { //вибрано "об'єм проби"
HMIGLCD.clrScr();
HMIGLCD.setColor(VGA_WHITE);
HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40003),20,15);
HMIGLCD.setFont(BigFont);
HMIGLCD.drawHLine(0,81,240); //клавіатура для введення числа
HMIGLCD.drawHLine(0,134,240);
HMIGLCD.drawHLine(0,187,240);
HMIGLCD.drawHLine(0,240,240);
HMIGLCD.drawVLine(60,81,159);
HMIGLCD.drawVLine(120,81,159);
HMIGLCD.drawVLine(180,81,106);
HMIGLCD.print("OK",165,205);
HMIGLCD.print("1",20,100);
HMIGLCD.print("2",80,100);
HMIGLCD.print("3",140,100);
HMIGLCD.print("4",200,100);
HMIGLCD.print("5",20,153);
HMIGLCD.print("6",80,153);
HMIGLCD.print("7",140,153);
HMIGLCD.print("8",200,153);
HMIGLCD.print("9",20,206);
HMIGLCD.print("0",80,206);
HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
HMIGLCD.drawRect(5,245,235,319);

```

```

HMIGLCD.print("\x42""\x9D""xi""\x99",80,270);
vProbe=0;
HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
runlevel=42;
}
if(p.y>85&& p.y<160) runlevel=44;
if(p.y>165&& p.y<240) runlevel=46;
if(p.y>245&& p.y<319) runlevel=5;
}
break;
case 42:
t.update();
pollTouch();
if (inRange()) {
scaleTouch();
if(vProbe==0) {
HMIGLCD.setColor(VGA_BLACK);
HMIGLCD.fillRect(0,0,239,80);
HMIGLCD.setColor(VGA_WHITE);
}
if(p.y>80&& p.y<=134) {
if(p.x<60) pressedKey=1; else
if(p.x<120) pressedKey=2; else
if(p.x<180) pressedKey=3; else pressedKey=4;
}
if(p.y>134&& p.y<=187) {
if(p.x<60) pressedKey=5; else
if(p.x<120) pressedKey=6; else
if(p.x<180) pressedKey=7; else pressedKey=8;
}
if(p.y>187&& p.y<=240) {
if(p.x<60) pressedKey=9; else
if(p.x<120) pressedKey=0; else
{regBank.set(40003,vProbe); regBank.set(40001,0x0001|regBank.get(40001));
runlevel=43; break;}
}
if(p.y>245) runlevel=5; else {

```

```

        vProbe=vProbe*10+pressedKey;
        HMIGLCD.printNumI(vProbe,20,15);
        delay(300);}
    }
    slave.run();
    break;
case 43:
    do {slave.run();
        } while(0x0001&regBank.get(40001));
    HMIGLCD.setColor(VGA_BLACK);
    HMIGLCD.fillRect(0,0,239,80);
    HMIGLCD.setColor(VGA_LIME);
    HMIGLCD.setFont(BigFont);
    HMIGLCD.print("\x85\x80""EPE""\x84""EHO",20,20);//збережено
    runlevel=5;
    delay(800);
    break;
}
}
void dive() //виведення даних під час занурення
{
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40009),80,40);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40010),80,160);
    if(regBank.get(40001)&0x4000) {
        HMIGLCD.setColor(VGA_AQUA);
        HMIGLCD.fillRect(0,300,239,319);
    }
}
void countDown() //відлік до входу в режим "робота"
{
    if(runlevel==4) HMIGLCD.printNumI(countDownTime,110,210);
    if(countDownTime) countDownTime--;
    else {
        t.stop(tPreworkCountdown);
        if(runlevel==4) runlevel=5;}
}
void workIndication() //виведення даних під час аналізу проби

```

```

{
  if(runlevel==6) {
    HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40005),80,60);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40007),80,170);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40004),80,255);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40009),0,300);
    HMIGLCD.printNumI(regBank.get(40010),120,300);
    if(regBank.get(40001)&0x4000) {
      HMIGLCD.setColor(VGA_AQUA);
      HMIGLCD.fillRect(0,300,239,319);
    }
  }
}

void resTransWait()
{
  HMIGLCD.clrScr();
  HMIGLCD.setColor(VGA_AQUA);
  HMIGLCD.print("\x85""a""\xA7""e""\x9F""a""\x9E""\xA4""e", 0, 0); //Зачекайте
}

void battVUpd() //оновлення індикатора заряду акумуляторів
{
  if(runlevel==6) {
    unsigned int voltage=regBank.get(40006);
    byte c;
    HMIGLCD.setFont(SmallSymbolFont);
    if(voltage>=778) c=0x20; //3.80 - повна батареяка
    else if(voltage>=743) c=0x21; //3.63 - 3/4
    else if(voltage>=716) c=0x22; //3.50В - 1/2
    else if(voltage>=696) c=0x23; //3.40В - 1/4
    else c=0x24; //пуста батареяка
    HMIGLCD.printChar(c,230,0); //виведення символу акумулятора-індикатора заряду
    HMIGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
  }
}

void scaleTouch() //масштабування з опору в координати
{

```

```
p.x = map(p.x, TS_MINX, TS_MAXX, 0, HMIGLCD.disp_x_size);
p.y = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, HMIGLCD.disp_y_size);
}
void pollTouch()
{
    p = ts.getPoint(); // get analog point
    pinMode(XM, OUTPUT); //2 chip on one pins
    pinMode(YP, OUTPUT); //2 chip on one pins
}
boolean inRange() //перевірка факту натискання на екран
{
    if(p.z > MINPRESSURE && p.z < MAXPRESSURE) return(true); else return(false);
}
```

Додаток Г

Програма аналізу відеопотоку з мікроскопа та класифікації

```
#include <opencv2/highgui/highgui.hpp>
#include <opencv2/objdetect/objdetect.hpp>
#include <opencv2/imgproc/imgproc.hpp>
#include <iostream>
#include <vector>
#include <list>
#include <iterator>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <signal.h>
#include <sys/time.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/msg.h>
#include "v1.h"

#define TO_SCREEN 1 // 0 - без виведення відео, 1 - з виведенням у вікно
#define USE_NN 1 // 0 - використовувати нечітку логіку, 1 - використовувати
нейронну мережу
void initDbConn(void);
void multiscaleRetinex(cv::Mat, cv::Mat, cv::Mat*);
void adjFilter(void);
float selfISpeed(void);
void calcParams(void);
void nnClas(void);
void flClas(void);
using namespace cv;
using namespace std;
//поточний об'єм проби, градієнт яскравості, кількість об'єктів
int msqid; // IPC дескриптор для черги повідомлень
key_t key=521989; //IPC ключ
struct highlevelmsg {
    long mtype; //001-999 - класи організмів парою "name-count", 1000 - поточний об'єм
проаналізованої води, 1001 - градієнт яскравості, 1002 - швидкість потоку
    char name[30];
    uint32_t count;
```

```

float fVal;
};
highlevelmsg rcvbuf,sndbuf;
vector<vector<Point> > contours;
vector<Vec4i> hierarchy;
FILE *output;
unsigned int contoursCount=0;
vector<Point> currp;      //вектор для динамічного масиву точок початків контурів на
поточному кадрі
vector<bool> exist_in_prev; //вектор для динамічного масиву ознак "існує на
попередньому" точок на поточному кадрі
vector<int> areas;      //вектор для динамічного масиву з площами контурів
struct Tracked_object {
uint64_t index; //загальний номер від моменту старту
uint16_t x;      //координати точки
uint16_t y;
bool updated;    //ознака того, що точка знайдена на поточному кадрі
float S;        //площа об'єкта
float P;        //периметр об'єкта
float smax;     //максимальна площа об'єкта під час проходження поля зору
uint16_t l[10]; //довжина об'єкта за останні 10 кадрів
uint16_t b;    //ширина об'єкта
float brel;    //відносна ширина об'єкта
float comp;    //компактність об'єкта
float kv;      //коефіцієнт випуклості об'єкта
float kz;      //коефіцієнт заповнення об'єкта
float dekv;    //еквівалентний діаметр об'єкта
uint16_t avgH; //середній колір об'єкта
uint16_t avgS;
uint16_t avgV;
float angle;   //орієнтація об'єкта
uint32_t Rsr;  //радіус середньої лінії об'єкта
int16_t s[10]; //переміщення об'єкта за останні 10 кадрів
float v;       //власна швидкість об'єкта
float dl;      //швидкість зміни довжини об'єкта
uint32_t tAlive; //кількість кадрів, на яких відстежується об'єкт
};

```

```

std::list<Tracked_object> tracking_points; //список відстежуваних об'єктів
std::list<Tracked_object>::iterator it;
unsigned long total_points_num=0;
int xmax,xmin,ymax,ymin;
unsigned int i,j;
Tracked_object tmp;
int minObjArea=25; //мінімальна площа контура, при якій об'єкт починає
відслідковуватись
    unsigned int sqMaxSpeed=15; //сума квадратів переміщень в обох координатах за один
кадр, більше якої вважаємо, що це 2 різні об'єкти
    unsigned int tmpMCSpeed,flowSqSpeed,currSpeed=0;
    float flowSpeed;
    unsigned int speeds[20];
    float gradient;
    unsigned int targVProbe;
    double vProbe=0;
    float kCell=0.0105; //коефіцієнт для розрахунку об'єму води через комірку
    const float koc=1.8194;//пікселів/мкм
    double P,S,Svb=1,Sp=1,kv=1,kz=1,comp=1,dekv=1,width=1,height=1,angle=1;
    double avgH=1,avgS=1,avgV=1;
    int threshold_value = 64;
    int threshold_type = 0;
    volatile int needAdjFilter=50;
    char **clNames;
    uint32_t *objCount;
    uint16_t clCount;
    Mat src, blurred, gray, bin, filledContour, hsv, avg;
    Mat bgr;
    void alrm_handler(int inp)
    {
        sndbuf.mtype=1000;
        sndbuf.name[0]='\0';
        sndbuf.count=0;
        sndbuf.fVal=vProbe;
        msgsnd(msqid,&sndbuf,38,0);
        sndbuf.mtype=1001;
        sndbuf.fVal=gradient;

```



```

msgsnd(msqid,&sndbuf,38,0);
sndbuf.mtype=1002;
sndbuf.fVal=flowSpeed;
msgsnd(msqid,&sndbuf,38,0);
needAdjFilter++;
}
void help(char** av)
{
    cout << "Формат виклику:\n" << av[0] << " <об'єм проби>\n" << endl;
}
#if TO_SCREEN==1
void on_trackbar(int, void*)
{
    ;
}
#endif
int main(int ac, char** av)
{
    if (ac != 2)
    {
        help(av);
        return 1;
    }
    targVProbe = atoi(av[1]);
    string arg=0;
    //string arg="/home/dmytro/Video/2014-03-25-142432.webm";
    VideoCapture capture(arg); //спроба використати аргумент як ім'я відеофайлу
    if (!capture.isOpened()) //якщо не вдалося, вважати аргумент номером відеокамери
        capture.open(atoi(arg.c_str()));
    if (!capture.isOpened()) {
        cerr << "Помилка відкриття відеокамери або відеофайлу!" << endl;
        help(av);
        return 1;
    }
    if((msqid = msgget(key, 0666 | IPC_CREAT)) < 0) {
        cerr << "Неможливо отримати msqid" << endl;
        exit(1);
    }
}

```

```

}
initDbConn(); //підключення до бази даних
capture.set(CV_CAP_PROP_FRAME_WIDTH,640);
capture.set(CV_CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,480);
int w = (int)capture.get(CV_CAP_PROP_FRAME_WIDTH);
int h = (int)capture.get(CV_CAP_PROP_FRAME_HEIGHT);
cout << "Ширина="<<w<<endl<<"Висота="<<h<< endl;
int n = 0;
char filename[25];
string window_name = "video | q або esc для виходу";
cout << "Натисніть пробіл для збереження зображення, q або esc для виходу" << endl;
#ifdef TO_SCREEN==1
namedWindow(window_name, CV_WINDOW_NORMAL); //створення вікна для виводу
відео
char text[30];
// створення повзунків
/* createTrackbar( "minObjArea", window_name, &minObjArea, 250, on_trackbar,0 );
createTrackbar( "sqMaxSpeed", window_name, &sqMaxSpeed, 100, on_trackbar,0 );
*/
on_trackbar( 0,0 );
#endif
//створення таймера 0.2 с для надсилання даних керуючій програмі
struct sigaction sa;
sa.sa_handler = alrm_handler;
sigaction(SIGALRM, &sa, 0);
struct itimerval value;
value.it_interval.tv_sec = 0;
value.it_interval.tv_usec = 200000;
value.it_value.tv_sec = 0;
value.it_value.tv_usec = 200000;
setitimer(ITIMER_REAL, &value, NULL);

//виділення пам'яті під зображення
Mat frame;
Mat channels[3];
for (;;)
{

```

```

capture >> frame;
if(frame.empty()) break;
if(needAdjFilter>50) { needAdjFilter=0; adjFilter();}
blur( frame, blurred, Size(3,3));
split(blurred, channels);
multiscaleRetinex(blurred, blurred, channels);
cvtColor( blurred, hsv, COLOR_BGR2HSV ); // перетворюємо в колірну модель HSV
split(hsv, channels);
gray=channels[2]; //обираємо V-компоненту
threshold( gray, bin, threshold_value, 255, threshold_type );
//очищення перед наступним кадром
for(it=tracking_points.begin();it!=tracking_points.end();it++) it->updated=false;
currp.clear();
exist_in_prev.clear();
areas.clear();
contours.clear();
hierarchy.clear();
//пошук контурів
findContours( bin, contours,
hierarchy,RETR_EXTERNAL,CHAIN_APPROX_NONE,Point(0,0));
contoursCount=contours.size(); //отримання кількості контурів
//опрацювання знайдених контурів
for( i = 0; i < contoursCount; i++ ) {
    areas.push_back(((int)fabs(contourArea(contours[i],false))); //пошук площі,
обмеженої контуром
    exist_in_prev.push_back(false);
    xmax=contours[i][0].x;
    xmin=xmax;
    ymax=contours[i][0].y;
    ymin=ymax;
    for(j=1;j<contours[i].size();j++)
    {
        if(contours[i][j].x<xmin) xmin=contours[i][j].x;
        if(contours[i][j].x>xmax) xmax=contours[i][j].x;
        if(contours[i][j].y<ymin) ymin=contours[i][j].y;
        if(contours[i][j].y>ymax) ymax=contours[i][j].y;
    }
}

```

```

        currp.push_back(Point((xmin+xmax)/2,(ymin+ymax)/2)); //середина контура
    }
    //оновлення координат та видалення зниклих об'єктів
    for(it=tracking_points.begin(); it != tracking_points.end(); ) {
        for(i=0;i<contoursCount;i++) {
            currSpeed=(((currp[i].x)-(it->x))^2)+(((currp[i].y)-(it->y))^2);
            if(currSpeed<=sqMaxSpeed) speeds[currSpeed]++;
            if((currSpeed<=sqMaxSpeed) && !exist_in_prev[i]) { //якщо відстань мала та
                точка не асоційована з іншим контуром
                    it->x=currp[i].x;
                    it->y=currp[i].y; //оновити координату точки
                    it->updated=true; //встановити ознаку "координата об'єкту
оновлена"
                    exist_in_prev[i]=true; //встановити ознаку "точка асоційована з
попереднім об'єктом"
                }
            }
            if(!(it->updated)) tracking_points.erase(it++); //видалення об'єктів, які існували на
попередньому кадрі, але відсутні на поточному
                else ++it;
            }
        }
    // додавання нових знайдених об'єктів
    for(i=0;i<contoursCount;i++)
        if(!exist_in_prev[i]&&(areas[i]>=minObjArea)) {
            tmp.index=(++total_points_num);
            tmp.x=currp[i].x;
            tmp.y=currp[i].y;
            tmp.updated=true;
            tracking_points.push_back(tmp);
        }
    //отримання швидкості потоку
    flowSqSpeed=selFlSpeed();
    flowSpeed=sqrt(flowSqSpeed)/кос;
    calcParams(); //розрахунок класифікаційних параметрів
#ifdef USE_NN==1
    nnClas(); //та класифікація
#else

```

```

    flClas();
#endif
#if TO_SCREEN==1
// виведення номерів об'єктів
for(it=tracking_points.begin();it!=tracking_points.end();it++) {
    sprintf(text,"%d",it->index);
    putText(frame, text, Point(it->x,it->y), CV_FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5,
Scalar(0,0,255), 2, 8, false);
}
sprintf(text,"InFrame=%d",contoursCount); //кількість на поточному кадрі
putText(frame, text, Point(1,400), CV_FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1,
Scalar(0,0,255), 2, 8, false);
line(frame, Point(444,470), Point(625,470), Scalar(0,0,255), 3, 8, 0);
sprintf(text,"0.1mm"); //лінія для оцінки розміру
putText(frame, text, Point(530,460), CV_FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1,
Scalar(0,0,255), 2, 8, false);
sprintf(text,"Speed=%3.1f",flowSpeed); //швидкість потоку
putText(frame, text, Point(200,455), CV_FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1,
Scalar(0,0,255), 2, 8, false);
//малювання контурів
drawContours( frame, contours, -1, Scalar(0,250,250), 1, 8, hierarchy, 1);
//виведення всього зображення
imshow(window_name, frame);
#endif
if(vProbe>=targVProbe) {
    for(i=0;i<clCount;i++)
    {
        sndbuf.mtype=i;
        memcpy(sndbuf.name,clNames[i],30);
        sndbuf.count=objCount[i];
        msgsnd(msqid,&sndbuf,38,0);
    }
}
char key = (char) waitKey(33); //чекаємо клавішу ESC для виходу або SPACE для
збереження кадру
switch (key)
{

```

```
case 'q':
case 'Q':
case 27: //ESC
    capture.release();
    #if TO_SCREEN==1
    cvDestroyAllWindows();
    #endif
    return 0;
case ' ': //Пробіл зберігає зображення
    sprintf(filename, "frame%3d.jpg", n++);
    imwrite(filename, frame);
    cout << "Збережено " << filename << endl;
    break;
default:
    break;
}
}
}
```

Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор Рівненського представництва
компанії "Chandwin Project Pte." Ltd.
(Registration Certificate № 200705262M)

 Павло Кривошеї
М.П.
«28» грудня 2019 р.

АКТ

**про результати впровадження на об'єкті «Каналізаційні очисні споруди Хатирчинського району
Навоїської області Республіки Узбекистан продуктивністю 4000 куб. м. на добу на базі
фітотехнології глибокого біологічного очищення води компанії Chandwin Project Pte.»**

матеріалів кандидатської дисертаційної роботи

Реута Дмитра Тагіровича

**старшого викладача Національного університету водного
господарства і природокористування**

Комісією Рівненського представництва компанії "Chandwin Project Pte." Ltd. у складі:
голова комісії:

- Технічний директор, академік екології академії МАНЕБ – Курилюк М.С.

члени комісії:

- головний технолог, член американської асоціації очисників води WEF USA,

член-кореспондент УВ МАНЕБ – Базурін С.О.

- головний конструктор, аспірант НУВГП – Курилюк А.М.

- начальник відділу пуску та наладки КОС – Пригара М.В.

що призначена розпорядженням технічного директора Рівненського представництва компанії

"Chandwin Project Pte." Ltd. №3/13 від «14» листопада 2019 р., складено дійсний Акт про

впровадження наукових матеріалів кандидатської дисертаційної роботи **Реута Дмитра Тагіровича**.

Комісія констатує, що компанії "Chandwin Project Pte." Ltd. згідно Угоди про співпрацю №28-76 від 11.03.2019 р. **Реутом Д. Т.** надані наукові розробки на базі матеріалів дисертаційної роботи для впровадження у виробництво **«Каналізаційні очисні споруди Хатирчинського району Навоїської області Республіки Узбекистан продуктивністю 4000 куб. м. на добу на базі фітотехнології глибокого біологічного очищення води компанії Chandwin Project Pte.»**, а саме:

1. Методика класифікації мікроорганізмів на основі використання методів комп'ютерного зору та нечіткої логіки, зокрема класифікації ефективних мікроорганізмів роду **Bacillus subtilis** — грам-позитивних аеробних бактерій, синтезованих по місцю очищення стічних вод.

2. Структура вимірювальної системи для визначення у потоці аналізованої води концентрації мікроорганізмів, зокрема ефективних мікроорганізмів роду **Bacillus subtilis**, синтезованих у потоці води з використанням маточних розчинів біопрепаратів-пробіотиків типу «Oxydol».
3. Програмне забезпечення для автоматичного регулювання швидкості води в полі зору мікроскопа, класифікації та обчислення концентрації організмів мікропланктону і мікроорганізмів роду **Bacillus subtilis**.

Комісія встановила, що вищевказані матеріали дисертаційної роботи Реута Д.Т. дають можливість проводити вимірювання концентрації окремих класифікаційних груп мікроорганізмів, зокрема мікроорганізмів роду **Bacillus subtilis**, більш оперативно та без впливу людського фактора.

Комісія відзначає, що теоретичні розробки Реута Дмитра Тагіровича мають значний науковий внесок в розробку вимірювальних систем контролю концентрації мікроорганізмів та представляють широкий практичний інтерес для фахівців в даній галузі (контроль та управління систем біологічного очищення природних вод, муніципальних і виробничих стоків та екології).

Комісія рекомендувала Реуту Д.Т. і керівництву компанії "Chandwin Project Pte." Ltd. пролонгувати співпрацю і розширити область використання матеріалів дисертаційних досліджень, зокрема впроваджувати наукові розробки Реута Дмитра Тагіровича без виключення на всіх станціях біологічного очищення природних і стічних вод, що проектується і будуються компанією і її партнерами, а також комісія рекомендує продовжити і розширити виробничу апробацію даної наукової розробки Реута Д.Т. для споруд фітоочищення природних і стічних вод на базі інноваційної фітотехнології з використанням ефективних мікроорганізмів і інокулянтів-пробіотиків в комплексі з вищими водними рослинами без впливу людського фактору на процеси глибокого очищення води.

Голова комісії:



/ Курилюк М.С./

Члени комісії:

/ Базурін С.О. /

/ Курилюк А.М./

/ Пригара М.В./

101 Cecil Street
Tong Eng Bldg. #19-03
Singapore 069533
ROC №200705262M
tel. +6598483549
[Http://purewater.pw](http://purewater.pw)

Додаток Е



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, тел. (0362)63-30-98, факс (0362) 63-32-09, mail@nuwm.edu.ua

Від 15.01.2020 № ОН/1
На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання у навчальному процесі
Національного університету водного господарства та природокористування
результатів досліджень і розробок, одержаних при виконанні дисертаційної
роботи Реута Дмитра Тагіровича на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Використані у навчальному процесі науково-методичні розробки та результати досліджень старшого викладача кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Реута Дмитра Тагіровича, що викладені в його дисертаційній роботі, забезпечують набуття студентами теоретичних знань та сприяють отриманню практичних навиків застосування комп'ютерного зору в розробці інформаційно-вимірювальних систем, зокрема виконання вимірювання кількості мікроорганізмів. Дані розробки використовуються при викладанні дисципліни «Інтелектуальні системи управління» за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у лабораторній роботі № 7 «Використання комп'ютерного зору в інформаційно-вимірювальних системах».

Проректор з наукової роботи
та міжнародних зв'язків,
д.е.н., професор



Н.Б. Савіна