

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

РЕУТ ДМИТРО ТАГІРОВИЧ



УДК 681.2.08:57.087.3

**МЕТОД І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ
МІКРОПЛАНКТОНУ**

05.11.13 - прилади та методи контролю і визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Древецький Володимир Володимирович,
завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного
університету водного господарства та природокористування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Райтер Петро Миколайович,
завідувач кафедри енергетичного менеджменту та технічної
діагностики Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу;

кандидат технічних наук, доцент

Сльнікова Тетяна Олександрівна,
доцент кафедри екології Державного університету
«Житомирська політехніка».

Захист відбудеться «12» лютого 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Устияновича, 5, Х учбовий корпус, ауд. 51).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «28» грудня 2020 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.04,
кандидат технічних наук, доцент*



Вашкурак Ю.З.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 міросита 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. Емблетона, 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 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 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 концентрації мікроорганізмів у воді, що включає автоматичну класифікацію та визначення концентрації мікроорганізмів.

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

4. Провести промислові випробування розробленого приладу.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання концентрації мікропланктону, що використовується 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 відеокадрів, 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 проб 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 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 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) 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).

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 рисунку 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну, наведено дані про практичне значення одержаних результатів, зв'язок роботи з науковими програмами на науково-дослідними роботами, про публікації і апробацію результатів досліджень, визначено особистий внесок внесок здобувача у опублікованих працях.

В першому розділі здійснено аналіз та класифікацію існуючих методів і засобів вимірювання концентрації організмів мікропланктону у воді та виявлено, що вони мають недостатню швидкість вимірювань і обмежені функціональні можливості, значну затримку між моментом зміни концентрації мікроорганізмів та моментом отримання результату вимірювань.

Пропонується вимірювання концентрації організмів мікропланктону у водоймах виконувати шляхом пропускання досліджуваної води через проточну комірку з сфокусованим на її вміст мікроскопом, алгоритмічної обробки відеопотоку та отримання в результаті величин концентрації організмів мікропланктону за кожною групою.

Визначено, що для вимірювань можна використовувати серійні апаратні засоби формування відеозображень (цифровий мікроскоп). В поєднанні з енергоефективним процесором для обробки відеокадрів це дозволяє проводити вимірювання в місці відбору проби й значно зменшити час отримання результату вимірювання в порівнянні з відомими методами і пристроями.

В другому розділі представлено способи опису організмів мікропланктону (розмірів, форми, кольору) та розроблено метод вимірювання концентрації організмів мікропланктону.

Визначення біологічних показників якості води передбачає обчислення певного інтегрального показника якості на основі концентрацій індикаторних організмів. Відомі декілька інтегральних біологічних показників якості води, які дозволяють кількісно оцінити якість води за біологічними показниками, серед яких один з найбільш широко застосовуваних показників – індекс сапробності Пантле-Бука та його численні модифікації. 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 proteus*, *Paramecium caudatum*, *Euglena viridis*, *Cyclops vavilovi*, *Trachelomonas volvocina*, *Pediastrum*, *Coelastrum microporum*, *Chlorella*, *Ulothrix zonata*. Мікропланктон таких розмірів добре розрізняється за допомогою оптичного мікроскопу й швидко реагує на зміну концентрації забруднювачів. Тому вимірювання концентрації мікропланктону такого розміру дозволяє оперативного реагувати на зміни концентрації забруднювачів.

Вимірювання концентрацій різних груп організмів мікропланктону складається з послідовності операцій з трансформації та обробки відеокадрів з цифрового мікроскопа, що спрямований на вміст комірки з досліджуваною

водою (рис. 1). Досліджувана вода прокачується через оптично прозору проточну комірку перистальтичним насосом. Продуктивність насоса задається блоком регулювання витрати.

При вимірюванні концентрації мікропланктону виконуються наступні операції:

1) отримання кадру з мікроскопу (рис. 2, а);

2) перетворення кольорового зображення в одноканальне (відтінки сірого) (рис. 2, б);

3) перетворення зображення з відтінків сірого в бінарне (чорно-біле) застосуванням адаптивного порогу;

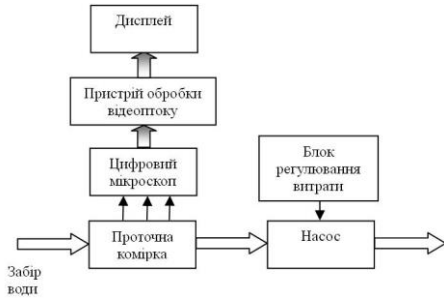
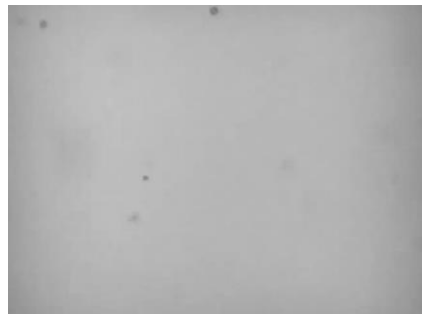


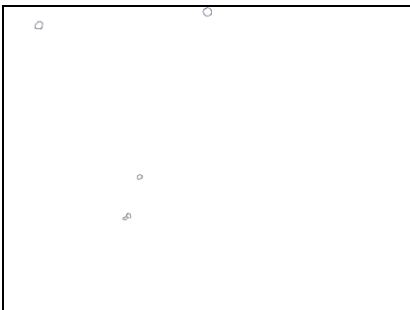
Рис. 1. Функціональна схема пристрою



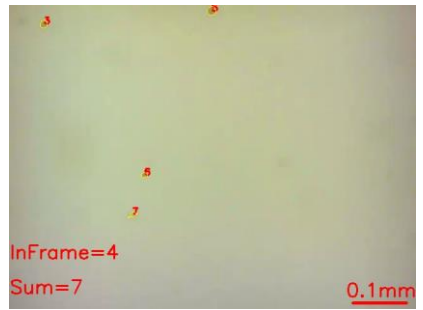
а



б



в



г

Рис. 2. Пошук організмів мікропланктону в полі зору мікроскопа в проточній комірниці:

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

- 4) виділення замкнутих контурів (рис. 2, в);
- 5) визначення координат центрів контурів;
- 6) пошук нових, оновлення координат існуючих та видалення зниклих контурів порівнянням з координатами об'єктів дослідження на попередньому кадрі;
- 7) визначення переміщення об'єктів за час між сусідніми кадрами;
- 8) обчислення швидкості об'єкта та всього потоку води, та регулювання витрати води для отримання чітких відеокадрів;
- 9) обчислення параметрів об'єктів у кадрі, визначення кольору та його розподілу;
- 10) обчислені значення параметрів об'єкта x_j проходять фазіфікацію 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 класифікується до того виду, для якого

добуток ступенів приналежності об'єкта по всім параметрам $A_i = \prod_{j=1}^m \mu_{ij}(x_j)$

максимальний $\forall i, A_i^{\max} \geq A_i$, де $\mu_{ij}(x_j)$ - функція приналежності значення j -го параметра об'єкта до i -ої класифікаційної групи.

11) обчислюється концентрація кожного виду мікропланктону як відношення кількості розпізнаних екземплярів до об'єму води, що пройшов у фокусі мікроскопа $C_i = n_i/V$; отримані значення зберігаються в пам'ять пристрою. Об'єм води, що пройшов у фокусі мікроскопа, визначається як добуток швидкості води в комірці v на проміжок часу Δt , за який прокачується проба, на ширину поля зору мікроскопа b та на товщину h шару води в комірці, на яку сфокусований мікроскоп:

$$V = bhv\Delta t.$$

Вимірювання включає визначення розмірів, кольору, площі та коефіцієнтів форми кожного екземпляру мікропланктону. Для розрахунку об'єму та маси мікропланктону необхідно також виконати його ідентифікацію за видовим складом, так як проведення цих розрахунків залежить від виду екземплярів мікропланктону.

Відомо декілька підходів до ідентифікації об'єктів по їх відеозображенням. Широко поширене використання штучних нейронних мереж для попиксельної обробки всього відеозображення дозволяє виявляти характерні елементи об'єктів, проте потребує як значних обчислювальних ресурсів для роботи в реальному часі, так і людських ресурсів для створення навчальної вибірки. Зменшити обчислювальну складність можливо, якщо визначити характерні параметри об'єктів менш обчислювально складними алгоритмами й виконувати класифікацію на основі значень цих параметрів.

В роботі запропоновано метод класифікації організмів мікропланктону, що використовує нечітку логіку. Використання нечіткої логіки дозволяє описати

параметри організмів з розмитими межами та одночасно обчислити ступінь приналежності об'єкта в полі зору мікроскопа до кожної класифікаційної групи.

Для класифікації мікроорганізмів запропоновано використовувати їх параметри (рис. 3):

- абсолютні довжина та ширина;
- відносна ширина (відношення ширини об'єкта до довжини);

– еквівалентний діаметр $d_{екв} = \sqrt{4S/\pi}$, де S – площа мікроорганізму;

– коефіцієнт випуклості $k_g = S/S_g$, де S_g – площа випуклого багатокутника, в який вписано цей мікроорганізм;

– коефіцієнт заповнення $k_z = S/(lb)$, де l і b – довжина і ширина мікроорганізму;

– компактність $c = P^2/S$, де P – периметр мікроорганізму;

– радіус середньої лінії (в напрямку, в якому довжина об'єкта найбільша, він апроксимується дугою та визначається її радіус);

– середній колір (середнє арифметичне для всіх пікселів знайденого організму мікропланктону);

- швидкість руху відносно потоку;
- швидкість зміни довжини;
- багатоклітинність.

Проведено дослідження методу класифікації мікроорганізмів мікропланктону за допомогою штучної нейронної мережі. На входи штучної нейронної мережі (рис. 4) подаються ті самі параметри, що оброблялись нечіткою логікою з метою класифікації. Кількість виходів нейронної мережі дорівнювала кількості класифікаційних груп мікроорганізмів, які розрізняла нейронна мережа. Виходи нейронної мережі набували значень з діапазону $[0...1]$, які характеризували ймовірність того, що аналізований об'єкт належить до відповідної класифікаційної групи. Шляхом комп'ютерного моделювання було встановлено, що оптимальними за структурою для задачі класифікації організмів мікропланктону за їх ознаками будуть однонаправлені штучні нейронні мережі прямого розповсюдження без елементів затримок та зворотних зв'язків. Кількість шарів, кількість нейронів у шарах та їх функції активації визначались експериментально, шляхом дослідження моделей. При цьому було створено 72 моделі нейронних мереж з різними функціями активації та кількістю нейронів у прихованих шарах. При навчанні нейронних мереж використовувались ті ж самі дані, що й при створенні бази нечітких логічних правил.

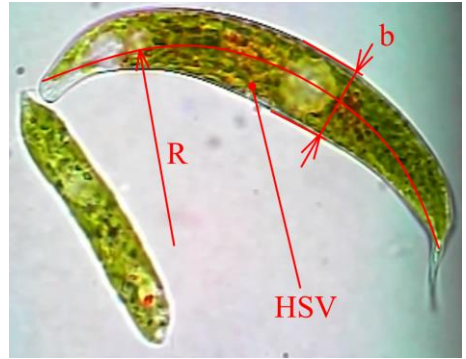


Рис. 3. Визначення ширини, радіуса середньої лінії та кольору організму мікропланктону

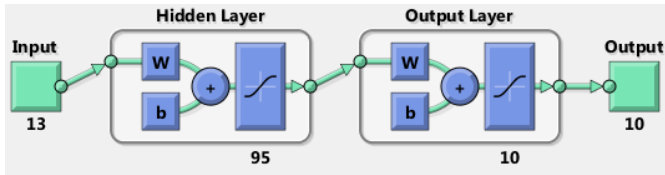


Рис. 4. Структура штучної нейронної мережі для класифікації мікропланктону

Після проведення процесу навчання було здійснено порівняльний аналіз ефективності функціонування моделей штучних нейронних мереж із використанням тестової вибірки даних, яка не використовувалась при навчанні. Критерієм ефективності була середньоквадратична похибка. Розроблена нейронна мережа має 13 входів, на кожен з яких подається значення відповідного класифікаційного параметра, 95 нейронів у першому шарі та 10 нейронів у другому шарі. Кількість виходів відповідає кількості класифікаційних груп мікроорганізмів, які може розпізнати штучна нейронна мережа.

За результатами досліджень другого розділу отримано патент України на корисну модель №138448.

В третьому розділі розроблено пристрій для автоматичного вимірювання концентрації мікропланктону. Розроблено методики обробки вимірювальної інформації. Визначено необхідні компоненти для реалізації пристрою, виготовлено та випробувано пристрій.

Пристрій (рис. 5) складається з оптично прозорої проточної комірки, перистальтичного насоса для подачі аналізованої води, цифрового мікроскопа, процесорного модуля, модуля введення-виведення, модуля людино-машинного інтерфейсу, силового драйвера, давача гідростатичного тиску, інфрачервоного давача відстані, давача витoku води в корпус пристрою, модуля людино-машинного інтерфейсу з рідкокристалічним дисплеєм та модуля живлення на базі підвищувального перетворювача напруги та літій-іонних акумуляторів. Давач гідростатичного тиску використовується для вимірювання глибини занурення. Використання давача гідростатичного тиску для вимірювання глибини занурення дозволяє оператору бачити і фіксувати глибину, на яку занурюється пристрій для відбору проби. Інфрачервоний давач відстані використовується для вимірювання відстані до дна водойми, що дозволяє попередити оператора про наближення дна водойми і запобігти всмоктуванню донного ґрунту та відкладів в проточну частину пристрою. Давач витoku води в корпус пристрою використовується для аварійної зупинки пристрою та сигналізації про розгерметизацію оператора, що знаходиться на поверхні. Напруга на літій-іонних акумуляторах вимірюється за допомогою аналогово-цифрового перетворювача, цифровий еквівалент напруги передається на процесорний модуль й використовується для сигналізації про низький рівень заряду акумуляторів.

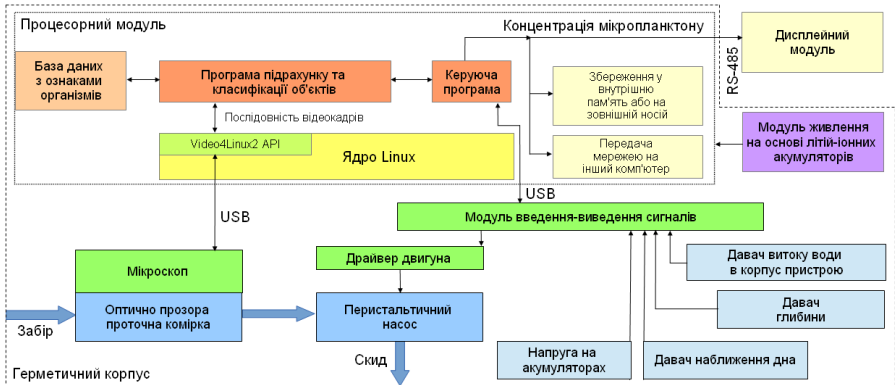


Рис. 5. Структурна схема пристрою

Робота пристрою передбачає наступні операції:

- прокачування проби через проточну оптично прозору комірку, вміст якої знаходиться в фокусі мікроскопа;
- формування відеокадру з мікропланктоном;
- виявлення кожного організму мікропланктону шляхом цифрової обробки відеопотоку;
- обчислення та регулювання швидкості потоку води через проточну комірку;
- розрахунок для кожного організму мікропланктону параметрів форми, руху та кольору;
- виконання класифікації кожного організму мікропланктону з використанням нечіткої логіки;
- розрахунок концентрації кожної класифікаційної групи мікропланктону в воді.

Розроблений пристрій (рис. б) має такі переваги:

1. Зменшується час між моментом забору проби та моментом отримання результату вимірювання. Дані про кількість перших врахованих та класифікованих організмів мікропланктону з'являються на дисплеї пристрою вже через 20 с після вибору пункту меню "Почати вимірювання". При використанні традиційних методів затримка складає десятки хвилин-години, що потрібні для відбору, консервації, доставки проби в лабораторію та її дослідження.

2. Підвищується повторюваність вимірювань порівняно з ручним підрахунком та класифікацією організмів мікропланктону. Використання пристрою одразу декількома окремими лабораторіями дозволить виключити суб'єктивний вплив лаборанта на результати вимірювань та зведе їх до однієї шкали. Збереження значень бази нечітких правил у одній базі даних дозволяє уніфікувати критерії віднесення організму до певної класифікаційної групи незалежно від суб'єктивної думки лаборанта.

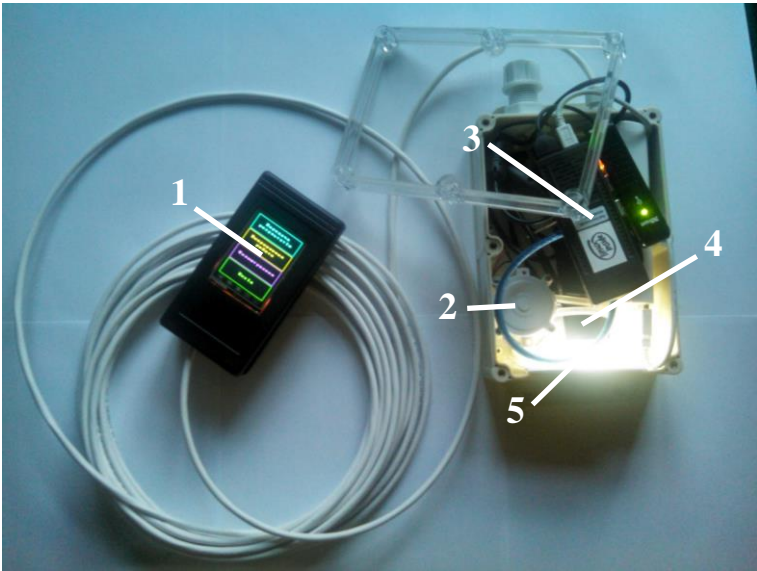


Рис. 6. Зовнішній вигляд пристрою визначення концентрації мікропланктону: 1 – дисплей, 2 – перистальтичний насос, 3 – процесорний модуль, 4 – цифровий мікроскоп, 5 – проточна оптично прозора комірка

За результатами досліджень третього розділу отримано патент України на винахід №112807.

В четвертому розділі проаналізовано основні невизначеності, що виникають при вимірюванні концентрації розробленим методом та пристроєм, та результати випробування пристрою.

Результати щомісячного моніторингу концентрації наведених у таблиці 1 класифікаційних груп мікропланктону у пробах об'ємом 10 мл, відібраних у поверхневому шарі води озера Басів Кут з берега за координатами 50°36'16.6"N 26°15'06.1"E показані на рис. 7. Результати вимірювань свідчать про органічне забруднення водойми.

Середня кількість успішних розпізнавань мікроорганізмів за допомогою штучної нейронної мережі перевищувала середню кількість успішних розпізнавань з використанням нечіткої логіки на 8 % (92% та 85% відповідно, див. табл. 1), хоча навчання нейронної мережі потребувало більших затрат часу порівняно з створенням бази правил для застосування нечіткої логіки. За істинний результат класифікації в обох випадках прийнято результат ручної класифікації кожного мікроорганізму.

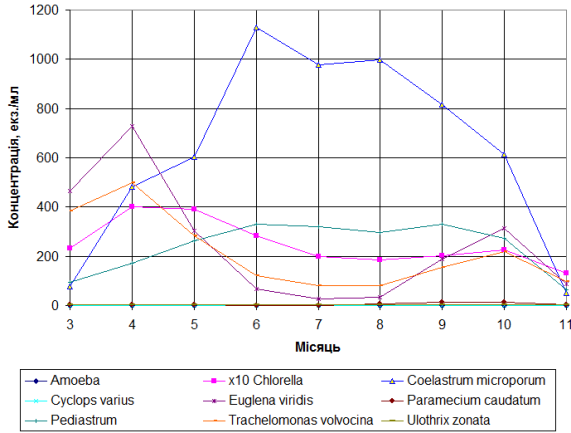


Рис. 7. Графіки концентрації мікропланктону в воді оз. Басів Кут, отримані в результаті вимірювань розробленим пристроєм

Таблиця 1. Порівняння точності класифікації мікропланктону

Класифікаційна група (вид, рід)	Правильно класифіковано, % від загальної кількості	
	Нечітка логіка	Нейронна мережа
Amoeba proteus	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

Формування та перетворення вимірювальної інформації у пристрої вимірювання концентрації мікропланктону супроводжується виникненням невизначеностей, які впливають на точність вимірювання концентрації мікроорганізмів:

- невизначеності, обумовлені шумом в світлочутливій матриці та квантуванням за рівнем відеосигналу при перетворенні зображення в цифрову форму;
- невизначеність визначення координат точок об'єктів на зображенні у цифровому форматі та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи;

– невизначеність визначення контура об'єкта, що тягне за собою невизначеності вимірювання геометричних розмірів об'єкта, периметру, площі та параметрів, що розраховуються на їх основі;

– невизначеність класифікації об'єкта до певної класифікаційної групи мікропланктону;

– невизначеності вимірювання розмірів поля зору цифрового мікроскопа, швидкості потоку води та товщини шару води, на який сфокусовано мікроскоп.

Основною невизначеністю вимірювання геометричних параметрів, яка не може бути скомпенсована, є невизначеність, пов'язана із дискретністю цифрового відеокадру. Разом з невизначеністю класифікатора (бази знань нечіткої логіки або штучної нейронної мережі) ці невизначеності визначають максимально можливу точність вимірювань за умови, що інші зменшені або скомпенсовані до незначного рівня. Відхилення вимірюваного параметра мікроорганізму від дійсного значення може призвести до віднесення цього мікроорганізму до іншої класифікаційної групи, а отже зменшити точність вимірювання концентрації окремих груп мікропланктону.

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 швидкодію 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, 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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

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)

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)

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)

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)

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)

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.

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)

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)

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, ФЕіВТ, 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)

16. Реут Д.Т. Використання нечіткої логіки для класифікації мікроорганізмів при контролі якості вод // 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)**

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, ФЕІВТ, ІФНТУНГ. – 2015. – С. 168. – **(тези, конференція)**

19. Реут Д. Т. Перспективи використання пристроїв автоматичної ідентифікації мікроорганізмів у екологічному моніторингу // 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)**

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)**

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

АНОТАЦІЯ

Реут Д.Т. Метод і пристрій для вимірювання концентрації мікропланктону. – 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.

Дисертація присвячена питанням зменшення часу вимірювання концентрації мікропланктону в водах відкритих водойм шляхом створення методу автоматичного визначення концентрації мікропланктону в неперервному потоці води та пристрою, що його реалізує.

Здійснено аналіз та класифікацію існуючих методів і засобів вимірювання концентрації організмів мікропланктону у воді відкритих водойм.

Розроблено новий метод неперервної ідентифікації та визначення концентрації мікроорганізмів, що передбачає аналіз відеопотоку з мікроскопа з врахуванням змін вмісту поля зору мікроскопа з часом. Розроблена база даних з параметрами, які використовуються для розпізнавання окремих класифікаційних груп мікроорганізмів.

Розроблено пристрій для автоматичного неперервного вимірювання концентрації мікропланктону у відкритих водоймах на основі запропонованого методу. Цей портативний пристрій має розширені функціональні можливості, значно меншу тривалість вимірювань у порівнянні із іншими відомими засобами вимірювань.

Оцінено точність вимірювання розробленим пристроєм. Проаналізовано джерела невизначеностей вимірювання.

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

АННОТАЦИЯ

Реут Д.Т. Метод и устройство для измерения концентрации микропланктона. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 "Приборы и методы контроля и определения состава веществ" - Национальный университет «Львовская политехника» МОН Украины, Львов, 2020.

Диссертация посвящена вопросам уменьшения времени измерения концентрации микропланктона в водах открытых водоемов путем создания метода автоматического определения концентрации микропланктона в непрерывном потоке воды и устройства, которое его реализует.

Осуществлен анализ и классификация существующих методов и средств измерения концентрации организмов микропланктона в воде открытых водоемов.

Разработан новый метод непрерывной идентификации и определения концентрации микроорганизмов, предусматривает анализ видеопотока с микроскопа с учетом изменений содержания поля зрения микроскопа со временем. Разработана база данных с параметрами, которые используются для распознавания отдельных классификационных групп микроорганизмов.

Разработано устройство для автоматического непрерывного измерения концентрации микропланктона в открытых водоемах на основе предложенного метода. Это портативное устройство имеет расширенные функциональные возможности, значительно меньшую продолжительность измерений по сравнению с другими известными средствами измерений.

Оценены точность измерения разработанным устройством. Проанализированы источники неопределенностей измерения.

Ключевые слова: концентрация микроорганизмов, биологические показатели качества воды, компьютерное зрение, обработка видеопотока, автоматическая микроскопия.

ABSTRACT

Reut D.T. Method and device for measuring the concentration of microplankton. - 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 dissertation is devoted to the issues of reducing the microplankton concentration measurement time in open water by creating a method for automatically determining the concentration of microplankton in a continuous water flow and a device that implements it.

The analysis and classification of existing methods and means of measuring the concentration of microplankton organisms in the water of open reservoirs is carried out.

New method for the continuous identification and determination of the concentration of microorganisms has been developed. It involves the analysis of the video stream from the microscope, taking into account changes in the content of the field of view of the microscope over time. The database with the parameters that are used to recognize individual classification groups of microorganisms has been developed.

A device has been developed for automatic continuous measurement of the concentration of microplankton in open water bodies based on the proposed method. This portable device has enhanced functionality, significantly shorter measurement times compared to other known measuring instruments.

The accuracy of measurement by the developed device is estimated. The sources of measurement uncertainties are analyzed.

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