

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Т.О. Єльнікова, Ю.О. Подчашинський

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ
ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДОЙМАХ**

Друкується за рішенням
Вченої ради
Державного університету
«Житомирська політехніка»
(протокол № 11
від «28» жовтня 2019р.)

Житомирська політехніка
2019

УДК 621.317
Є57

Рекомендовано до друку Вченою радою
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол № 11 від «28» жовтня 2019р.)

Рецензенти: д.т.н., проф. *Пількевич І.А.* (Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова); д.ф.-м.н., проф. *Москвін П.П.* (Державний університет «Житомирська політехніка»).

Єльнікова Т.О., Подчашинський Ю.О.
Є57 **Автоматизоване вимірювання геометричних параметрів та моделювання процесів розвитку фітопланктону у водоймах:** Монографія. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – 180 с.
ISBN 978-966-683-531-7

У монографії розроблено та досліджено методи вимірювання геометричних параметрів фітопланктону за його відеозображеннями. На цій основі створено математичні моделі та досліджено процеси розвитку фітопланктону у водоймах. Проведені дослідження спрямовані на вирішення актуальної наукової проблеми, що полягає у підвищенні точності та швидкодії, розширенні функціональних можливостей засобів контролю екологічного стану водойм на основі використання сучасних інформаційних технологій. Запропоновано автоматизовані методи формування та обробки відеозображень проб води з водойм, розроблено автоматизовану систему контролю за екологічним станом водойм господарсько-побутового призначення на основі аналізу відеозображень проб води, створено методики ідентифікації фітопланктону за видовим складом на основі вимірюваних геометричних параметрів, розроблено математичні моделі сезонної динаміки змін чисельності та видового складу фітопланктону у водоймах. Книга складається з п'яти розділів та буде корисною для магістрантів, аспірантів, докторантів та фахівців в галузях приладобудування та технологій захисту оточуючого середовища.

Обсяг 180 стор.; 50 іл.; 24 табл.; бібліогр. 145 назв.

УДК 621.317

ISBN 978-966-683-531-7

© Т.О. Єльнікова, 2019 р.
© Ю.О. Подчашинський, 2019 р.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ ЗА ЙОГО ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯМИ.....	15
1.1. Задачі по вимірюванню механічних величин, що виникають при контролі стану водойм господарсько-побутового призначення	15
1.2. Вимірювання механічних величин на основі відеозображень, що містять вимірювальну інформацію	20
1.3. Геометричні параметри об'єктів, що можуть бути визначені за їх відеозображеннями	25
1.4. Технічні засоби формування та обробки відеозображень з вимірювальною інформацією про механічні величини.....	32
1.5. Основні напрямки удосконалення методів вимірювань геометричних параметрів фітопланктону для водойм господарсько-побутового призначення	39
1.6. Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ ПРО ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ФІТОПЛАНКТОНУ	42
2.1. Обґрунтування можливостей отримання вимірювальної інформації про стан геометричних параметрів фітопланктону на основі цифрових відеозображень проб води з водойми	42
2.2. Ідентифікація та розрахунок маси фітопланктону на основі його геометричних параметрів	46
2.2.1. Основні принципи і методи ідентифікації фітопланктону	46
2.2.2. Аналіз вимірювальної інформації, що міститься у відеозображеннях проб води	51

2.2.3. Вибір набору геометричних параметрів для ідентифікації фітопланктону	53
2.3. Похибки вимірювань геометричних параметрів фітопланктону на відеозображеннях	54
2.3.1. Загальна характеристика похибок вимірювань	54
2.3.2. Математичні моделі похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	55
2.3.3. Заходи по зменшенню і компенсації похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	59
2.4. Висновки до розділу 2	61

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ ТА ЙОГО МАСИ.....	62
3.1. Обґрунтування можливостей побудови вимірювальної системи та вибір технічних засобів.....	62
3.2. Принципи побудови засобів вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями	69
3.3. Нейропроцесор як засіб обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону	75
3.4. Розробка методики формування та обробки вимірювальної відеоінформації про геометричні параметри фітопланктону.....	81
3.4.1. Відбір проб води для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	81
3.4.2. Послідовність перетворення та обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри.....	81
3.4.3. Попередня обробка відеозображень фітопланктону, що містять вимірювальну інформацію	84
3.5. Обробка вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону на основі штучних нейронних мереж.....	85
3.5.1. Відновлення відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри фітопланктону .	85
3.5.2. Сегментація кольорових відеозображень фітопланктону	85
3.5.3. Ідентифікація та розрахунок маси фітопланктону	88

3.6. Оцінка точнісних характеристик штучної нейронної мережі як засобу обробки вимірювальної інформації	99
3.7. Висновки до розділу 3	103
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ТА ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДОЙМАХ	
	105
4.1. Розробка математичної моделі процесів розвитку фітопланктону у водоймах за результатами вимірювань та ідентифікації його екземплярів	105
4.2. Фрактальне моделювання і стиснення цифрових відеозображень проб води з фітопланктоном	109
4.3. Визначення фрактальної розмірності цифрових відеозображень проб води з фітопланктоном	121
4.4. Висновки до розділу 4	124
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ	
	126
5.1. Послідовність накопичення та обробки вимірювальної відеоінформації про геометричні параметри фітопланктону...	126
5.2. Експериментальні дослідження похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	132
5.2.1. Методика розрахунку точності вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	132
5.2.2. Експериментальні дослідження похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	136
5.2.3. Оцінка та аналіз точнісних характеристик автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	142
5.3. Практичне використання автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	145

5.3.1. Загальна характеристика практичного використання автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону	145
5.3.2. Результати вимірювань геометричних параметрів фітопланктону та його ідентифікації.....	146
5.3.3. Встановлення закономірностей зміни геометричних параметрів фітопланктону та його маси	149
5.4. Висновки до розділу 5	153
ВИСНОВКИ	155
ДОДАТКИ.....	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	171

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ГП – геометричні параметри;

ГПФ – геометричні параметри фітопланктону;

ОВ – об'єкт вимірювань;

ПФВЗ – пристрій формування відеозображень;

ШНМ – штучна нейронна мережа;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

СТЗ – системи технічного зору;

f – функція активації ШНМ;

W_{ij} – ваговий коефіцієнт j -го входу i -го нейрона;

Y_i – сума нормованих коефіцієнтів входів i -го нейрона;

M – кількість нейронів у вхідному шарі ШНМ;

N – кількість нейронів у вихідному шарі ШНМ;

δ – допустима похибка вихідного сигналу ШНМ;

σ_{out} – середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу ШНМ;

φ – функція активації нелінійного перетворювача ШНМ;

A – вхідний сигнал нелінійного перетворювача ШНМ;

J_x, J_y, J_{xy} – моменти інерції об'єкту вимірювань;

d_e – еквівалентний діаметр об'єкту вимірювань;

k_c – коефіцієнт випуклості об'єкту вимірювань;

k_f – коефіцієнт заповнення об'єкту вимірювань;

R – індекс кореляції множинної регресії;

R^2 – індекс детермінації множинної регресії;

ВСТУП

Актуальною науковою проблемою у сучасному приладобудуванні є підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей засобів вимірювання механічних величин. В тому числі – це засоби вимірювання геометричних параметрів фітопланктону (ГПФ) за пробами води з водойм господарсько-побутового призначення. Розвиток фітопланктону у водоймах, тобто продукування органічної речовини під дією ряду природних та штучних факторів, є однією з серйозних екологічних проблем незалежної України. Найбільш інтенсивно розвиток фітопланктону протікає у водосховищах та інших водоймах господарсько-побутового призначення, що мають обмежену циркуляцію води. Наслідком цього процесу, який називають антропогенною евтрофікацією [1], є суттєве погіршення якості питної води та значне підвищення загальної кількості токсичних речовин у воді [2 – 4]. Тому розробка автоматизованої системи для вимірювань ГПФ в процесі його розвитку є актуальною науково-технічною задачею.

У монографії пропонується використовувати для визначення ГПФ цифрові відеозображення, кожне з яких містить двовимірну проекцію екземплярів фітопланктону у пробі води. Шляхом комп'ютеризованої обробки відеозображень визначаються геометричні параметри (ГП) вказаних об'єктів вимірювань (ОВ). В першу чергу – це поточні координати центру мас та інших характерних точок ОВ, їх кутове положення, а також ГП, що характеризують просторову форму ОВ. На основі цих даних у вимірювальній системі здійснюється ідентифікація екземплярів фітопланктону за видовим складом, оцінюється його маса та розраховуються інші показники, що характеризують екологічний стан водойм, в тому числі – кількість та маса екземплярів фітопланктону у 1 дм³ води.

Питанням вимірювання геометричних параметрів присвячені роботи відомих українських вчених Орнатського П.П., Новікова А.Н., Павленка Ю.Ф., Біленького Я.Є., Чабанова А.І., вчених близького та далекого зарубіжжя Соболева В.І., Стригіна В.В., Макарова І.М., Козирева Ю.Г., Раманаускаса В.А., Модестова М.Б., Ратмирова В.А. та інших [5 – 13]. Однак в цих роботах відсутні відомості про вимірювання ГПФ на основі алгоритмічної обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці параметри.

Основною перешкодою для оперативного здійснення контролю за станом водойм є застарілі відомі методи вимірювання ГПФ, розрахунку його чисельності та маси [2, 14 – 16]. Висока працемісткість, низька ефективність та швидкодія вказаних методів вимірювань не дозволяють швидко виявляти зміни, що відбуваються у розвитку ГПФ, та своєчасно реагувати на них. Тому виникла нагальна потреба в удосконаленні існуючих методів вимірювань та контролю за ГПФ.

Одним із ефективних методів вимірювань механічних величин є алгоритмічна обробка сигналів, які містять інформацію про об'єкт

вимірювань. Пропонується для визначення ГПФ перетворювати візуальну інформацію про ГПФ у відеозображення і виконувати алгоритмічну обробку отриманих відеозображень. З цією метою розроблено автоматизовану вимірювальну систему для визначення ГПФ та контролю за станом водойм господарсько-побутового призначення. Її застосування дозволить значно підвищити швидкодію та розширити функціональні можливості вимірювання геометричних параметрів та контролю за процесами розвитку фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення.

Вимірювання ГП виконуються в більшості галузей науки і промисловості за допомогою різних методів та засобів вимірювань [6, 7, 10, 17 – 22]. Питанням вимірювання геометричних параметрів та інших механічних величин, алгоритмічним методам підвищення точності результатів вимірювань присвячені праці українських та зарубіжних вчених [22 – 27]. Приклади сучасних засобів вимірювання механічних величин наведено в [26, 28]. Прикладами можливого практичного застосування інформаційно-вимірювальних систем з цифровими відеозображеннями для контролю екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення на основі відеозображень проб води можуть бути роботи [29 – 31]. Відповідного до кожного практичного застосування формується перелік ОВ та їх ГП, що визначаються вимірювальною системою.

В сучасних умовах постійно підвищуються вимоги до якості та надійності контролю екологічного стану довкілля. Для задоволення цих вимог необхідно постійно підвищувати науково-технічний рівень розробок засобів вимірювань, які використовуються для контролю екологічних параметрів. Це є складна і актуальна науково-технічна проблема для приладобудування. Все це обумовлює необхідність підвищення точності і швидкодії засобів вимірювання ГПФ.

Традиційним шляхом підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання ГП є удосконалення конструкції і технології виготовлення цих засобів [32]. Але, на теперішній час практично досягнута межа технологічних можливостей підвищення точності та швидкодії засобів вимірювань механічних величин.

Сучасним методом вимірювання ГП є формування, перетворення та алгоритмічна обробка сигналів, які містять корисну інформацію про ОВ [33 – 35]. У зв'язку з цим, перспективним напрямком удосконалення засобів вимірювань є використання можливостей сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій для формування та комп'ютеризованої обробки сигналів вимірювальної інформації (в тому числі – цифрових відеозображень) та результатів вимірювань.

Тому пропонується використовувати сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та технології візуалізації ОВ [36 – 38]. Ці технології включають формування, перетворення та комп'ютеризовану обробку відеозображень з вимірювальною інформацією про ГПФ. Застосування цих

технологій забезпечує підвищення точності і швидкодії, розширення функціональних можливостей нової автоматизованої вимірювальної системи для визначення ГПФ.

Носієм вимірювальної інформації про ГПФ в даному випадку є відеозображення, що одночасно характеризують стан ОВ на багатьох ділянках простору. В першу чергу, відеозображення містять дані про ГП цих об'єктів. Для отримання результатів вимірювання ГП необхідно сформувати цифровий масив даних, який являє собою двовимірний образ ОВ, ввести цей масив в цифрову ЕОМ та виконати його алгоритмічну обробку. Формування відеозображень з вимірювальною інформацією здійснює пристрій формування відеозображень (ПФВЗ), тобто цифрова відеокамера, цифровий фотоапарат, сканер тощо. Якщо в наявності є часова послідовність відеозображень з виміряними ГП, то на цій основі можна визначити інші механічні величини, що залежать від ГП.

Цифрове відеозображення, сформоване та оброблене сучасними технічними засобами за малий проміжок часу, може замінити результати десятків та сотень вимірювань, що проведені існуючими засобами вимірювань за значний період часу. Якщо сформована часова послідовність відеозображень, то вона детально характеризує швидкі зміни в часі властивостей ОВ. Таким чином, технології формування та комп'ютеризованої обробки відеозображень ОВ дозволяють суттєво підвищити швидкодію процедур вимірювання ГПФ і отримати значний обсяг вимірювальної інформації про екологічний стан водойм.

Формування, накопичення та комп'ютеризована обробка відеозображень в цифровій ЕОМ дозволяють зібрати та проаналізувати дуже значний об'єм цифрових даних про ГПФ.

Таким чином, автоматизована вимірювальна система, побудована на основі використання цифрових відеозображень, має підвищену точність та швидкодію, розширені функціональні можливості у порівнянні з існуючими засобами вимірювань екологічних параметрів.

Відеозображення ОВ застосовуються у ряді існуючих технічних систем:

1. Телевізійних вимірювальних системах, що використовуються для визначення ГП ОВ, кольору їх поверхні, переміщень цих об'єктів, а також для огляду оточуючого простору.

2. Системах технічного зору в робототехніці та інших галузях, що використовуються для визначення наявності об'єктів, ідентифікації їх форми та просторової орієнтації.

3. Оптичних та волоконно-оптичних системах, що використовуються для вимірювання ГП об'єктів, контролю їх розмірів, вимірювання малих переміщень, передачі вимірювальної інформації.

4. Лазерних системах та приладах, в тому числі – вимірювальних системах для визначення відстаней до об'єктів, системах контролю розмірів, лазерних скануючих приладах.

5. Засобах вимірювання механічних величин, що формують масив просторової вимірювальної інформації по окремим точкам. Наприклад, це прилади для вимірювання шорсткості та профілю поверхні, трикоординатні інформаційно-вимірювальні системи.

Але у всіх цих системах існує ряд недоліків, що не дозволяють в повній мірі використати переваги відеозображень з вимірювальною інформацією про ГП та параметри руху ОВ. Це такі недоліки:

- обмежені розподільча здатність, точність та швидкодія, що визначаються існуючими телевізійними стандартами та методами обробки відеозображень (телевізійні вимірювальні системи);

- в першу чергу вирішується задача ідентифікації об'єктів, але не приділяється достатньої уваги метрологічним характеристикам процедур вимірювання ГП цих об'єктів (системи технічного зору);

- відсутність або обмежене використання алгоритмічних методів обробки відеозображень (оптичні та волоконно-оптичні системи);

- отримання результатів вимірювань послідовно по окремим точкам простору (лазерні прилади, інформаційно-вимірювальні системи).

Існуючі алгоритмічні методи обробки відеозображень не враховують в повній мірі вимоги до метрологічних характеристик відеозображень. Це вимоги до точності визначення ГП на основі вимірювання координат контурів та опорних точок ОВ.

Існуючі методи алгоритмічної обробки вимірювальної інформації про механічні величини призначені в основному для обробки одновимірних сигналів. Існуючі рішення для двовимірних сигналів не використовують сучасні методи інформаційно-комп'ютерних технологій (наприклад, штучні нейронні мережі) і призначені в основному для підвищення візуальної якості відеозображень. Сучасні методи комп'ютеризованої обробки відеозображень [36 - 38] повинні бути удосконалені у відповідності до наукової проблеми та задач, що вирішуються при створенні автоматизованої вимірювальної системи для визначення ГПФ.

Також при створенні засобів вимірювання механічних величин перспективним є використання сучасних адаптивних та інтелектуальних засобів обробки відеозображень на основі теорії штучних нейронних мереж [39 – 41].

Дослідження, узагальнені в монографії, виконувались в процесі розробки автоматизованої системи для вимірювань ГПФ в рамках науково-дослідних робіт Державного університету «Житомирська політехніка».

Метою проведених досліджень є розширення функціональних можливостей і підвищення швидкодії засобів вимірювань ГПФ у водоймах шляхом розробки автоматизованої системи для вимірювань цих геометричних параметрів. Відповідно до мети, об'єктом дослідження є процеси вимірювання ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення новою

автоматизованою системою, а предметом дослідження – автоматизована система для вимірювань ГПФ у водоймах.

В ході досліджень послідовно вирішено науково-технічні задачі, що відображені в монографії:

1. Визначити завдання по контролю і спостереженню за процесами розвитку фітопланктону у водоймах, що потребують вимірювання ГПФ. Визначити перелік ГПФ, що можуть бути визначені на основі комп'ютеризованих методів формування, обробки та аналізу цифрових відеозображень проб води з водойм.

2. Дослідити перетворення вимірювальної відеоінформації в процесі вимірювань геометричних параметрів. Визначити похибки і викривлення, що мають вплив на точність вимірювань, розробити заходи по зменшенню цих похибок.

3. Розробити методику обробки вимірювальної інформації про стан екосистем водойм, що включає формування та цифрову обробку відеозображень проб води з водойм, визначити ГПФ та на цій основі виконати його ідентифікацію.

4. Створити автоматизовану систему для вимірювань ГПФ у водоймах, яка має розширені функціональні можливості і підвищену швидкодію у порівнянні із існуючими засобами вимірювань.

5. Обґрунтувати можливість та доцільність використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для обробки вимірювальної інформації про ГПФ та для проведення контролю за станом водного середовища.

6. Розробити математичні моделі процесів розвитку фітопланктону у водоймах та математичні моделі, що описують форму екземплярів фітопланктону на відеозображеннях, в тому числі – на основі фрактального опису. Виконати моделювання сезонної динаміки змін чисельності та видового складу фітопланктону у водоймах згідно розроблених математичних моделей.

7. Дослідити експериментально особливості змін ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення на основі ШНМ, як засобу обробки вимірювальної інформації. Визначити основні фактори, що впливають на ці процеси.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше створено новий метод вимірювань ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення. Цей метод базується на формуванні відеозображень ГПФ у пробах води з водойм та алгоритмічній обробці вимірювальної інформації.

2. Вперше запропоновано використання математичного апарату ШНМ для вимірювання геометричних параметрів та контролю за станом фітопланктону у водоймах.

3. Удосконалено методи автоматизованої обробки двовимірної вимірювальної інформації про розвиток ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення.

4. Вперше шляхом обробки вимірювальної відеоінформації виявлено ряд особливостей зміни ГПФ, що мають вплив на стан водойм господарсько-побутового призначення.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено автоматизовану систему для вимірювань ГПФ. Ця система застосовується для дослідження та контролю стану водойм господарсько-побутового призначення, які є джерелом водопостачання населення.

2. Розроблено і обґрунтовано методику ідентифікації видового складу фітопланктону за його геометричними параметрами на основі використання інформаційно-комп'ютерних технологій і ШНМ.

3. Розроблено і обґрунтовано методику визначення кількості та маси фітопланктону на основі вимірювань його геометричних параметрів. Отримані результати дозволяють здійснювати контроль за станом водойм господарсько-побутового призначення.

4. За результатами вимірювань розроблено комплекс практичних заходів щодо контролю за процесами зміни ГПФ та їх впливом на якість питної води для основних джерел водопостачання м. Житомира.

5. Практичні результати досліджень в формі автоматизованої вимірювальної системи можуть бути використані для контролю за екологічним станом водойм господарсько-побутового призначення.

В першому розділі монографії визначено завдання по контролю і спостереженню за процесами розвитку фітопланктону у водоймах, що потребують вимірювання його геометричних параметрів та маси. Існуючі засоби розв'язання даних задач мають недостатню швидкодію і обмежені функціональні можливості, в тому числі по обробці відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ, по обробці і збереженню результатів вимірювань. Визначено перелік ГПФ, що можуть бути визначені на основі комп'ютеризованих методів формування, обробки та аналізу цифрових відеозображень проб води з водойм. Досліджено сучасні технічні засоби формування відеозображень, що використовуються для вимірювань ГПФ та його маси. Визначено перспективні напрямки досліджень.

В другому розділі обґрунтовано можливість отримання вимірювальної інформації про стан ГПФ на основі цифрових відеозображень проб води з водойм господарсько-побутового призначення. Визначено перелік похибок, що виникають в процесі перетворення вимірювальної відеоінформації і мають вплив на точність вимірювань ГПФ. Запропоновано заходи по зменшенню і компенсації цих похибок. Також розроблено метод ідентифікації та визначення маси фітопланктону на основі результатів вимірювань ГПФ.

В третьому розділі обґрунтовано можливості та визначено основні принципи побудови засобів вимірювання ГПФ за відеозображеннями проб води з водойм господарсько-побутового призначення. Розроблено автоматизовану вимірювальну систему для визначення ГПФ і його маси у водоймах. Розроблено методики обробки вимірювальної інформації про ГПФ. Обґрунтовано використання ШНМ для вимірювань геометричних параметрів та обробки результатів цих вимірювань, в тому числі для ідентифікації фітопланктону у водоймах. Визначено технічні засоби для реалізації ШНМ та похибки цих мереж при обробці вимірювальної інформації про ГПФ та його масу.

В четвертому розділі розроблено математичні моделі процесів розвитку фітопланктону у водоймах та математичні моделі, що описують форму екземплярів фітопланктону на відеозображеннях, в тому числі – на основі фрактального опису. Виконано моделювання сезонної динаміки змін чисельності та видового складу фітопланктону у водоймах згідно розроблених математичних моделей.

В п'ятому розділі виконано експериментальні дослідження і розглянуто практичне використання вимірювань ГПФ і його маси у водоймах господарсько-побутового призначення. Результатами експериментальних досліджень підтверджено достовірність запропонованих теоретичних положень та методу вимірювань ГПФ і його маси. Розглянуто практичне використання розробленої автоматизованої вимірювальної системи для дослідження процесів змін ГПФ у водоймах. За результатами вимірювань виконано моделювання та розроблено комплекс практичних заходів по покращенню якості питної води для основних джерел водопостачання м. Житомира.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ ЗА ЙОГО ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯМИ

При дослідженні і контролі за станом водойм господарсько-побутового призначення необхідно вимірювати ГПФ у пробах води з цих водойм. Результати вимірювань ГПФ використовуються для ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону, а також для визначення на цій основі поточного стану водойм господарсько-побутового призначення. Тому розробка методів і засобів вимірювань ГПФ є актуальною науково-технічною задачею.

В даному розділі:

- встановлено, що існуючі методи вимірювань та контролю стану водойм господарсько-побутового призначення мають високу працездатність та низьку ефективність, так як ґрунтовані на застарілих методах вимірювання ГПФ, ідентифікації фітопланктону, розрахунку його чисельності та маси. Це зумовлює необхідність проведення наукових досліджень в даній області;
- обґрунтовано можливість вимірювання ГПФ на основі відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці параметри;
- визначено основні технічні засоби формування та обробки відеозображень з вимірювальною інформацією про ГПФ;
- визначено основні напрямки удосконалення методів вимірювань ГПФ, ідентифікації та розрахунку його маси для водойм господарсько-побутового призначення.

1.1. Задачі по вимірюванню механічних величин, що виникають при контролі стану водойм господарсько-побутового призначення

Важливою складовою частиною будь-якої водойми господарсько-побутового призначення є фітопланктон, що населяє дану водойму. Фітопланктон складається з великої кількості різних видів водоростей мікроскопічних розмірів, що надають воді зелений відтінок. Кількість фітопланктону, його геометричні параметри та маса є важливою характеристикою стану водойм господарсько-побутового призначення. Тому при контролі за станом водоймами господарсько-побутового призначення та за якістю питної води з цих водойм необхідно постійно вимірювати вказані механічні величини. Точні і своєчасні вимірювання ГПФ можливо здійснити тільки на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки вимірювальної інформації, що міститься у відеозображеннях проб води з водойми.

Основою досліджень екосистеми водоймищ є методики відбору проб води, їх обробки в лабораторії та розрахунку показників стану екосистеми водоймищ. Однак вказані методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, ручний підрахунок кількості екземплярів фітопланктону, визначення їх розмірів та подальший розрахунок потрібних

показників. Вказані методики мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з використанням ручної праці.

Кількісні дослідження фітопланктону починається з вимірювання його геометричних параметрів. Після цього виконується підрахунок чисельності і маси кожного виду водоростей, що входять до складу фітопланктону водойми. Потім підраховується загальна чисельність і маса фітопланктону. Далі йде розрахунок показників та індексів, що характеризують загальний стан водойми господарсько-побутового призначення. Побудова математичних моделей та залежностей, що характеризують процеси зміни ГПФ та його маси, якісне та кількісне різноманіття фітопланктону у даній водоймі, дозволяють оцінити поточний стан цієї водойми, встановити вплив різноманітних чинників та [42 – 47].

В існуючих методиках вимірювань ГПФ для опрацювання проб води з водойм використовується світлові мікроскопи різних марок. Найбільш розповсюдженим є мікроскопи марки МБИ. Основна вимога до мікроскопу – це велике збільшення зображень фітопланктону, не гірше ніж $100^{\times} \dots 200^{\times}$ [15, 48].

Підрахунок чисельності фітопланктону та визначення його геометричних параметрів проводять у спеціальних лічильних камерах, що входять до складу обладнання мікроскопу. При відсутності камер підрахунок водоростей можна проводити на скляних пластинах, розграфлених для зручності і більшої точності підрахунку кількості водоростей на смуги та квадрати. Основна вимога – це точне дозування об'єму проби води, що наноситься на пластину. Для цього використовують спеціальні штепель-піпетки, розраховані на фіксований об'єм, що складає, як правило, $0,1 \text{ см}^3$ [14, 16]. Перед початком підрахунків проба добре перемішується, наноситься на дно камери або на скляну пластину, щільно прикривається покривним склом і розміщується на предметному столику мікроскопа. Паралельно з вимірюванням геометричних параметрів кожного екземпляра фітопланктону виконується його класифікація, результати якої необхідні при подальшому визначенні маси фітопланктону [15, 16].

Для вимірювань ГПФ його екземпляри прирівнюють до певних, найбільш подібних до даного виду фітопланктону, геометричних тіл: кулі, паралелепіпеду, циліндру, конусу тощо. Далі проводять вимірювання необхідних геометричних параметрів екземплярів фітопланктону: радіусу, діаметру, висоти, довжини тощо. Вимірювання вказаних ГПФ у існуючих методиках виконується за допомогою окуляр-мікрометра з вимірювальною лінійкою, що входять до складу мікроскопа [14 – 16].

Існують універсальні програми обробки відеозображень, отриманих за допомогою сучасних мікроскопів та відеокамер, але в них відсутнє врахування особливостей задачі вимірювань ГПФ, що розглядається в даній роботі. Тому потрібно визначити набір та параметри процедур обробки відеозображень, що дозволяють вимірювати ГПФ та його масу у пробах води, а також визначити

заходи по використанню результатів вимірювань в процедурах моделювання та прогнозу стану водойм господарсько-побутового призначення. Також потрібно сформулювати вимоги до апаратних засобів формування відеозображень, які дозволяють визначити ГПФ із заданою точністю.

Широке розповсюдження інформаційно-комп'ютерної техніки призвело до створення різноманітних апаратних засобів одержання цифрових відеозображень. Ці засоби цілком здатні забезпечити отримання якісних відеозображень проб води, розміщених у мікроскопі. Основними з цих засобів є цифрові фотоапарати і цифрові відеокамери. Вони можуть бути використані для формування цифрових відеозображень проб води з фітопланктоном. Отримані таким чином відеозображення придатні до алгоритмічної обробки з метою визначення ГПФ, його кількості і маси. Саме ці показники є початковими даними для розрахунку інтегральних показників стану водойм, в тому числі маси фітопланктону в середньому на 1 дм³.

Слід зауважити, що результати вимірювань ГПФ та його маси на основі відеозображень проб води, використовуються для вирішення багатьох наукових і виробничих задач. Наприклад, важливою виробничою задачею є забезпечення якісного водопостачання населених пунктів. Це не можливо без контролю за процесами розвитку фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення, що використовуються для водопостачання.

Математична модель, що побудована на основі цих результатів вимірювань і розрахунків, дозволяє прогнозувати розвиток фітопланктону та вживати запобіжних заходів у разі необхідності при інтенсивному розвитку фітопланктону. Адже потенційні можливості фітопланктону до розмноження є досить високими, і процес розмноження здатен дуже швидко виходити з під контролю і досягати катастрофічних масштабів. Стан водойми господарсько-побутового призначення при цьому суттєво змінюється, що в кінцевому рахунку призводить до значного погіршення якості питної води.

Таким чином, необхідна розробка нової автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси на основі сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій (рис. 1.1). В ході розробки потрібно перевести процедури ідентифікації фітопланктону за видовим складом, процедури визначення його маси, процедури розрахунку інтегральних показників стану водойм на нову технічну та алгоритмічну базу. Це сприяє зменшенню трудомісткості вимірювань ГПФ, забезпечує підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей засобів вимірювань ГПФ та його маси.

Проведення вимірювань ГПФ та його маси в засобах вимірювань, що розробляються, базується на таких принципах:

– використання стандартних технічних засобів формування і обробки цифрових відеозображень;

- використання алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації та забезпечення на цій основі потрібних функціональних можливостей і точнісних характеристик засобів вимірювань ГПФ;
- пошук і вибір потрібних параметрів алгоритмів цифрової обробки відеозображень, виходячи з особливостей задачі вимірювань ГПФ та його маси, удосконалення цих алгоритмів;
- застосування штучних нейронних мереж для обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ;
- практична реалізація нейромережових алгоритмів обробки вимірювальної інформації на основі нейропроцесора в складі цифрової ЕОМ, що забезпечує потрібну швидкодію засобів вимірювань ГПФ та його маси;
- застосування стиснення відеозображень, без якого неможлива реєстрація та введення в обчислювальний пристрій наявного обсягу вимірювальної відеоінформації, а також компактне зберігання цього обсягу відеоінформації.

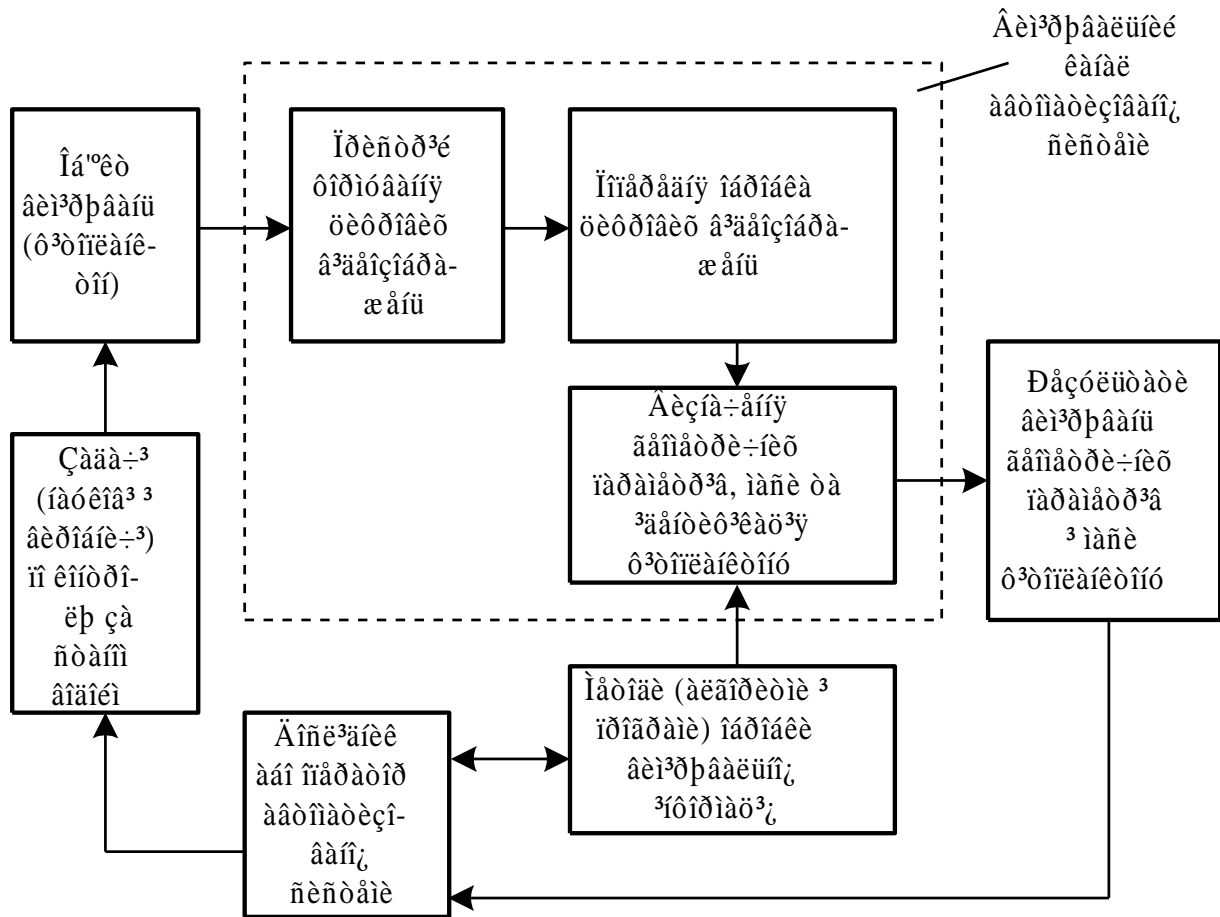


Рис. 1.1. Загальна схема вимірювань ГПФ

Відеозображення фітопланктону, отримані після фільтрації шумів та сегментації, потрібно класифікувати, тобто визначити належність кожного

екземпляра фітопланктону до одного з відомих видів. Це необхідно для подальшого розрахунку маси фітопланктону, так як на визначення об'єму і маси клітин фітопланктону суттєво впливає їх форма, що є специфічної для кожного з видів. Така класифікація може бути виконана на основі ГПФ, які можна визначити по його відеозображенням.

Відомі декілька методів класифікації об'єктів вимірювань по їх відеозображенням. Це методи на основі геометричних параметрів об'єктів та структурно-синтаксичні методи. Методи на основі геометричних параметрів базуються на визначенні кількісних ознак, що є інваріантними до масштабування, зсуву та пороту об'єкта вимірювань на відеозображенні. Ці кількісні ознаки характеризують узагальнено форму об'єктів вимірювань. Структурно-синтаксичні методи основані на визначенні структурних відносин між фрагментами відеозображень об'єктів і використовують апарат дискретної математики. Оскільки в даному випадку форма екземплярів фітопланктону є відносно простою і окремі його екземпляри розглядаються незалежно один від одного, то доцільно використовувати метод геометричних параметрів.

Для побудови математичної моделі процесів розвитку фітопланктону та змін його геометричних параметрів потрібні такі показники, як кількісний і якісний склад фітопланктону та його маса. Визначення якісного та кількісного складу фітопланктону проводиться на основі результатів його ідентифікації за видовим складом [2, 49 – 52].

Маса фітопланктону визначається розрахунково-об'ємним методом. Необхідною умовою для цього є наявність даних по чисельності різних видів фітопланктону у пробах води і геометричні параметри його екземплярів [15, 16].

Для отримання точних даних необхідно проводити вимірювання геометричних параметрів не менш як 30 екземплярів фітопланктону одного виду. Отримані дані опрацьовуються статистично. Визначення об'єму екземплярів фітопланктону проводять по відомих геометричних формулам на основі отриманих ГПФ. Відносну густину екземплярів фітопланктону (відносно води) приймають рівною 1,00...1,05 в залежності від виду. Результати вимірювань маси приводять у мг/дм³ або у г/м³ [53, 54].

На основі результатів вимірювань ГПФ визначаються інтегральні показники стану і розвитку фітопланктону як складової частини водойм. Найбільш інформативними і поширеними структурно-функціональними показниками стану фітопланктону є видове, таксономічне, екологічне, інформаційне та кількісне різноманіття, характеристика структури чисельності угруповань та маса [15, 55].

Питна вода повинна бути безпечною у санітарному та епідеміологічному відношенні. Це досягається за рахунок регламентації ряду показників (органолептичних, хімічних, радіологічних, мікробіологічних та ін.), які мають відповідати сучасним вимогам санітарного законодавства [15,

54, 56]. Гігієнічна регламентація дає змогу визначити граничні значення вмісту шкідливих речовин та фітопланктону, за яких вони не справляють негативного впливу на організм людини і тварин. В основу такої регламентації покладена система нормування рівнів концентрації вказаних домішок та забруднювачів з використанням наступних видів стандартних показників [15]:

- гранично допустимих концентрацій (ГДК);
- орієнтовно безпечних рівнів впливу (ОБРВ);
- максимально допустимих рівнів (МДР);
- допустимих залишкових кількостей (ДЗК);
- орієнтовно допустимих рівнів (ОДР)
- гранично допустимих рівнів (ГДР) і т.п.

ГДК забруднюючої речовини або домішок у водоймах відповідають рівню забруднення, який виключає шкідливий вплив на організм людини та можливість обмеження або порушення нормальних умов господарсько-питного, культурно-побутового та інших видів водокористування. При перебільшенні ГДК вода стає непридатною для одного чи декількох видів водокористування. Для водойм також встановлено роздільне нормування величин ГДК в залежності від категорій водокористування. [15, 42, 57].

Таким чином, основними недоліками існуючих методів вимірювань ГПФ є їх велика трудомісткість, низька швидкодія та обмежені функціональні можливості. Подолання цих недоліків можливе шляхом застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень з урахуванням особливостей вимірювань, що виконуються.

1.2. Вимірювання механічних величин на основі відеозображень, що містять вимірювальну інформацію

Одним із ефективних методів вимірювань механічних величин є формування та алгоритмічна обробка сигналів, які містять інформацію про об'єкт вимірювань. Найбільш інформативними є двовимірні сигнали, що містять інформацію про зміни механічних величин в просторі та в часі.

Вимірювальна інформація про механічні величини міститься в цифрових відеозображеннях об'єктів вимірювань. В тому числі це є двовимірною вимірювальною інформацією про ГПФ. Якщо в наявності є послідовність відеозображень, що відповідають певним моментам часу, то на цій основі можуть бути обчислені переміщення екземплярів фітопланктону та зміни ГПФ у часі. Для отримання двовимірної вимірювальної інформації про ГПФ необхідно сформувати цифрове відеозображення, яке містить екземпляри фітопланктону, ввести це відеозображення в ЕОМ та виконати його алгоритмічну обробку. Алгоритмічна обробка таких відеозображень за допомогою цифрової ЕОМ дозволяє отримати результати вимірювань ГПФ та його маси.

Практичне використання даного методу вимірювань ГПФ потребує забезпечення більш високої точності і швидкодії у порівнянні з існуючими методами. Основою підвищення точності і швидкодії є врахування всіх похибок вимірювань з подальшою розробкою заходів по їх компенсації та зменшенню.

В останні роки область використання цифрової обробки зображень значно розширилась. Це сприяло підвищенню інтересу до цифрових та оптичних методів обробки зображень. В наш час велика увага приділяється підвищенню ефективності та якості наукових розробок, досліджень, а також удосконаленню виробничо-технологічних процесів на основі широкого впровадження засобів обчислювальної техніки, автоматизованих систем управління та цифрової обробки інформації. Не залишилась поза увагою і галузь вимірювань геометричних величин.

Широке розповсюдження інформаційно-комп'ютерних технологій призвело до створення різноманітних апаратних засобів одержання цифрових відеозображень. Ці засоби цілком здатні забезпечити отримання відеозображень об'єктів вимірювань. Основними з цих засобів є цифрові фотоапарати і цифрові відеокамери [58, 59]. Всі вони можуть бути використані для формування цифрових відеозображень об'єктів вимірювань. Отримані відеозображення придатні до алгоритмічної обробки з метою визначення геометричних характеристик об'єктів вимірювань.

Цифрова обробка відеозображень виконується за допомогою цифрових ЕОМ (персональних комп'ютерів), але існують також і оптичні цифрові системи обробки зображень.

В оптичних системах здійснюється багатоканальна паралельна обробка візуальної інформації з досить високою швидкістю, однак точність такої обробки нижче, ніж у цифрових ЕОМ. В той же час швидкість обробки візуальної інформації в цифрових ЕОМ нижче, ніж в оптичних системах.

Проте швидкодія цифрових ЕОМ безупинно підвищується, поліпшуються функціональні можливості засобів введення-виведення, розвивається програмне забезпечення, з'являються функції паралельної обробки.

Перераховані властивості цифрових ЕОМ, а також їх більш широкі і гнучкі функціональні можливості привели до того, що в даний час в системах машинного зору (СМЗ) в більшості випадків використовується цифрові ЕОМ для обробки відеозображень [20, 60, 61 – 63].

СТЗ складаються з відеокамери, що формує відеозображення, пристрою введення відеозображення в ЕОМ, самої ЕОМ і пристрою керування рухом, який дозволяє переміщувати відеокамеру в просторі.

Для введення в ЕОМ відеозображення використовується пристрій введення відеозображень і відеокамера або цифровий фотоапарат. Ця частина системи вирішує задачі "технічного зору". Виходячи з конкретної задачі, можуть використовуватися, як складні (можливе підключення декількох

відеокамер), так і найпростіші пристрої. Це дозволяє створити систему для конкретної прикладної задачі з оптимальною вартістю.

Для переміщення відеокамери використовується пристрій керування рухом. Можливості цього пристрою теж дуже широкі. Якщо необхідний рух у площині, то використовується пристрій на дві осі руху. Якщо необхідно керувати рухом по складній просторовій траєкторії – на шість осей руху. Усе це дозволяє вибрати пристрій для конкретної прикладної задачі.

Для роботи з відеозображеннями використовується бібліотека функцій, що дозволяє одержувати необхідну інформацію з відеозображень, що надходять в систему. За допомогою цієї бібліотеки можна проводити відновлення зображень, що містять шуми, згладжувати контури об'єктів, виконувати сегментацію і кількісний аналіз образів, що надходять в систему. Великий набір функцій дозволяє одержувати після обробки відеозображення достатньої якості без використання дуже складних і дорогих відеокамер.

Відеозображення містять інформацію про такі механічні величини, як лінійні і кутові розміри і переміщення об'єктів вимірювань. Для вимірювання цих величин необхідно виділити на відеозображенні потрібний об'єкт (наприклад, екземпляр фітопланктону) і визначити координати точок, що утворюють зовнішній контур цього об'єкта. Потім необхідно порівняти ці координати для протилежних країв об'єкту або для послідовності відеозображень, на яких зафіксовано переміщення цього об'єкту. Розв'язання цієї задачі доцільно проводити на основі відомостей, викладених в [64 – 69].

Лінійна відстань між двома опорними точками з координатами (x_i, y_i) і (x_j, y_j) , що належать контуру об'єкта, визначається за формулою [65, 68]:

$$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}.$$

Якщо вимірюється лінійне переміщення об'єкта, то для обчислень використовуються координати опорної точки, визначені для різних відеозображень в межах послідовності відеозображень.

Якщо вимірюється переміщення по горизонталі ($y_i = y_j$) або по вертикалі ($x_i = x_j$), то $d = x_j - x_i$ або $d = y_j - y_i$.

Визначення кутових величин виконується на основі координат двох опорних точок за формулою

$$\gamma = \arctg \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}.$$

Можливі два методи пошуку і виділення об'єктів на зображенні:

– на основі виділення контурів (контурних ознак зображення) з подальшим переходом до символічного опису зображення;

– на основі розподілу зображення на об'єкт і фон шляхом сегментації.

Перший метод більш складний, потребує більшого об'єму обчислень і призначений для обробки зображень, які:

– містять багато об'єктів складної форми;

– мають недостатню якість, обумовлену об'єктивними обставинами, наприклад, низький контраст об'єктів і фону через недостатнє освітлення або значний рівень шумів.

Другий метод базується на сегментації зображень. Сегментація зображення [68] – розподіл зображення на області за ознакою подібності властивостей їх точок. Найбільш часто сегментацію проводять по яскравості на основі порогового значення яскравості. Пороговий розподіл напівтонового зображення на області за ознакою їх яскравості також має назву бінарзації зображення [64].

Важлива задача при сегментації зображення – це вибір порогового значення яскравості, що розділяє зображення на об'єкт і фон.

Відомо багато різних емпіричних і аналітичних підходів до визначення порогу яскравості, вибір яких залежить від властивостей конкретного типу зображень, потрібної точності і швидкості обробки [68]. Існують способи глобального і локального порогового розподілу зображень.

При аналітичному підході порогове обмеження формується в процесі обробки зображення на основі одного з таких способів:

- побудова гістограми розподілу яскравості точок зображення;
- визначення максимального значення яскравості зображення;
- обчислення середнього значення яскравості у вікні;
- кореляційний аналізу зображення, тощо.

Більшість способів визначення порогу яскравості орієнтовані на високу вірогідність безпомилкового виявлення об'єкта і низьку вірогідність помилкового виявлення об'єкта на зображенні, що має деякий рівень шуму, але не орієнтовані на задачу геометричних вимірювань.

При вимірюваннях ГПФ потрібна якість зображення забезпечується вибором відповідних технічних засобів і створенням відповідних умов для проведення вимірювань. Також заздалегідь відомо, які об'єкти є на відеозображенні. Потрібно визначити координати контурних точок цих об'єктів. Ці координати доцільно визначати на основі порівняння яскравостей точок в рядку цифрового відеозображення з пороговим значенням. Тому необхідно розробити відповідний метод визначення координат контурних точок об'єкта, що деформується. Цей метод повинен забезпечити високу точність геометричних вимірювань і враховувати особливості відеозображень процесів деформації.

Взагалі, подібний підхід можливо використовувати для вимірювань різноманітних механічних величин, включаючи лінійні розміри об'єктів вимірювань, інші геометричні параметри, їх переміщення тощо (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Визначення ГПФ на відеозображеннях шляхом алгоритмічної обробки

Геометричні параметри, що вимірюються	Похибки початкових даних	Похибка результатів обчислень			Апаратні засоби для обчислень	Швидкодія методів
		трансформована	методична	виконання обчислень		
1	2	3	4	5	6	7
1. Лінійні розміри екземплярів фітопланктону $w = x_j - x_i$, $h = y_j - y_i$	Похибки визначення координат контурних точок екземплярів фітопланктону	+	-	+	Цифрова ЕОМ, мікроконтролер	Висока
2. Відстань між двома опорними точками екземплярів фітопланктону $d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$	Похибки визначення координат контурних точок екземплярів фітопланктону	+	+	+	Цифрова ЕОМ, мікроконтролер	Висока
3. Площа $S = N$, де N – кількість дискретних точок, що належать фітопланктону	Визначаються похибками процедур сегментації або виділення контурів	+	-	-	Цифрова ЕОМ, мікроконтролер	Висока
4. Визначення кутового положення екземплярів фітопланктону	Похибки визначення координат контурних точок екземплярів фітопланктону	+*	+*	+	Цифрова ЕОМ, мікроконтролер	Висока або середня
5. Лінійні та кутові переміщення екземплярів фітопланктону	Похибки визначення координат контурних точок екземплярів фітопланктону та фіксації відліків часу	+	-	+	Цифрова ЕОМ, мікроконтролер	Висока

Примітка. * – дані складові похибки результатів вимірювань суттєво зменшуються із збільшенням кількості дискретних точок, що використовуються для обчислень.

Таким чином, автоматизувавши за допомогою інформаційно-комп'ютерних технологій процеси вимірювань ГПФ, проведення ідентифікації фітопланктону за видовим складом та визначення показників, що характеризують стан водних екосистем, можна не тільки заощадити в часі та зменшити трудомісткість досліджень, але й забезпечити підвищення якості досліджень та точності отриманих результатів.

1.3. Геометричні параметри об'єктів, що можуть бути визначені за їх відеозображеннями

Поверхня об'єкта вимірювань (ОВ) може бути охарактеризована двовимірною функцією $f_0(x, y)$, де x і y – просторові координати в площині цієї поверхні, а значення функції f_0 для кожної пари координат (x, y) є мірою яскравості поверхні ОВ в точці з цими координатами. Використання двох просторових координат обумовлено тим, що для вимірювань у вимірювальній системі формується цифрове відеозображення, яке представляє собою двовимірну проекцію початкового тривимірного ОВ. Тому будемо вважати ОВ плоскою геометричною фігурою, що розташована в площині відеозображення.

Проба води розташована в полі зору оптичної системи пристрою формування відеозображень (ПФВЗ) і проектується цією системою в площину початкового відеозображення $f_0(x_{вз}, y_{вз})$, де $x_{вз}$ і $y_{вз}$ – просторові координати в площині початкового відеозображення. Ця площина співпадає з світлочутливою поверхнею перетворювача «світло-сигнал» в складі ПФВЗ.

При формування відеозображень виникають геометричні похибки [38, 70, 71], обумовлені: дисторсією оптичної системи; неперпендикулярністю плоскої поверхні ОВ і оптичної осі ПФВЗ; відмінностями форми поверхні ОВ від площини. В результаті на поверхні перетворювача «світло-сигнал» отримуємо відеозображення $f_{ос}(x_{вз}, y_{вз})$ з геометричними похибками. Також слід враховувати наявність динамічних похибок відеозображень в оптичній системі, що характеризується функцією розсіювання точки, в перетворювачі «світло-сигнал» і електронних схемах, що характеризуються інерційними властивостями при швидких змінах амплітуди відеосигналу в зоні контурів ОВ. Окрім того, всі ці блоки ПФВЗ додають випадкові похибки $\xi(x_{вз}, y_{вз})$ до відеозображення. В результаті отримуємо відеозображення $f_{д}(x_{вз}, y_{вз})$, що містить геометричні та динамічні похибки, та відеозображення на виході ПФВЗ $f_{н}(x_{вз}, y_{вз}) = f_{д}(x_{вз}, y_{вз}) + \xi(x_{вз}, y_{вз})$ з випадковими похибками.

Перетворювачі «світло-сигнал» сучасних ПФВЗ (цифрових відеокамер і фотоапаратів) представляють собою матрицю світлочутливих елементів. Така

матриця разом з аналого-цифровим перетворювачем відеосигналу (в складі ПФВЗ) формує цифрове відеозображення $f_H(n, m)$, яке є двовимірним масивом (матрицею) відліків яскравості, значення яких квантовані за амплітудою. В даному випадку: n, m – порядкові номери (індекси) дискретних відліків амплітуди відеосигналу в рядках і стовбцях цифрового відеозображення ОВ, $n \in \overline{1, N}$, $m \in \overline{1, M}$; N, M – кількість дискретних відліків амплітуди відеосигналу в рядках та стовбцях цифрового відеозображення, що визначає розміри цифрового відеозображення в дискретних точках (д.т.). Цифрове відеозображення $f_H(n, m)$ є представленням у цифровій формі відеозображення $f_H(x_{вз}, y_{вз})$ на виході ПФВЗ.

Цифрове відеозображення $f_H(n, m)$ з виходу ПФВЗ передається в цифрову ЕОМ. Для ахроматичної поверхні ОВ достатньо одного напівтонового цифрового відеозображення $f_H(n, m)$, що характеризує яскравість точок цієї поверхні. Для хроматичної поверхні ОВ формується кольорове цифрове відеозображення, що містить 3 канали (3 цифрових монохромних відеозображення) і характеризує яскравість і колір поверхні ОВ за певною колориметричною системою. Найпоширенішою є колориметрична система RGB (R, G і B – відповідно червоний, зелений і синій кольори, а яскравість $Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$ [68, 72]. Всі положення і методи комп'ютеризованої обробки відеозображень застосовуються як до напівтонового цифрового відеозображення $f_H(n, m)$, так і до кожного з каналів кольорового цифрового відеозображення.

В цифровій ЕОМ виконується алгоритмічна компенсація похибок на цифровому відеозображенні $f_H(n, m)$. В результаті послідовно отримуємо цифрові відеозображення $\hat{f}_D(n, m)$, $\hat{f}_{oc}(n, m)$ і $\hat{f}_0(n, m)$, що є обчисленими у цифровій формі оцінками відеозображень $f_D(x_{вз}, y_{вз})$, $f_{oc}(x_{вз}, y_{вз})$ і $f_0(x_{вз}, y_{вз})$. З урахуванням коефіцієнта збільшення оптичної системи ПФВЗ цифрове відеозображення $\hat{f}_0(n, m)$ також є обчисленою оцінкою двовимірної функції $f_0(x, y)$, що характеризує поверхню ОВ.

Елементи (точки) цифрового відеозображення $\hat{f}_0(n, m)$ з індексами (n, m) характеризують яскравість точок початкового відеозображення $f_0(x_{вз}, y_{вз})$ з координатами [37, 38] $x_{вз} = n \cdot \delta_{x1}$, $y_{вз} = m \cdot \delta_{y1}$, де δ_{x1} і δ_{y1} – відстань по горизонталі і вертикалі між центрами сусідніх світлочутливих елементів перетворювача «світло-сигнал».

Якщо відомий коефіцієнт збільшення оптичної системи k_{moc} [38], то

$$x = x_{вз} / k_{moc} = n \cdot \delta_x, \quad y = y_{вз} / k_{moc} = m \cdot \delta_y,$$

де δ_x і δ_y – крок дискретності просторових координат x і y в площині поверхні ОВ, що відповідає відстані в 1 д.т. на цифровому відеозображенні $f_0(n, m)$.

Для вимірювань ГП у вимірювальній системі використовується цифрове відеозображення $\hat{f}_0(n, m)$. Перед вимірюваннями ГП на цьому відеозображенні виділяють область $Q_{ОВ}$, що належить ОВ. Можливі два методи пошуку і виділення ОВ [36, 68, 72], які здійснюються:

- шляхом розподілу відеозображення на ОВ і фон;
- шляхом виділення контурів ОВ з подальшою побудовою областей, що належать цьому об'єкту.

Основою першого методу є алгоритмічна процедура сегментації відеозображень [68], тобто їх розподіл на області з подібними властивостями. Найчастіше сегментацію проводять на основі значень яскравості або кольору дискретних точок цифрового відеозображення. Для визначення належності дискретних точок цифрового відеозображення ОВ і фону доцільно порівнювати яскравість або колір цих точок з пороговими значеннями. Порогове значення повинно забезпечити точне визначення ГП ОВ і дорівнює середині висоти перепаду яскравості, що утворює контур ОВ. Другий метод [68, 72] більш складний, має меншу швидкодію і призначений для обробки цифрових відеозображень, які мають низьку якість.

Тому у вимірювальній системі пошук ОВ доцільно виконувати шляхом розподілу цифрового відеозображення на області ОВ і фону. При цьому потрібно враховувати те, що цифрові відеозображення $\hat{f}_0(n, m)$ є кольоровими растровими графічними зображеннями. Тому для сегментації використовуються значення кольору, що характеризують ОВ та фон. Адаптацію цього методу до впливу несприятливих та нестационарних факторів можна реалізувати на основі штучних нейронних мереж. Для ОВ, що мають ахроматичну поверхню, можливе перетворення кольорового відеозображення у напівтонове відеозображення [72] з подальшою сегментацією на основі значень яскравості.

Цифрове відеозображення після виділення ОВ має вигляд [36, 38]:

$$\hat{f}_{0\text{сегм}}(n, m) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{f}_0(n, m) \in Q_{ОВ}, \\ 0, & \text{якщо } \hat{f}_0(n, m) \notin Q_{ОВ}. \end{cases} \quad (1.1)$$

Основою процесу вимірювання ГП є рівняння вимірювань та рівняння похибок [73]. Для координат точок на поверхні ОВ маємо такі рівняння вимірювань:

$$\begin{aligned} x[\text{д.т.}] &= q_x \cdot [1 \text{ д.т.}], & y[\text{д.т.}] &= q_y \cdot [1 \text{ д.т.}], \\ x[\text{мм}] &= k_{\text{мх}} \cdot x[\text{д.т.}], & y[\text{мм}] &= k_{\text{мы}} \cdot y[\text{д.т.}], \end{aligned} \quad (1.2)$$

де q_x , q_y – індекси (порядкові номери в рядку та стовпцю) дискретного відліку двовимірного цифрового відеозображення, що відповідає вимірюваній

точці об'єкту; [1 д.т.] – відстань по горизонталі та по вертикалі між двома сусідніми дискретними відліками у площині цифрового відеозображення; k_{mx} [мм/д.т.], k_{my} [мм/д.т.] – масштабні коефіцієнти для перерахунку значень координат у дискретних точках (д.т.) відеозображення у значення у міліметрах, ці коефіцієнти визначаються шляхом аналітичного розрахунку або експериментальних досліджень відеозображення тестового ОВ з відомими геометричними розмірами.

В рівняннях (1.2) враховано той факт, що цифрові відеозображення ОВ є матрицею, елементи якої характеризують яскравість і колір відповідних точок ОВ. При обробці відеозображень безпосередньо визначаються координати точок як індекси відповідних елементів матриці. Такий підхід є загальноприйнятим в цифровій обробці відеозображень [38, 72]. Цим і обумовлено використання в проміжних розрахунках координат та відстаней одиниці в 1 д.т. Але підсумкові результати вимірювань ГП об'єктів приводяться в одиницях системи СІ, тобто в метрах або міліметрах.

Рівняння похибок вимірювання координат точок ОВ мають вигляд:

$$x^* [\text{д.т.}] = x + \Delta_{x^*} = (q_x + \Delta_{qx}) \cdot ([x] + \Delta_{[x]}),$$

$$y^* [\text{д.т.}] = y + \Delta_{y^*} = (q_y + \Delta_{qy}) \cdot ([y] + \Delta_{[y]}),$$

де Δ_{x^*} , Δ_{y^*} – загальні похибки результатів x^* , y^* вимірювання координат; Δ_{qx} , Δ_{qy} – похибки знаходження чисельних значень координат (в том числі: випадкові, динамічні та геометричні похибки відеозображень, що виникли в ПФВЗ; похибки, обумовлені дискретним характером цифрових відеозображень та їх перетворенням і кодуванням при введенні в цифрову ЕОМ); $\Delta_{[x]}$, $\Delta_{[y]}$ – похибки відтворення одиниці вимірювань $[x] = [y] = [1 \text{ д.т.}]$, обумовлені похибками виготовлення матричного перетворювача «світло-сигнал» в ПФВЗ.

Всі інші ГП ОВ визначаються шляхом чисельного розрахунку в цифровій ЕОМ на основі виміряних значень координат точок ОВ. Для таких розрахунків найсуттєвішою є трансформована похибка, обумовлена наявними похибками у початкових даних для розрахунків (координатах точок ОВ).

Компенсація похибок визначення ГП ОВ у вимірювальній системі здійснюється шляхом комп'ютеризованої обробки відеозображень та результатів вимірювання ГП в цифровій ЕОМ. Для позначення такої процедури в подальшому використано вираз «алгоритмічна компенсація похибок».

На цифровому відеозображенні $\hat{f}_{0_{\text{сегм}}}(n, m)$ згідно рівнянь вимірювань (1.2) безпосередньо можуть бути виміряні координати точок з номерами (n_j, m_j) , що належать ОВ ($j \in \overline{1, N_{\text{ОВ}}}$, $N_{\text{ОВ}}$ – загальна кількість точок, що

належать ОВ). Серед всіх точок ОВ виділяють точки, що належать його контуру ОВ.

Номери точок (n_j, m_j) на цифровому відеозображенні перераховуються згідно рівнянь вимірювань (1.2) в координати відповідних точок (x_j, y_j) на поверхні ОВ з врахуванням того, що $q_x = n_j$, $q_y = m_j$. Координати (x_j, y_j) згідно рівнянь вимірювань можуть бути виражені в одиницях довжини (д.т.) цифрового відеозображення або у одиницях довжини (метрах або міліметрах) поверхні ОВ. Кроки дискретності δ_x і δ_y та масштабні коефіцієнти k_{mx} і k_{my} визначаються шляхом аналітичного розрахунку на основі значень δ_{x1} , δ_{y1} і k_{moc} . Для існуючих ПФВЗ, що використовуються у вимірювальній системі, ці значення можуть бути невідомі. В цьому випадку величини δ_x , δ_y , k_{mx} і k_{my} визначаються на основі дослідження цифрового відеозображення тестового ОВ, що має відомі лінійні розміри, заздалегідь визначені з високою точністю. Всі інші ГП ОВ визначаються вимірювальною системою на основі алгоритмічної обробки координат (n_j, m_j) або (x_j, y_j) .

Розглянемо ГП ОВ, що можуть бути визначені для кожного відеозображення шляхом алгоритмічної обробки результатів вимірювань координат точок. ОВ будемо вважати плоскою геометричною фігурою, що розміщена в площині відеозображення. ГП ОВ можна розділити на п'ять груп: координати характерних контурних точок об'єкта, лінійні розміри та периметр об'єкта, різні варіанти визначення площі об'єкта, морфометричні ознаки об'єкта, коефіцієнти геометричної форми об'єкта [65, 68, 72].

До координат характерних контурних точок ОВ відносяться:

- перелік всіх контурних точок з визначеними координатами;
- екстремальні координати об'єкта (координати самої верхньої, нижньої, лівої та правої точок об'єкта);
- координати вершин опуклого багатокутника, в який вписано об'єкт;
- координати характерних точок геометричної фігури (наприклад, прямокутника або еліпса), що використовується для апроксимації об'єкта.

До лінійних розмірів ОВ відносяться його ширина w та висота h , що відповідають ширині та висоті прямокутника, в який вписано цей об'єкт. Відстань між двома точками ОВ з координатами (x_l, y_l) і (x_j, y_j) дорівнює

[79]: $d = \sqrt{(x_j - x_l)^2 + (y_j - y_l)^2}$. Величини w , h і d для цифрового відеозображення можуть бути обраховані у д.т. або у метрах.

Площа ОВ може бути визначена за такими варіантами:

- площа об'єкта $S_{ОВ}$ (область, яку займає цей об'єкт на відеозображенні);
- повна площа об'єкта, що дорівнює його площі із заповненими отворами;
- опукла площа об'єкта $S_{ОВ1}$, що дорівнює площі опуклого багатокутника, в який вписано цей об'єкт.

Площа ОВ для цифрового відеозображення може бути виражена відповідною кількістю точок цифрового відеозображення, що належать ОВ, або обчислена у одиницях площі (м²).

До морфометричних ознак ОВ, як плоскої фігури в площині відеозображення, відносяться такі ГП:

- центр мас об'єкта;
- еквівалентний діаметр, що відповідає діаметру кола з площею, яка дорівнює площі об'єкта $d_e = \sqrt{4S_{OB} / \pi}$;
- довжина максимальної осі інерції об'єкта як плоскої фігури;
- довжина мінімальної осі інерції об'єкта як плоскої фігури;
- кутове положення об'єкта, що визначається кутом між горизонтальною віссю координат і максимальною віссю інерції цього об'єкта.

До коефіцієнтів геометричної форми ОВ, як плоскої фігури в площині відеозображення, відносяться:

- коефіцієнт опуклості: $k_c = S_{OB} / S_{OB1}$;
- коефіцієнт заповнення: $k_f = S_{OB} / (w \cdot h)$;
- ексцентриситет, що визначається для еліпса, який має головні моменти інерції такі ж, як у об'єкта.

Узагальненим варіантом ГП ОВ є його моменти [65]. Початкові моменти ОВ порядку $(\beta + \gamma)$ дорівнюють:

$$m_{\beta\gamma} = \iint_{Q_{OB}} x^\beta y^\gamma f_0(x, y) dx dy.$$

Центральні моменти порядку $(\beta + \gamma)$ визначаються формулою:

$$\mu_{\beta\gamma} = \iint_{Q_{OB}} (x - x_c)^\beta (y - y_c)^\gamma f_0(x - x_c, y - y_c) dx dy,$$

де x_c, y_c – координати центра мас ОВ.

Координати центра мас ОВ дорівнюють [65]:

$$x_c = m_{10} / S_{OB}, \quad y_c = m_{01} / S_{OB}.$$

Для відеозображення (1.1)

$$x_c = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} x_j = \frac{\delta_x}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} n_j, \quad y_c = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} y_j = \frac{\delta_y}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} m_j.$$

Важливими характеристиками ОВ, як плоскої фігури, є його головні моменти інерції J_1 і J_2 , довжина максимальної і мінімальної осей інерції l_{max} і l_{min} та ексцентриситет $e_{ст}$. Головні моменти інерції визначаються відносно максимальної і мінімальної осей інерції ОВ [65, 74]:

$$J_{1,2} = \frac{1}{2} (J_x + J_y) \pm \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4} (J_x - J_y)^2},$$

де J_x, J_y, J_{xy} – моменти інерції ОБ відносно координатних осей Ox і Oy ,
 $J_x = \mu_{20}$, $J_y = \mu_{02}$, $J_{xy} = \mu_{11}$.

Для відеозображення (1.1)

$$J_x = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (x_j - x_c)^2 = \frac{\delta_x^2}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (n_j - n_c)^2, \text{ де } n_c = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} n_j,$$

$$J_y = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (y_j - y_c)^2 = \frac{\delta_y^2}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (m_j - m_c)^2, \text{ де } m_c = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} m_j,$$

$$J_{xy} = \frac{1}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (x_j - x_c)(y_j - y_c) = \frac{\delta_x \delta_y}{N_{OB}} \sum_{j=1}^{N_{OB}} (n_j - n_c)(m_j - m_c).$$

Довжина максимальної і мінімальної осей інерції ОБ, як плоскої фігури, визначається співвідношеннями [74, 75]:

$$l_{\max} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{J_x + J_y + 2C_J},$$

$$l_{\min} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{J_x + J_y - 2C_J},$$

$$\text{де } C_J = \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4}(J_x - J_y)^2}.$$

Ексцентриситет визначається на основі апроксимації ОБ еліпсом, що має моменти та осі інерції, як у ОБ [65, 74]:

$$e_{\text{ел}} = \frac{c_{\text{ел}}}{a_{\text{ел}}} = \frac{2\sqrt{(l_{\max}/2)^2 - (l_{\min}/2)^2}}{l_{\max}},$$

де $c_{\text{ел}}^2 = a_{\text{ел}}^2 - b_{\text{ел}}^2$ – половина міжфокусної відстані еліпса, $a_{\text{ел}}$ і $b_{\text{ел}}$ – його півосі.

На основі моментів інерції ОБ також може бути визначено його кутове положення відносно центра мас [74, 75]. Це кутове положення визначається як кут між віссю Ox і максимальною віссю інерції:

$$\alpha = \begin{cases} \arctg \frac{J_y - J_x + 2C_J}{2J_{xy}}, & J_y > J_x, \\ \arctg \frac{2J_{xy}}{J_x - J_y + 2C_J}, & J_y < J_x. \end{cases} \quad (1.3)$$

Інший варіант визначення кутового положення ОБ наведено в [65]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\mu_{11}}{\mu_{02} - \mu_{20}} + \lambda, \quad \lambda = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \mu_{20} \geq \mu_{02}, \mu_{30} \geq 0, \\ \pi/2, & \text{якщо } \mu_{20} < \mu_{02}, \mu_{30} \geq 0, \\ \pi, & \text{якщо } \mu_{20} \geq \mu_{02}, \mu_{30} < 0, \\ 3\pi/2, & \text{якщо } \mu_{20} < \mu_{02}, \mu_{30} < 0. \end{cases} \quad (1.4)$$

Найпростіший варіант визначення кутового положення ОБ – на основі вимірних координат двох опорних точок цього об'єкта за формулою [84, 85]:

$$\alpha = \arctg \frac{y_l - y_j}{x_l - x_j}. \quad (1.5)$$

Для ОВ на основі відеозображень також можуть бути визначені інші механічні величини, що залежать від ГП цих об'єктів:

1. Якщо відома апріорна інформація про тривимірну геометричну форму та просторове розташування ОВ, то на основі відеозображення можуть бути оцінені об'єм $V_{ОВ}$ та площа перетину S_{Π} цього об'єкту. Наприклад, для ОВ в формі шару на основі вимірюваного поперечного розміру w його об'єм $V_{ОВ} = 4\pi w^3 / 3$, на основі вимірюваної площі $S_{ОВ}$ його об'єм $V_{ОВ} = 32 / (3\sqrt{\pi}) S_{ОВ}^{3/2}$. В даному випадку максимальне значення площі перетину $S_{\Pi} = S_{ОВ}$.

2. Якщо відома апріорна інформація про об'ємну густину ОВ $\rho_{ОВ}$ або його густину $\rho_{ОВ1}$, як плоскої фігури, то можна визначити масу цього об'єкта: $m_{ОВ} = \rho_{ОВ} \cdot V_{ОВ}$ або $m_{ОВ} = \rho_{ОВ1} \cdot S_{ОВ}$.

Таким чином, на цифровому відеозображенні можуть бути виміряні координати точок ОВ та обраховані ГП цих об'єктів. На цій основі також можуть бути визначені інші механічні величини, що залежать від ГП ОВ.

Отримані результати вимірювань механічних величин далі можуть бути використані в автоматизованих системах управління для вирішення різних задач з контролю технічних об'єктів, а також для контролю екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення.

1.4. Технічні засоби формування та обробки відеозображень з вимірювальною інформацією про механічні величини

Метод вимірювань ГПФ, що пропонується, потребує використання певного набору технічних засобів, які виконують формування та обробку цифрових відеозображень з метою визначення стану водойми.

Існують комп'ютерні автоматизовані системи, призначені для геометричних вимірювань на відеозображеннях [60, 61, 65], але вони мають ряд суттєвих недоліків:

1. Первинним перетворювачем візуальної інформації в відеозображення є аналогова відеокамера на електронно-променевої трубці. У порівнянні із сучасними твердотільними напівпровідниковими перетворювачами «світло-сигнал» [48, 59] це приводить до додаткових похибок і погіршує інші характеристики системи.

2. Керує системою і обробляє інформацію мікро-ЕОМ, що має обмежену продуктивність, об'єм оперативної і зовнішньої пам'яті. Це суттєве обмеження для обробки цифрової відеоінформації. Тому точність вимірювань і можливість алгоритмічної обробки відеозображень в такій системі обмежені.

Як визначено в результаті проведених досліджень, на теперішній час не відомо автоматизованих систем для вимірювань ГПФ, що використовують алгоритмічну обробку двовимірної вимірювальної відеоінформації. Тому

виникає необхідність автоматизованої вимірювальної системи, що призначена для визначення ГПФ та його маси.

Технічні засоби такої системи складаються з мікроскопа з вбудованою цифровою відеокамерою, що формує відеозображення фітопланктону у пробах води з водойм, та цифрової ЕОМ, що виконує алгоритмічну обробку цих відеозображень з метою вимірювань ГПФ та його маси.

Елементи даної структурної схеми є складними технічними виробами, що потребують для розробки значних витрат праці та багато часу. Тому доцільно використовувати існуючі стандартні технічні засоби, а підвищення точності та розширення функціональних можливостей вимірювань забезпечити на основі алгоритмічної обробки відеоінформації.

Можливі такі варіанти використання стандартних засобів:

- відеокамера, яка підключена до пристрою введення відеозображень (в складі цифрової ЕОМ);
- цифровий фотоапарат, підключений до ЕОМ через послідовний інтерфейс або інтерфейс USB;
- цифрова відеокамера, підключена до ЕОМ через інтерфейс IEEE 1394 “FireWire” або інтерфейс USB.

Розглянемо ці варіанти більш детально, звертаючи увагу на технічні характеристики технічних засобів, які важливі для вимірювань ГПФ.

Відеокамера, яка підключена до пристрою введення відеозображень у цифрову ЕОМ. Введення відеозображень від відеокамери в ЕОМ і їх перетворення в цифрову форму виконується за допомогою спеціального пристрою, що являє собою плату розширення в складі цієї ЕОМ.

Даний варіант має такі недоліки, що негативно впливають на якість отриманих цифрових відеозображень:

- максимальний розмір цифрового зображення дорівнює близько 800×600 дискретних точок через обмеження, що випливають із властивостей аналогового відеосигналу відповідно до телевізійних стандартів;
- верхня межа смуги частот відеосигналу після всіх перетворень дорівнює 3–5 МГц, що негативно впливає на відтворення контурів об’єктів на відеозображенні;
- у даному випадку має місце черездюкова розгортка, що негативно впливає на якість швидкорухомих зображень.

Переваги даного варіанту:

- можливість введення та обробки послідовності зображення з високою частотою кадрів (25 кадрів/50 напівкадрів в секунду), що важливо для дослідження динаміки процесів;
- доступність і відносно невелика собівартість апаратних засобів;

- можливість накопичення відеозображень шляхом запису на магнітну стрічку з подальшим введенням в комп'ютер.

Для подолання недоліків даного варіанту раніше використовували спеціалізовану відеокамеру, але у наш час використання аналогової відеокамери є застарілим методом обробки вимірювальної інформації для визначення ГПФ.

Тому більш доцільно використовувати цифровий фотоапарат для статичних вимірювань (при визначенні ГПФ та його маси) та цифрову відеокамеру, як для статистичних, так і для динамічних вимірювань (наприклад, для оцінки рухомої активності фітопланктону як природного індикатора забруднення водного середовища).

Цифровий фотоапарат дозволяє фіксувати у власному запам'ятовуючому пристрої невелику кількість цифрових зображень у форматі без стиснення (BMP, TIFF) або зі стисненням (JPEG). Перетворення інформації в цифрове зображення виконується в самому фотоапараті за допомогою напівпровідникового перетворювача «світло–сигнал». Далі цифрові зображення передаються в ЕОМ по інтерфейсу USB.

Найбільш важливим є розмір цифрового відеозображення в дискретних точках і пов'язана з ним розподільча здатність відеозображення. Збільшення розміру відеозображення дозволяє підвищити точність вимірювання геометричних параметрів об'єктів вимірювань. Типові значення вказаних характеристик для цифрових фотоапаратів наведено в табл. 1.2.

Переваги даного варіанту:

- великий розмір цифрового зображення, який дорівнює 4000x300 дискретних точок у кращих моделях цифрових фотоапаратів. Цей розмір обмежується в основному тільки сучасними можливостями технології виготовлення напівпровідникових перетворювачів “світло–сигнал”. Зображення може бути стиснутим у цифровому фотоапараті або введено в ЕОМ у нестиснутому вигляді;

- висока якість цифрового зображення в порівнянні з аналоговою відеокамерою. Це обумовлено низьким рівнем шумів і малими похибками дискретної інформації;

- можливість безпосереднього отримання напівтонового зображення у цифровому фотоапараті, що важливо при введенні відеозображення з вимірювальною інформацією.

Недоліком даного варіанту є те, що відсутня можливість введення в ЕОМ послідовності відеозображень з високою частотою кадрів, що важливо для дослідження динаміки різних процесів. Зауважимо, що кращі моделі цифрових фотоапаратів мають можливість введення в комп'ютер послідовності стиснених зображень у реальному масштабі часу з максимальною швидкістю 2–3 кадри в секунду. Передача нестиснутого

відеозображення в комп'ютер може займати декілька хвилин, що є неприйнятним в багатьох випадках. Ці недоліки випливають з обмеженої пропускної здатності інтерфейсу USB 1.1 (12 Мбіт/с) та USB 2.0 (480 Мбіт/с) [76].

Таблиця 1.2

Основні характеристики геометричних вимірювань за допомогою цифрового фотоапарату

Характеристика	Тип цифрового фотоапарату		
	Початковий рівень	Стандартний рівень	Високий рівень
1. Розмір відеозображення, дискретних точок	2048×1536	2600×1950	4000×3000
2. Площа, що відповідає одній дискретній точці відеозображення, мм	0,058×0,058*	0,046×0,046*	0,030×0,030*

Примітка. * – значення підраховані для випадку, коли в полі зору цифрового фотоапарату знаходиться площа 120×90 мм, що є типовим значенням для режиму макрозйомки об'єктів з відстані 10 ... 30 см.

Цифрова відеокамера дозволяє отримати послідовність відеозображень у цифровій формі і передати їх у комп'ютер через інтерфейс USB або інтерфейс IEEE 1394 “FireWire” (пропускна здатність 100 Мбіт/с). Перетворення відеоінформації в цифрове зображення відбувається в самій відеокамері. Обмежена пропускна здатність технічних засобів вимагає застосування стиснення відеозображень. Для стиснення використовуються формати відеопослідовностей MJPEG, MPEG та інші.

Переваги даного варіанту:

- краща якість цифрового зображення в порівнянні з аналоговою відеокамерою. Це обумовлено низьким рівнем шумів і малими похибками дискретності;
- послідовна розгортка відеозображення;
- можливість введення в комп'ютер і обробки послідовності зображень із високою частотою кадрів (25 або 30 кадрів в секунду для інтерфейсу IEEE 1394).

Недоліком даного варіанту є те, що стандартні цифрові відеокамери, орієнтовані на телевізійний стандарт передачі зображень, забезпечують максимальний розмір цифрового зображення близько 800×600 дискретних

точок. Цифрові відеокамери, орієнтовані на комп'ютерні технології роботи з часовими послідовностями відеозображень, формують відеозображення значно більшого розміру (1920×1080 точок) і з частотою 30 кадрів за секунду. При цьому використовується стиснення відеопослідовності з виключенням частини кадрів. Тому більш доцільним є використання спеціалізованої цифрової камери, яка призначена для роботи в складі спеціального лабораторного обладнання або промислового комп'ютера та має підвищений розмір цифрового відеозображення (до 2000...4000 точок) та підвищену частоту до 100 кадрів за секунду [64].

Порівняльний аналіз інших характеристик апаратних засобів отримання цифрових відеозображень фітопланктону наведено в табл. 1.3.

Цифровий фотоапарат або цифрова відеокамера стандартного і високого рівня можуть повністю задовольнити вимоги до формування відеозображень в лабораторних умовах дослідження фітопланктону. Ці апаратні засоби забезпечують такі переваги:

- автоматизація процесу досліджень;
- розширюється функціональні можливості і підвищується оперативність засобів вимірювань геометричних характеристик;
- вимірювальна система, створена на базі цифрового фотоапарату або цифрової відеокамери, має задовільну вартість.

Отже, використання цифрового фотоапарату при статичних вимірюваннях або цифрової відеокамери при статичних та динамічних вимірюваннях дає можливість визначити показники розвитку фітопланктону певного типу у водоймах, які є початковими даними для побудови математичної моделі, яка, в свою чергу, дозволить прогнозувати розвиток фітопланктону та управляти даним процесом.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика цифрового фотоапарату та цифрової відеокамери як засобів вимірювань ГПФ

Характеристика апаратних засобів	Варіант апаратних засобів	
	Цифровий фотоапарат	Цифрова відеокамера
1. Розподільча здатність	висока	середня
2. Максимальний розмір об'єктів, для яких формується відеозображення	без обмежень *	без обмежень *
3. Основні похибки: – відтворення кольору – геометричні	середні незначні	середні середні

4. Інші характеристики: – час отримання одного відеозображення – придатність до роботи в умовах виробництва – придатність до роботи в умовах лабораторних досліджень – можливість дослідження динаміки процесів	долі секунди - секунди середня висока	долі секунди висока висока наявна
5. Вартість	задовільна	задовільна

Примітка. * – значне збільшення розміру об'єктів приводить до зменшення розподільчої здатності.

Технічні засоби введення відеозображень в ЕОМ включають в себе інтерфейси (USB та IEEE 1394), що використовуються для передачі двовимірної вимірювальної інформації від пристроїв формування до цифрової ЕОМ [76].

Стандарти і характеристики інтерфейсу USB.

USB інтерфейс (Universal Serial Bus – Універсальна Послідовна Шина) призначений для з'єднання цифрових ЕОМ з різними периферійними пристроями, такими як принтери, сканери, накопичувачі даних, клавіатури тощо.

Основні технічні характеристики і переваги інтерфейсу USB:

- можливість підключення – відключення від ЕОМ периферійних пристроїв без відключення живлення;
- функція автоматичного визначення типу і моделі підключаемого пристрою (при наявності встановлених драйверів);
- можливість використання USB пристроїв з різними швидкостями обміну даними;
- висока швидкість обміну даними до 480 Мбіт/сек (60 Мб/сек);
- максимальна довжина кабелю для передачі даних – 5 метрів;
- максимальна кількість підключаємих пристроїв – 127;
- наявність серед сигналів інтерфейсу напруги живлення + 5 В з струмом навантаження не більше 500 мА, що використовується для живлення периферійних пристроїв;
- можливість використання розподільчих пристроїв (хабів) для збільшення кількості пристроїв, що підключаються.

Стандартів USB інтерфейсів є декілька. На сьогоднішній день існує 3 основних стандарти, що визначають передачу даних по інтерфейсу USB:

USB 1.0 – швидкість передачі 1,5 Мбіт/сек (187,5 КБ/сек);
USB 1.1 – швидкість передачі 12 Мбіт/сек (1,5 Мб/сек);
USB 2.0 – має три варіанти швидкостей передачі:
High speed – швидкість передачі 480 Мбіт/сек (60Мб/сек);
Full speed – швидкість передачі 12 Мбіт/сек (1,5 Мб/сек) – те ж саме, що і USB 1.1;
Low speed - швидкість передачі 1,5 Мбіт/сек (187,5 Кб/сек) – те ж саме, що і USB 1.0.

Таким чином, стандарт USB 2.0 (High speed) є самим швидкісним стандартом і має сумісність з усіма іншими стандартами.

Стандарти і характеристики інтерфейсу Fire Wire (IEEE 1394).

Довгий час інтерфейс Fire Wire використовувався в основному при обробці потокового відео. Взагалі, для цього він спочатку і проектувався. Однак, висока пропускна здатність цього інтерфейсу зробила його досить ефективним для сучасних периферійних високошвидкісних пристроїв, а також і для організації невеликих швидкодіючих мереж.

Високошвидкісний послідовний інтерфейс Fire Wire, також відомий як IEEE 1394, 1394 і i.Link, був розроблений компанією Texas Instruments у співробітництві з Apple в 1995 році. Компанія Apple вже досить давно оснащує свої комп'ютери цим інтерфейсом, але для PC-сумісних комп'ютерів Fire Wire тільки недавно став набирати популярність.

Основні характеристики інтерфейсу Fire Wire:

- висока швидкість передачі даних – 100, 200 або 400 Мбіт/сек;
- можливість підключити до 63 пристроїв на один канал;
- повна підтримка автоматичного розпізнавання периферійних пристроїв;
- оперативне підключення і відключення пристроїв без втрати даних;
- використання стандартних з'єднувачів для всіх типів пристроїв;
- максимальна довжина кабелю – 4,5 м;
- підтримка інтерфейсу операційною системою.

Проаналізувавши розглянуті технічні засоби, можна зробити такі висновки:

– існують стандартні технічні засоби, що забезпечують потрібну точність визначення ГПФ;

– для вимірювань лінійних розмірів нерухомих і малорухомих об'єктів (екземплярів фітопланктону) доцільно використовувати цифровий фотоапарат або цифрову відеокамеру, що забезпечують високу якість цифрових відеозображень (великий розмір у дискретних точках і низький рівень шумів);

– точнісні характеристики вимірювань ГПФ та його маси визначаються похибками та викривленнями, що мають місце у вимірювальному каналі (похибки квантування відеосигналу за рівнем, похибки дискретності при

перетворенні відеозображень у цифрову форму, шуми в пристрої формування відеозображень; геометричні викривлення в оптичній системі).

Таким чином, розглянуто можливості застосування цифрової обробки відеозображень для визначення і контролю за змінами ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення. Цифрова обробка відеозображень проб води дозволяє визначати кількість і вимірювати ГПФ. На основі цих результатів можна проводити ідентифікацію фітопланктону за видовим складом та визначити показники, що характеризують стан водойми.

1.5. Основні напрямки удосконалення методів вимірювань геометричних параметрів фітопланктону для водойм господарсько-побутового призначення

Для вимірювань ГПФ та його маси, для досліджень змін цих параметрів у часі необхідно використання засобів вимірювань, побудованих на основі сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій обробки вимірювальної відеоінформації.

Виходячи з вищесказаного, метою проведених досліджень є розширення функціональних можливостей і підвищення швидкодії засобів вимірювань ГПФ у водоймах шляхом розробки автоматизованої системи для вимірювань цих геометричних параметрів.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити задачі:

1. Дослідити перетворення вимірювальної відеоінформації в процесі вимірювань геометричних параметрів. Визначити похибки і викривлення, що мають вплив на точність вимірювань, розробити заходи по зменшенню цих похибок.
2. Розробити методику обробки вимірювальної інформації про стан екосистем водойм, що включає формування та цифрову обробку відеозображень проб води з водойм, визначити ГПФ та на цій основі виконати його ідентифікацію.
3. Створити автоматизовану систему для вимірювань ГПФ у водоймах, яка має розширені функціональні можливості і підвищену швидкість у порівнянні із існуючими засобами вимірювань.
4. Обґрунтувати можливість та доцільність використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для обробки вимірювальної інформації про ГПФ та для проведення контролю за станом водного середовища.
5. Дослідити експериментально особливості змін ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення на основі ШНМ, як засобу обробки вимірювальної інформації. Визначити основні фактори, що впливають на ці процеси.

Приведений у першому розділі аналіз літературних джерел дозволив визначити конкретну область досліджень, яка раніше не знайшла достатнього відображення в інших наукових працях. Це стосується передусім вимірювань ГПФ та його маси з використанням сучасних інформаційно-комп'ютерних

технологій обробки відеозображень. Відсутність у даний час новітніх методик для вирішення вищезазначених задач стосовно вимірювань ГПФ та його маси доводить необхідність і актуальність запропонованих досліджень, що ґрунтуються на застосуванні інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ.

1.6. Висновки до розділу 1

1. Дослідження і контроль за станом водойм господарсько-побутового призначення потребує вимірювань ГПФ у пробах води з цих водойм. Результати вимірювань використовуються для ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону, а також для визначення на цій основі поточного стану водойм господарсько-побутового призначення. Фітопланктон та його геометричні параметри також є природним індикатором для оцінки якості питної води.

2. Для визначення ГПФ та для розрахунку на основі цих даних кількісного складу фітопланктону та його маси розроблено ряд методик. Ці методики включають відбір проб води, їх обробку в лабораторії та розрахунок показників стану водойм. Однак вказані методики орієнтовані на використання звичайного лабораторного мікроскопа, ручний підрахунок кількості фітопланктонних водоростей, визначення їх розмірів та подальший розрахунок потрібних показників. Таким чином, вказані методики мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних із використанням ручної праці. Перш за все це низька швидкість вимірювань ГПФ та обмежені функціональні можливості засобів вимірювань ГПФ.

3. Вимірювання ГПФ можливе на основі відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці параметри. Такий метод вимірювань базується на використанні технічних засобів формування та обробки цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про стан ГПФ.

4. На основі аналізу літературних джерел визначено, що для вимірювань ГПФ можна використовувати стандартні апаратні засоби формування відеозображень (цифровий фотоапарат або цифрову відеокамеру) в поєднанні з відповідними методами обробки відеозображень. Але існуючі методи вимірювань геометричних параметрів об'єктів на відеозображеннях та ідентифікації цих об'єктів потребують удосконалення шляхом врахування особливостей відеозображень ГПФ.

5. Основним напрямком розробки методів і засобів вимірювань ГПФ повинно бути створення автоматизованої вимірювальної системи на основі інформаційно-комп'ютерних технологій і штучних нейронних мереж, що дозволить підвищити швидкість і розширити функціональні можливості цих засобів вимірювань.

РОЗДІЛ 2

ФОРМУВАННЯ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ ПРО ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ФІТОПЛАНКТОНУ

В процесі вимірювань геометричних параметрів фітопланктону виконуються операції формування, накопичення та обробки вимірювальної відеоінформації про ці параметри. З літературних джерел [36, 38, 72, 77 - 79] відомо ряд існуючих методів, що реалізують вказані операції. Але ці методи не враховують особливостей відеозображень проб води з водойм господарсько-побутового призначення, що отримані за допомогою технічних засобів формування цифрових відеозображень. Тому необхідно удосконалити вказані методи, виходячи із задач, що вирішуються при розробці і практичному використанні засобів вимірювань геометричних параметрів фітопланктону у водоймах.

В даному розділі:

– створено новий метод вимірювань геометричних параметрів фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення. Цей метод базується на формуванні відеозображень проб води з водойм та алгоритмічній обробці вимірювальної відеоінформації;

– удосконалено методи автоматизованої обробки двовимірної вимірювальної інформації про зміни геометричних параметрів фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення;

– досліджено перетворення вимірювальної відеоінформації в процесі вимірювань геометричних параметрів, визначено похибки, що мають вплив на точність вимірювань, розроблено заходи по зменшенню цих похибок;

– також розроблено методи автоматизованої ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону на основі результатів геометричних вимірювань.

Всі основні теоретичні положення даного розділу мають практичне використання і підтверджені шляхом експериментальних досліджень вимірювань ГПФ у водоймах (див. розділ 5).

2.1. Обґрунтування можливостей отримання вимірювальної інформації про стан геометричних параметрів фітопланктону на основі цифрових відеозображень проб води з водойми

Як було визначено в розділі 1, основними недоліками існуючих методів та засобів вимірювань ГПФ фітопланктону є їх велика трудомісткість, низька швидкодія та обмежені функціональні можливості. Подолання цього недоліку можливе шляхом застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень ГПФ з урахуванням особливостей задачі, що вирішується.

Вимірювання ГПФ та його маси потребує використання певного набору технічних засобів, що виконують формування та обробку цифрових

відеозображень з метою визначення стану водойми. Технічні засоби та методи алгоритмічної обробки цифрових відеозображень ГПФ забезпечують розширення функціональних можливостей і підвищення швидкодії засобів вимірювань ГПФ у пробах води за умови забезпечення точності вимірювань, необхідної для задачі, що розглядається.

Процес вимірювань складається з послідовності операцій по перетворенню і обробці вимірювальної відеоінформації про ГПФ:

- формування відеозображень об'єктів вимірювань (екземплярів фітопланктону);

- перетворення цих відеозображень в форму, прийнятну для алгоритмічної обробки, тобто отримання цифрових відеозображень шляхом аналого-цифрового перетворення відеосигналу в пристрої формування відеозображень (цифровій відеокамері);

- алгоритмічна обробка цифрових відеозображень з метою визначення ГПФ та його маси.

Проведення вимірювань ГПФ базується на таких принципах:

- використання стандартних технічних засобів формування і обробки цифрових відеозображень;

- використання алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації та забезпечення на цій основі потрібних функціональних можливостей, швидкодії і точності засобів вимірювань ГПФ;

- пошук і вибір потрібних параметрів алгоритмів цифрової обробки відеозображень, виходячи з особливостей задачі вимірювань ГПФ, удосконалення цих алгоритмів;

- застосування стиснення відеозображень у цифровій відеокамері, без якого неможлива реєстрація та введення в ЕОМ наявного обсягу вимірювальної відеоінформації, а також неможливе компактне зберігання цього обсягу відеоінформації;

- використання для алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації інтелектуальних методів на основі ШНМ, в тому числі – для відновлення відеозображень після проходження їх через вимірювальний канал з обмеженою смугою частот відеосигналу, для сегментації відеозображень, для ідентифікації фітопланктону і розрахунку його маси.

Перетворення вимірювальної інформації про ГПФ у вимірювальному каналі, побудованому на основі цифрової відеокамери, виконується як послідовність таких етапів (рис. 2.1):

1. Формування за допомогою оптичної системи мікроскопа в площині ПЗЗ-матриці оптичного зображення об'єкту вимірювань (фітопланктону);

2. Формування за допомогою напівпровідникового перетворювача «світло-сигнал» (ПЗЗ-матриці) електричного сигналу у вигляді двовимірної дискретної функції, яка пропорційна кольору та яскравості об'єкту вимірювань.

3. Підсилення та квантування по рівню двовимірної дискретної функції і формування цифрового кольорового відеозображення, що містить вимірювальну інформацію про ГПФ.

4. Введення в ЕОМ цифрового кольорового відеозображення через відповідний інтерфейс (IEEE 1394 або USB).

5. Визначення ГПФ та його маси шляхом алгоритмічної обробки цифрового кольорового відеозображення за допомогою центрального процесора ЕОМ та нейропроцесора.

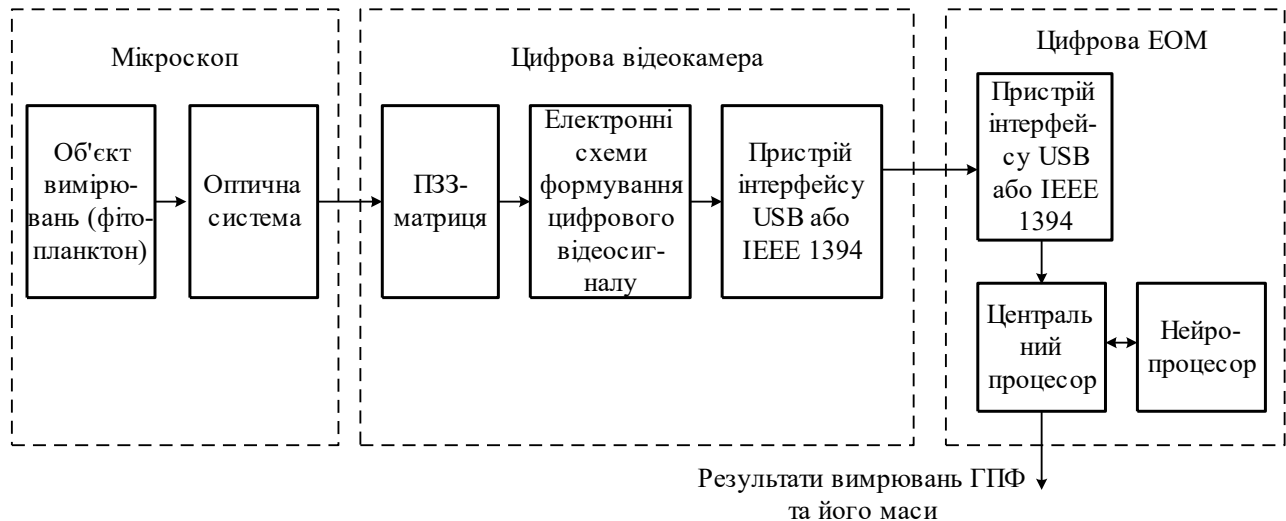


Рис. 2.1. Вимірювальний канал автоматизованої системи для вимірювань ГПФ

Вимірювання ГПФ включає визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону, їх площі, морфометричних ознак, коефіцієнтів форми. Всі ці операції виконуються в процесі алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації.

Маса фітопланктону визначається розрахунково-об'ємним методом [15]. Необхідною умовою для цього є наявність даних по чисельності різних видів фітопланктону у пробах та лінійні розміри екземплярів фітопланктону.

Визначення об'єму та маси фітопланктону проводять по відомим геометричним формулам на основі отриманих лінійних розмірів та інших геометричних параметрів кожного екземпляру фітопланктону. При цьому використовується ідентифікація екземплярів фітопланктону за видовим складом та визначення подібності кожного екземпляру до певної геометричної фігури. Відносну густину екземплярів фітопланктону (відносно води) приймають рівною 1,00...1,05 в залежності від виду даного екземпляру, визначеного шляхом ідентифікації. Вирахувану масу кожного виду множать на його чисельність і результат приводять у мг/дм^3 або у г/м^3 .

На основі результатів вимірювань визначаються інтегральні показники стану і розвитку фітопланктону як складової частини водойми. Найбільш інформативними структурно-функціональними показниками стану фітопланктону є видове та кількісне різноманіття, характеристика структури угруповань фітопланктону за його геометричними параметрами, а також об'єм і маса [4, 44, 55].

Відеозображення фітопланктону, отримані після фільтрації шумів, вилучення інших завад та сегментації, потрібно класифікувати, тобто визначити належність кожного екземпляра фітопланктону до одного з видів. Така класифікація може бути виконана на основі набору ознак об'єктів вимірювань, які можна визначити по їх відеозображенням. Відомі декілька підходів до класифікації об'єктів по їх відеозображенням [86, 99, 125]. Перш за все, це методи на основі геометричних параметрів та структурно-синтаксичні методи. Методи на основі геометричних параметрів базуються на визначенні деяких універсальних інваріант, тобто кількісних ознак, що є інваріантними до масштабування, зсуву та пороту об'єктів вимірювань на різних відеозображеннях. Такі ознаки характеризують узагальнено форму цих об'єктів. Структурно-синтаксичні методи основані на визначенні структурних відносин між фрагментами відеозображень об'єктів і використовують апарат дискретної математики.

Оскільки в даному випадку форма фітопланктону є відносно простою (рис. 2.2) і окремі його екземпляри розглядаються, класифікуються і вимірюються незалежно один від одного, то доцільно використовувати метод геометричних параметрів. Тим більше, що геометричні параметри також потрібні для розрахунку показників стану екосистеми водоймища (маса фітопланктону тощо). Для класифікації фітопланктону по видовому складу доцільно використовувати геометричні параметри, інваріантні до зсуву і повороту екземплярів фітопланктону, що класифікуються на відеозображенні.



Рис. 2.2. Приклад відеозображення фітопланктону у пробі води з водойми
Обчислення ГПФ та його маси доцільно виконувати за допомогою функцій цифрової обробки відеозображень, реалізованих в програмі Matlab та інструментальному пакеті Image Processing Toolbox [80, 81].

Таким чином, запропоновано метод вимірювань ГПФ та його маси на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки вимірювальної відеоінформації. Цей метод дозволяє зменшити трудомісткість вимірювань, забезпечити підвищення швидкодій і розширення функціональних можливостей засобів вимірювань ГПФ.

2.2. Ідентифікація та розрахунок маси фітопланктону на основі його геометричних параметрів

2.2.1. Основні принципи і методи ідентифікації фітопланктону

Метою розробки методів ідентифікації фітопланктону є підвищення швидкодії та розширення функціональних можливостей засобів вимірювань ГПФ та його маси на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці геометричні параметри. При цьому початковими даними для ідентифікації фітопланктону за видовим складом є геометричні параметри екземплярів фітопланктону, а результати ідентифікації використовуються для розрахунку його маси.

Незважаючи на велику кількість досліджень по розпізнаванню образів і, зокрема, відеозображень, дотепер не вироблений єдиний загальноприйнятий підхід до побудови системи розпізнавання образів. Якщо підходити до цієї системи як до будь-якої складної системи, то необхідно насамперед визначити мету, для досягнення якої створюється дана система. Наступний крок – визначити перелік задач, рішення яких забезпечить досягнення поставленої мети. Потім настає етап аналізу – збору всіх необхідних даних і побудови математичної моделі, використання якої дасть можливість провести синтез системи, що розпізнає образи. Заключний етап – виявлення ефективності чи якості роботи створеної системи як в умовах, що відповідають прийнятій моделі, так і при відхиленні умов від заданих (якщо це необхідно).

При створенні методу ідентифікації фітопланктону за видовим складом необхідно вирішити такі основні задачі [15, 62, 82]:

- 1) первісне нагромадження вимірювальної інформації і складання максимально повного переліку ознак, що характеризують фітопланктон;
- 2) проведення первинної ідентифікації фітопланктону і складання апріорного алфавіту класів (видів фітопланктону);
- 3) розробка апріорного словника ознак, у який з повного переліку ознак ввійдуть тільки ті, що необхідні для опису видів фітопланктону, які ідентифікуються;
- 4) опис усіх класів апріорного алфавіту класів мовою ознак з апріорного словника ознак;
- 5) розбивка апріорного простору ознак на області, що відповідають класам (видам фітопланктону) з апріорного алфавіту класів;
- 6) синтез алгоритмів розпізнавання;

7) визначення робочого алфавіту класів і робочого словника ознак з урахуванням реальних обмежень, що накладаються на метод розпізнавання при його реалізації;

8) вибір показника ефективності методу розпізнавання.

На ранніх етапах розвитку розпізнавання образів вважали, що такий підхід приведе до рішення майже всіх проблем, зв'язаних з аналізом зображень [62, 83]. Але існує ряд обмежень для методів розпізнавання образів. По-перше, зображення мають великі розміри і у багатьох випадках число можливих класів дуже велике. Тому обробка, яку повинен виконувати пристрій по розпізнаванню образів, часто не може бути виконана за прийнятний час. Більш важливе обмеження полягає в тому, що методами ідентифікації не можна одержати опис зображення, необхідний, наприклад, для вирішення практичних задач [62, 84, 85]. В багатьох випадках методи класичного розпізнавання образів виявляються непридатними для аналізу зображень у виробничих системах. Однак, існують деякі задачі аналізу зображень, що добре розв'язуються методами розпізнавання образів. Така можливість існує і для відеозображень фітопланктону в пробах води з водойм господарсько-побутового призначення.

Серед основних алгоритмів розпізнавання (ідентифікації) об'єктів вимірювань (фітопланктону) можна виділити дві наступні великі категорії [68, 82, 85].

Перша категорія базується на теорії прийняття рішень. Нехай маємо M класів об'єктів (видів фітопланктону) $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$, кожний з яких представляється вектором $p = (p_1, \dots, p_n)^m$ в n -мірному просторі ознак. Координатами цього вектора можуть служити, наприклад, будь-які ідентифікуючі ознаки, кількісні характеристики форми зображення об'єкта, параметри його математичного опису у вигляді аналітичних рівнянь, показники його яскравості, кольору текстури, значення логічних змінних, що вказують на наявність чи відсутність яких-небудь властивостей. В даному випадку це є ГПФ. Відповідно до теорії прийняття рішень, у загальному випадку потрібно знайти M дискримінуючих функцій $d_1(p), d_2(p), \dots, d_M(p)$ таких, що для довільного образу $p^* \in \omega_m$ виконується нерівність $d_m(p^*) > d_l(p^*)$ при всіх $l = \overline{1, M}, l \neq m$. Функції, що дискримінують, можна шукати, наприклад, у вигляді розкладання по системі яких-небудь відомих функцій: $d_m(p) = \sum_k \omega_{mk} \varphi_k(p)$. В якості $\varphi_k(p)$ можна вибрати, скажімо, поліноміальні функції p . Коефіцієнти ω_{mk} розкладання одержують в результаті навчання шляхом пред'явлення досить представницької вибірки об'єктів з точною вказівкою приналежності кожного з них до одного з перерахованих класів.

При побудові дискримінуючих функцій, часто використовують процедури узгодження з «еталонним» вектором ознак [86, 87]. Як еталонний вектор e_m для класу ω_m можна взяти, наприклад, вектор, координати якого є

середніми значеннями відповідних координат всіх об'єктів з даної класу, що пред'явлені у навчальній вибірці з екземплярами фітопланктону. Тоді для ідентифікуємого екземпляра фітопланктону з вектором геометричних параметрів p^* можна обчислити евклідові відстані в n -мірному просторі ознак

$$p_m = \left(\sum_{k=1}^n [p_k^* - (e_m)_k]^2 \right)^{1/2} \text{ від точки } p^* \text{ до еталонних точок } e_m \text{ кожного виду } i$$

вибрати «найближчого сусіда», тобто вид, що відповідає $\min_m p_m, m = \overline{1, M}$. Це еквівалентно вибору максимальної з M вирішальних функцій $d_m(p^*) = p^{*T} e_m - 1/2 e_m^T e_m$.

Слід зазначити, що на практиці іноді не переходять у n -мірний простір ознак, а застосовують концептуально спрощену й у загальному випадку трохи менш ефективну процедуру безпосереднього узгодження вихідного зображення $G(i, j)$ з «шаблоном» – еталонним зображенням $E_m(i, j)$ об'єкта даного класу. Прийняття рішень про вид пред'явленого екземпляра фітопланктону можна здійснювати по мінімуму якої-небудь міри його розходження з еталоном (наприклад: $\sum_i \sum_j |G(i, j) - E_m(i, j)|$ або

$$\sum_i \sum_j [G(i, j) - E_m(i, j)]^2) \text{ або по максимуму міри подібності, наприклад, } \sum_i \sum_j G(i, j) E_m(i, j) / \sum_i \sum_j E_m^2(i, j).$$

Застосовується і метод погодженої фільтрації: узгодження еталонного «фільтра» $E_m(i, j)$ із зображенням викликає піки взаємно кореляційної функції $R(\mu, \nu) = \sum_i \sum_j E_m(i, j) \times G(1 - \mu, j - \nu)$ у тій області (μ, ν) , де в полі зору є присутнім образ шуканого об'єкта.

Як вказувалося вище, при розрахунках такого роду доцільно користатися прямим і зворотним перетворенням Фур'є $F^{-1}[F(E_m) F(G)]$, орієнтуючись на їхню апаратну реалізацію, оскільки програмні алгоритми поточкового узгодження вимагають значних витрат часу. Крім того, подібні міри чутливі до шумів та геометричних викривлень і не завжди забезпечують інваріантність до зсувів і поворотів об'єктів. Тому зіставлення G і E намагаються проводити для об'єктів, що зафіксовані у визначених положеннях. Пропонувалося також зіставляти не все поле зору, а лише деякі фрагменти зображення всередині вікна, що підбирається, покриваючу околицю виділеної характерної риси об'єкта. Часто алгоритми прийняття рішень доповнюють логічними процедурами вибору мір подібності і розходження, наведення вікна та іншого настроювання методу розпізнавання.

Другу категорію методів ідентифікації об'єктів вимірювань складають структурно-синтаксичні методи. Вони базуються насамперед на аналізі

структурних відносин між фрагментами відеозображень об'єктів і використовують апарат дискретної математики.

Розроблено цілий ряд різних синтаксичних методів, таких як формальні граматики породження і розбору лінгвістичних описів класів образів, процедури перевірки правильності перетворень, правила представлення структурних відносин у вигляді дерев, графів, мереж. В розвиток чисто синтаксичного підходу починаються спроби ставити у відповідність кожному символу мови визначені семантичні оцінки, скажімо, списки логічних чи кількісних характеристик для кількісного опису відносин між фрагментами сцени пропонувалося, наприклад, з кожним із них зв'язати свою систему координат і поставити їй у відповідність вузол графа, ребрами якого служать просторові перетворення, з однієї системи координат в іншу [68, 77, 88].

Сукупність примітивів і інших ознак об'єкта разом з формалізованим описом їх відносин утворює модель цього об'єкта.

Більшість задач розпізнавання образів зводяться до наступної математичної постановки [62, 64]. Необхідно побудувати відображення $X \rightarrow Y$ таке, щоб на кожен можливий вхідний сигнал X формувався правильний вихідний сигнал Y . Відображення задається кінцевим набором пар (<вхід>, <відомий вихід>). Число таких пар (навчальних прикладів) істотно менше загального числа можливих сполучень значень вхідних і вихідних сигналів. Сукупність всіх навчальних прикладів називається навчальною вибіркою.

В задачах розпізнавання образів X – деяке представлення образу (відеозображення ГПФ), Y – номер класу, до якого належить вхідний образ (екземпляр фітопланктону).

В результаті побудови такого відображення (тобто $X \rightarrow Y$) необхідно домогтися того, щоб:

- забезпечувалося формування правильних вихідних сигналів у відповідності з усіма прикладами навчальної вибірки;
- забезпечувалося формування правильних вихідних сигналів у відповідності з усіма можливими вхідними сигналами, що не ввійшли в навчальну вибірку.

Друга вимога в значній мірі ускладнює задачу формування навчальної вибірки. У загальному вигляді ця задача в даний час ще не вирішена, однак для ряду задач можливо знайти часткове рішення. Далі будемо вважати, що навчальна вибірка вже сформована, виходячи з накопленого досвіду досліджень фітопланктону у водоймах.

Більшість вказаних задач можна успішно вирішити за допомогою методу ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону на основі ШНМ (рис. 2.3). Для настроювання алгоритму ідентифікації фітопланктону вимірюються ознаки (ГПФ) спеціально підібраних фрагментів відеозображень, точна ідентифікація яких відома. Цей набір фрагментів називається навчальною вибіркою. Результати вимірювань ГПФ відображаються в просторі ознак.

Для представлення багатомірних функцій багатьох перемінних може бути використана однорідна нейронна мережа, що має всього один схований шар, з сигмоїдальними передатними функціями нейронів.

Для оцінки числа нейронів у схованих шарах однорідних нейронних мереж можна скористатися формулою для оцінки необхідного числа синоптичних ваг L_w (в багатошаровій мережі із сигмоїдальними передатними функціями) [89]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m,$$

де n – розмірність вхідного сигналу;

m – розмірність вихідного сигналу;

N – число елементів навчальної вибірки.

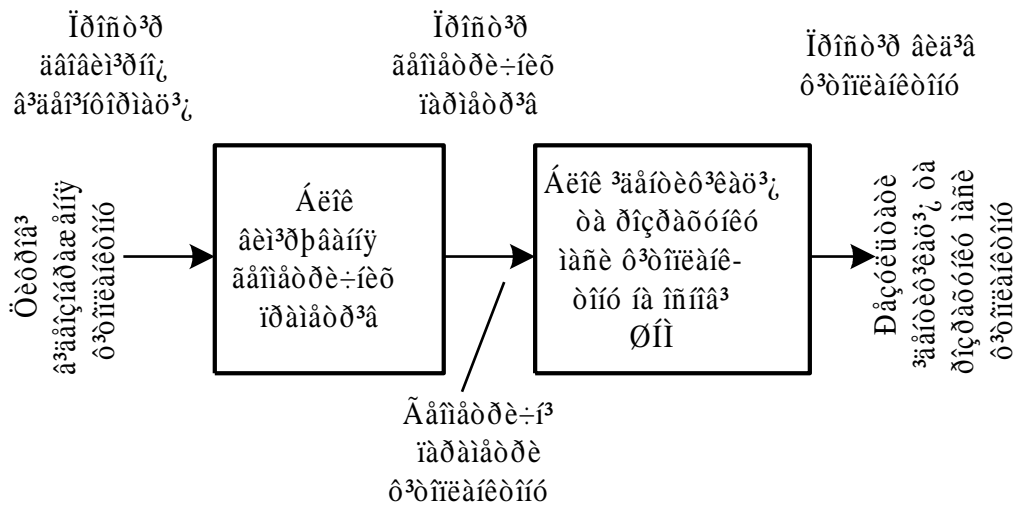


Рис. 2.3. Схема ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону на основі ШНМ

Оцінивши необхідне число ваг, можна розрахувати число нейронів в схованих шарах. Наприклад, число нейронів в двошаровій мережі складе:

$$L = \frac{L_w}{n + m}.$$

Можливе застосування і інших подібних формул виду [89]

$$2(L + n + m) \leq N \leq 10(L + n + m),$$

$$\frac{N}{10} - n - m \leq L \leq \frac{N}{2} - n - m.$$

Відповідно так само можна розрахувати число нейронів у мережах з великим числом шарів, що іноді доцільно використовувати: такі багатошарові нейронні мережі можуть мати менші розмірності матриць синоптичних ваг нейронів одного шару, ніж двошарові мережі, що реалізують те ж саме

відображення.

Таким чином, нейронні мережі є універсальними системами, придатними для вирішення задачі ідентифікації фітопланктону за його геометричними параметрами.

Очевидно, що процес функціонування ШНМ, тобто сутність дій, що вона здатна виконувати, залежить від величин синоптичних зв'язків, тому, задавшись визначеною структурою ШНМ, що відповідає даній задачі, необхідно знайти оптимальні значення всіх змінних перемінних вагових коефіцієнтів (деякі синоптичні зв'язки можуть бути постійними). Цей етап називається навчанням ШНМ, і від того, наскільки якісно він буде виконаний, залежить здатність мережі вирішувати поставлені перед нею проблеми під час функціонування [90, 91].

2.2.2. Аналіз вимірювальної інформації, що міститься у відеозображеннях проб води

Ідентифікуючі ознаки в задачі ідентифікації відеозображень фітопланктону повинні мати інваріантність до змін місця розташування і орієнтації об'єктів вимірювань (екземплярів фітопланктону). В якості таких ознак можуть безпосередньо використовуватися колір, текстура, яскравість об'єктів. Однак більш поширені ознаки, що характеризують форму цих об'єктів [62, 65, 88].

Ознаки форми обчислюються як по глобальних властивостях областей зображення, що представляють об'єкти, так і по локальних характеристиках контурних границь цих областей чи їх фрагментів. Велика група алгоритмів обчислення ознак базується на формальних методах, що задаються за допомогою математичних виразів (розрахунок коефіцієнтів апроксимуючих поліномів, розкладань на спектри, інтегральних інваріантів, топологічних показників і т.п.). Інша група охоплює так звані «лінгвістичні» методи ідентифікації образів, для яких ознаки вибираються (в результаті попереднього дослідження людиною конкретних класів об'єктів) у вигляді описів якісних властивостей окремих фрагментів і їх відносин – способів з'єднання чи взаємного розташування характерних елементів робочої сцени. Лінгвістичний підхід, властивий для теорії штучного інтелекту, використовувався для аналізу («граматичного розбору») сцен, складених з багатогранників і інших класичних геометричних тіл. Був розроблений цілий ряд методів представлення таких сцен у вигляді сукупностей найпростіших елементів («примітивів»), що описувалися графами відносин, цілеспрямованого пошуку особливостей графічного препарату на основі висування гіпотез (як ці особливості звичайно приймалися різні види перетинань двох і більш відрізків контурних ліній – кути, стрілки, вістря, T-, L-, K-, X-подібні перетинання).

Деякі з висунутих при цьому ідей знайшли відображення й в практичних задачах, де іноді вдається застосовувати евристичні правила класифікації

об'єктів шляхом перевірки наявності апріорно заданих характерних фрагментів (виступів, отворів, зламів границь визначеного типу), що знаходяться в потрібному просторовому співвідношенні. Для формального опису фрагментів границі знайшли застосування алгоритми, які засновані на перетворенні Хафа і його модифікаціях. Відрізок контурної лінії, який описується деяким рівнянням у декартовій системі координат, перетвориться в крапку у просторі параметрів цього рівняння. Кожній точці вихідного контуру, що лежить на кривій такого ж виду, відповідає визначена крива в просторі параметрів. Розбивши цей простір на осередки, будують гістограму числа проходжень кривих, що відображають кожну контурну крапку, через ці осередки. Піки на отриманій гістограмі свідчать про велику імовірність наявності на зображенні фрагмента, що описується кривою з відповідними параметрами [72, 88]. Необхідно відзначити, що в задачах ідентифікації відеозображень фітопланктону на основі штучних нейронних мереж використовуються не лінгвістичні алгоритми, а методи опису форми об'єктів змішаними наборами ознак із двох зазначених вище груп, які по суті є геометричними параметрами, що виміряні для екземплярів фітопланктону.

Геометричними параметрами, що характеризують зображення екземплярів фітопланктону, є їх площа, периметр, пераунд (нормоване відношення площі до квадрата периметра), розміри вписаного і описаного прямокутників, довжини максимального, мінімального і середнього радіусів-векторів (з'єднуючих геометричний центр зображення об'єкта з його границею), значення їх відношень до периметра чи один до одного, кут між максимальним і мінімальним радіусами-векторами. Ці ознаки так само, як і число отворів, число кутів, число виступів тощо, інваріантні до переміщень та поворотів екземплярів фітопланктону в площині відеозображення. Вказані геометричні параметри також широко використовуються для опису форми плоских фігур в інших практичних задачах ідентифікації об'єктів по їх двовимірним проєкціям і починають застосовуватися в тривимірному випадку для опису елементарних поверхонь, що апроксимують видимі ділянки просторових тривимірних об'єктів.

На жаль, прості геометричні ознаки, добре зрозумілі людині і нескладні в реалізації, далеко не завжди забезпечують однозначне розпізнавання об'єктів вимірювань. Наприклад, це має місце для силуетів двох різних об'єктів, що мають абсолютно однакові площу і периметр. Зрозуміло, що в кожному конкретному випадку людина може зрештою зрозуміти, чим відрізняються об'єкти один від одного, і вказати правила їх ідентифікації.

При навчанні ШНМ також використовуються елементи штучного інтелекту та правила розпізнавання, що були раніше доступні тільки людині. Формальні процедури навчання дають можливість автоматично (тобто без творчої участі людини) вибрати достатнє число потрібних ознак на етапі навчання ШНМ, коли їй пред'являються екземпляри всіх видів фітопланктону,

що ідентифікуються, і точно вказується їх приналежність тому чи іншому виду [86, 89, 92, 93].

2.2.3. Вибір набору геометричних параметрів для ідентифікації фітопланктону

Відеозображення фітопланктону, отримані після фільтрації шумів та сегментації, потрібно ідентифікувати, тобто визначити належність кожного екземпляра фітопланктону до одного з видів. Така ідентифікація може бути виконана на основі ознак об'єктів, які можна визначити по їх відеозображенням. Як вже зазначалось, відомо декілька методів ідентифікації об'єктів по їх відеозображенням: методи на основі геометричних параметрів та структурно-синтаксичні методи. Для ідентифікації фітопланктону обрано метод на основі геометричних параметрів, оскільки форма фітопланктону є відносно простою і окремі його екземпляри розглядаються і ідентифікуються незалежно один від одного. Ці параметри також використовуються для розрахунку показників стану водойми (об'єму і маси фітопланктону тощо).

Для ідентифікації фітопланктону за видовим складом доцільно використовувати геометричні параметри, інваріантні до зсуву і повороту екземплярів фітопланктону. Найбільшою мірою належність екземпляра фітопланктону певному виду характеризують моменти інерції. Головні моменти інерції розраховуються за формулою [62]:

$$J_{1,2} = \frac{1}{2}(J_x + J_y) \pm \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4}(J_x - J_y)^2}.$$

Моменти інерції J_x , J_y та J_{xy} розраховуються на основі значень функції яскравості $f(x, y)$ для множини Ω дискретних точок відеозображення, що належать об'єкту :

$$J_x = \sum_{\Omega} (x - x_c)^2 f(x, y),$$

$$J_y = \sum_{\Omega} (y - y_c)^2 f(x, y),$$

$$J_{xy} = \sum_{\Omega} (x - x_c)(y - y_c) f(x, y),$$

де x і y – координати дискретних точок об'єкта,
 x_c і y_c – координати центра мас об'єкта.

Замість функції яскравості може бути використані відеосигнал в одному з каналів цифрового кольорового відеозображення або результати сегментації відеозображень фітопланктону.

Координати центра мас об'єкта дорівнюють [62]:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} xf(x, y), \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} yf(x, y),$$

де N – кількість дискретних точок, що належать об'єкту.

Геометричні параметри відеозображень фітопланктонних водоростей, що використовуються для ідентифікації, є такими:

1. Еквівалентний діаметр: $d_e = \sqrt{4S/\pi}$, де S – площа об'єкта.
2. Коефіцієнти форми розраховувалися таким чином:
 - коефіцієнт випуклості: $k_c = S/S_c$, де S_c – випукла площа об'єкта (площа випуклого багатокутника, в який вписано об'єкт);
 - коефіцієнт заповнення: $k_f = S/(w \cdot h)$, де w і h – ширина і висота об'єкта;
 - ексцентриситет визначався для еліпса, що має головні моменти інерції такі ж, як у об'єкта.

Штучна нейронна мережа особливо ефективна у задачах ідентифікації фітопланктонних водоростей з тієї причини, що вона поєднує у собі здатність комп'ютера до обробки чисел і здатність мозку до узагальнення і розпізнавання.

2.3. Похибки вимірювань геометричних параметрів фітопланктону на відеозображеннях

2.3.1. Загальна характеристика похибок вимірювань

Результати вимірювань ГПФ та розрахунку його маси містять ряд похибок. Це пов'язане з тим, що в процесі формування, передачі і перетворення відеоінформації у вимірювальному каналі виникають похибки і викривлення, які мають вплив на точність вимірювань ГПФ та його маси. Вказані похибки пов'язані із загальними принципами перетворення візуальної інформації в цифрове відеозображення, з обраними характеристиками технічних засобів вимірювального каналу, з параметрами алгоритмів обробки вимірювальної відеоінформації (табл. 2.1).

Основою вимірювань ГПФ є визначення координат точок, що утворюють контур екземпляра фітопланктону на відеозображенні. Вимірне значення координати точки контуру дорівнює:

$$x_k^* = x_k + \Delta_{\text{мет}} + \Delta_{\text{инстр}},$$

де x_k – точне значення координати точки контуру,

$\Delta_{\text{мет}}$ – методична похибка визначення координати точки,

$\Delta_{\text{инстр}}$ – інструментальна похибка визначення координати точки.

Методичні похибки залежать від обраних методів формування та алгоритмічної обробки цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ. Інструментальні похибки визначаються неідеальністю конкретних екземплярів технічних засобів вимірювального каналу [77 - 79, 93].

Таблиця 2.1

Похибки вимірювань координат точок контурів екземплярів фітопланктону

Методичні похибки	Інструментальні похибки:
<p>Систематичні похибки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – викривлення амплітуди відеосигналу в межах контурів фітопланктону через обмеження його смуги частот; – розмиття контурів фітопланктону в оптичній системі відеокамери; – вплив методів алгоритмічної обробки дискретних значень амплітуди відеосигналу. <p>Випадкові похибки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – похибка, обумовлена дискретністю ПЗЗ-матриці; – похибка, обумовлена квантуванням амплітуди відеосигналу для цифрового відеозображення. 	<p>Систематичні похибки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – геометричні викривлення растра відеозображення в оптичній системі цифрової відеокамери; – похибки виготовлення ПЗЗ-матриці (похибки розташування і форми елементів матриці); – систематичні похибки АЦП (відмінність реальної характеристики перетворення від ідеальної). <p>Випадкові похибки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – зовнішні і внутрішні шуми в оптичній і електронній частині цифрової відеокамери; – випадкові похибки в АЦП.

Морфометричні ознаки та коефіцієнти форми фітопланктону, а також його маса розраховуються на основі результатів вимірювань координат точок контурів екземплярів фітопланктону. При проведенні цих розрахунків виникають похибки, що властиві будь-яким методам алгоритмічних обчислень з використанням цифрових засобів обробки інформації [34, 35, 66, 94 - 96]. Це похибка обчислення ГП, яка є наслідком похибки вимірювання координат точок контуру, похибка методу обчислень, пов'язана з використанням ряду чисельних методів [97 - 99], і похибка, пов'язана з обмеженою розрядністю цифрових даних при реалізації обчислювальних операцій в ЕОМ [76, 100]. Вплив цих похибок також необхідно враховувати при вимірюваннях ГПФ та його маси.

2.3.2. Математичні моделі похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Основною похибкою вимірювань ГПФ є похибка, обумовлена дискретним характером цифрового відеозображення. Визначимо ймовірнісні характеристики похибки дискретності як деякої випадкової величини.

В даному випадку для визначення похибки дискретності вхідна величина – це безперервне точне значення координати контуру екземпляра фітопланктону x_k , вихідна величина – це координати дискретних точок цифрового зображення x_k^* , що утворюють вказаний контур і змінюються з кроком, що дорівнює інтервалу дискретності δ_d .

Похибка дискретності $\Delta_\delta = x_k^* - x_k$ має рівномірний розподіл в діапазоні $\pm \delta_d/2$ при будь-якому законі розподілу вхідної величини x_k , якщо $\sigma_x^2 \gg \delta_d^2$,

де σ_x^2 – середньоквадратичне відхилення x_k як деякої випадкової величини з можливого діапазону значень ($x_{k \min}$, $x_{k \max}$) для деякого екземпляра фітопланктону [78, 101]. Тоді середнє значення похибки дискретності $\overline{\Delta_D} = 0$, а дисперсія $\overline{\Delta_D^2} = \delta_D^2 / 12$.

На основі цього можна сформулювати вимоги до цифрових відеозображень фітопланктону. При цьому бажано забезпечити рівномірний розподіл значень похибки дискретності і зменшення ймовірнісних характеристик відхилення значень координат об'єкта вимірювань від точних значень. Це можливе за умови, коли розмір об'єктів вимірювань значно більше відстані між центрами двох дискретних точок відеозображення. Тому при реалізації алгоритмів обробки відеозображень (див. розділ 5) було запроваджено видалення дрібних об'єктів, які не є фітопланктоном, а виникли внаслідок дії шумів на це відеозображення.

Визначимо ймовірнісні характеристики похибки, обумовленої квантуванням амплітуди відеосигналу при формуванні цифрового відеозображення у відеокамері. В загальному випадку квантування амплітуди є нелінійним перетворенням відеосигналу. Але відомо [101], що похибка квантування може бути замінена еквівалентним адитивним шумом квантування, що додається до корисного відеосигналу.

В [101] закон розподілу шуму квантування знаходиться, використовуючи характеристичну функцію випадкової величини $\Delta_{кв}$, яка дорівнює похибці аналого-цифрового перетворення для поточного значення вхідної величини. Послідовність значень похибки квантування утворює шум квантування. Характеристична функція похибки аналого-цифрового перетворення дорівнює:

$$P_{\Delta_{кв}}(\omega) = \int_{\Delta_{кв}} p(\Delta_{кв}) \cdot e^{j\omega \Delta_{кв}} d\Delta_{кв} = \sum_k P_u\left(\frac{2\pi k}{\delta_{кв}}\right) \cdot \frac{\sin[0,5\delta_{кв} \cdot (\omega + 2\pi k / \delta_{кв})]}{0,5\delta_{кв} \cdot (\omega + 2\pi k / \delta_{кв})},$$

де k – номер інтервалу квантування в АЦП, $k = 0, \dots, 2^{n_{АЦП}} - 1$,

$n_{АЦП}$ – кількість двійкових розрядів АЦП,

$P_u(\cdot)$ – характеристична функція вхідного сигналу АЦП при значенні аргументу, що дорівнює $2\pi k / \delta_{кв}$.

При цьому бажано забезпечити рівномірний розподіл значень похибки квантування і зменшення ймовірнісних характеристик відхилення значень амплітуди цифрового відеосигналу від точних значень. Для рівномірного розподілу похибки квантування на інтервалі $\pm 0,5\delta_{кв}$ необхідно забезпечити значення характеристичної функції

$$P(\omega) = \frac{\sin(0,5 \cdot \delta_{кв} \cdot \omega)}{0,5 \cdot \delta_{кв} \cdot \omega}.$$

Порівнюючи $P_{\Delta_{кв}}(\omega)$ і $P(\omega)$, бачимо, що похибка квантування розподілена рівномірно, якщо [101]:

$$P_u\left(\frac{2\pi k}{\delta_{кв}}\right) = \begin{cases} 1, & k = 0, \\ 0, & k \neq 0. \end{cases}$$

Ця умова виконується, якщо $\sigma_s^2 \gg \delta_{кв}^2$, де σ_s^2 – середньоквадратичне відхилення амплітуди відеосигналу як деякої випадкової величини з можливого діапазону значень (u_{min}, u_{max}).

Таким чином, похибка квантування відеосигналу має рівномірний розподіл в діапазоні $\pm\delta_{кв}/2$, середнє значення 0, дисперсія $\delta_{кв}^2/12$.

Розглянемо ймовірнісні моделі шуму, що виникає в електронних схемах цифрової відеокамери, присутній на цифровому відеозображенні і впливає на точність вимірювань ГПФ. Основні компоненти цього шуму – це тепловий і дробовий шум.

Тепловий шум [68, 79, 102] – адитивний випадковий процес з нормальним законом розподілу, статистично незалежний від відеосигналу. Спектральна щільність потужності (енергетичний спектр) напруги теплового шуму

$$W_{UT} = 4kTR_n,$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ В · с/градус,

T – абсолютна температура,

R_n – опір навантаження.

Так як енергетичний спектр теплового шуму не залежить від його частоти, то тепловий шум можна вважати “білим” шумом.

Дробовий шум в підсилювальних елементах [102] – це сукупність імпульсів, кожен з яких обумовлений переносом одного електрону. Струм на виході підсилювального елемента, як сума дуже великої кількості імпульсів, є випадковий процес з нормальним законом розподілу.

Спектральна щільність потужності струму дробового шуму

$$W_{ID}(\omega) = 2e_{el} I_0 \cdot |S_i(j\omega)|^2,$$

де e_{el} – заряд електрону, $e_{el} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл,

I_0 – середнє значення струму на виході підсилювального елемента,

$S_i(j\omega)$ – нормований спектр елементарного імпульсу струму, обумовленого переносом заряду одним електроном.

В смузі частот до $1,6 \cdot 10^{10}$ Гц можна виконати апроксимацію дробового струму “білим” шумом із спектральною щільністю потужності

$$W_{ID} = 2e_{el} I_0.$$

Шум в напівпровідникових перетворювачах “світло-сигнал” описано в [68, 79, 103]. По своїй фізичній природі шум в фотоємісійних перетворювачах є дробовим шумом, в фотопровідникових та фотогоальванічних

перетворювачах – шумом генерації-рекомбінації. При малих рівнях освітленості фотоелектричного перетворювача модель шуму – це випадковий процес з розподілом Пуассона. При середніх і великих рівнях освітленості можлива апроксимація шуму нормальним законом розподілу.

Визначимо амплітуду шуму на основі співвідношення сигнал-шум, що є нормованим значенням для кожного з пристроїв формування відеозображень. Співвідношення сигнал-шум дорівнює [77, 104]:

$$\Psi = 20 \lg \frac{U_{\delta} - U_{\epsilon}}{U_{ш \delta}},$$

де $U_{\delta} - U_{\epsilon}$ визначає повний динамічний діапазон відеосигналу від рівня чорного U_{ϵ} до рівня білого U_{δ} ,
 $U_{ш \delta}$ – діюче значення напруги шуму.

Переходячи до середньоквадратичного значення напруги шуму $\sigma_{ш}$, отримуємо:

$$\Psi = 20 \lg \frac{U_{\delta} - U_{\epsilon}}{\sigma_{ш}},$$

або

$$\sigma_{ш} = \frac{U_{\max}}{10^{(\Psi/20)}},$$

де U_{\max} – максимальне значення амплітуди відеосигналу на цифровому відеозображенні.

Так як шум має нормальний розподіл, то з ймовірністю 99,7% можна вважати, що

$$U_{ш \max} = K_a \cdot \sigma_{ш} = \frac{3 \cdot U_{\max}}{10^{(\Psi/20)}}.$$

Цифрові пристрої формування відеозображень забезпечують співвідношення сигнал-шум близько 50...55 дБ. Мінімальним допустимим значенням співвідношення сигнал-шум відео- та телевізійної техніки є 40 дБ. Для вказаних значень розраховано ймовірнісні характеристики амплітуди шуму на цифровому відеозображенні, за умови, що динамічний діапазон корисного відеосигналу кодується 8-розрядним двійковим кодом (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Характеристики шуму на цифровому відеозображенні

Співвідношення сигнал-шум, дБ	40	50	55
Максимальне значення амплітуди шуму, дискретних рівнів	7,65	2,42	1,36

Середньоквадратичне значення амплітуди шуму, дискретних рівнів	2,55	0,81	0,45
--	------	------	------

2.3.3. Заходи по зменшенню і компенсації похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Похибки вимірювань ГПФ та його маси можуть суттєво впливати на отримані результати вимірювань. Тому необхідно визначити заходи по зменшенню та компенсації цих похибок. Однією з переваг алгоритмічної обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ, є можливість оцінки різних складових частин похибки вимірювань і алгоритмічна реалізація заходів по їх зменшенню і компенсації. Розглянемо ці заходи, виходячи із математичної моделі процесу перетворення вимірювальної відеоінформації.

Важливою складовою частиною похибки вимірювань ГПФ є похибка, обумовлена дискретністю подання вимірювальної відеоінформації на цифрових відеозображеннях. Її величина визначається кількістю дискретних точок на цифровому відеозображенні. Для зменшення похибки дискретності необхідно збільшувати розмір відеозображення в дискретних точках. Але цей розмір обмежено можливостями апаратних засобів формування відеозображень.

Також бажано забезпечити рівномірний розподіл значень похибки дискретності і зменшення ймовірнісних характеристик відхилення значень координат об'єкта вимірювань від точних значень. Це можливе за умови, коли розмір об'єктів вимірювань значно більше відстані між центрами двох дискретних точок відеозображення. Тому при реалізації алгоритмів обробки відеозображень (див. розділ 5) було запроваджено видалення дрібних об'єктів, які не є фітопланктоном, а виникли внаслідок дії шумів на це відеозображення.

Похибка, обумовлена квантуванням амплітуди відеосигналу, визначається кількістю двійкових розрядів, що використовуються для кодування цифрової інформації про кожну дискретну точку відеозображення. Похибка квантування у порівнянні із іншими похибками значно менше впливає на точність вимірювань. Кількість двійкових розрядів амплітуди відеосигналу в більшості моделей цифрових відеокамер більша або дорівнює 8 і це забезпечує рівень похибки квантування, що є несуттєвим відносно інших похибок.

Викривлення амплітуди відеосигналу, обумовлені обмеженням його смуги частот та розмиттям зображення в оптичній системі відеокамери, негативно впливають на відтворення контурів об'єктів вимірювань на відеозображенні і приводить до виникнення систематичної похибки визначення координат цих об'єктів. Основним методом боротьби з вказаними викривленнями є відновлення відеозображень за допомогою фільтрації цих

викривлень. Така фільтрація реалізована на основі ШНМ та, відповідно, нейропроцесора (див. розділ 3).

Геометричні викривлення растра відеозображення в оптичній системі цифрової відеокамери компенсуються на основі використання тестових об'єктів вимірювань (рис. 2.4) із заздалегідь відомими геометричними параметрами та на основі алгоритмічної обробки відеозображень цих об'єктів [72].

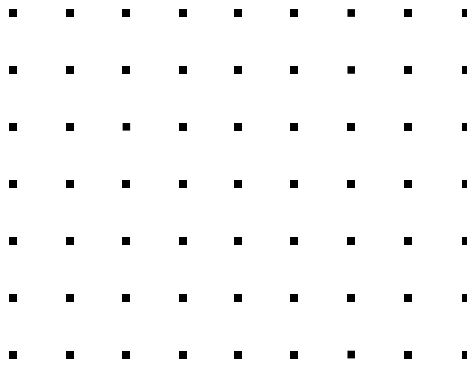


Рис. 2.4. Тестове об'єкт для визначення і компенсації геометричних викривлень растра відеозображення

Шуми, що виникають в цифровій відеокамері, також негативно впливають на точність вимірювань ГПФ. Зменшення цього впливу забезпечується низькочастотною фільтрацією. Так як в даному випадку амплітуда шуму має нормальний розподіл, а спектр частот шуму рівномірний (“білий” шум із нормальним законом розподілу амплітуди), то можна використовувати такі фільтри нижніх частот, як усереднюючий фільтр чи фільтр Гауса. Однак використання усереднюючого фільтра для зменшення впливу шуму на відеозображення фітопланктону призводить до розмиття цього відеозображення та погіршення його чіткості, а це погано впливає на точність вимірювань. Тому використовувався фільтр Гауса, який у порівнянні з усереднюючим фільтром значно менше “розмиває” відеозображення фітопланктону.

Таким чином, основною похибкою вимірювань, яка не може бути скомпенсована, є похибка дискретності. Вона дорівнює тобто половині відстані між сусідніми дискретними точками цифрового відеозображення. Інші похибки можуть бути суттєво зменшені шляхом алгоритмічної обробки відеозображень ГПФ в цифровій ЕОМ.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Створено новий метод вимірювань геометричних параметрів фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення. Цей метод базується на формуванні відеозображень проб води з водойм та алгоритмічній обробці вимірювальної відеоінформації. В рамках цього методу удосконалено існуючі процедури обробки двовимірної вимірювальної інформації про зміни

геометричних параметрів та маси фітопланктону у водоймах. Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень фітопланктону забезпечує автоматизацію процесу досліджень, розширює функціональні можливості та підвищує швидкість засобів вимірювань, що використовуються для контролю за станом водойм.

2. Розроблено методи ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону на основі результатів вимірювань ГПФ. ШНМ, як складова частина цих методів, особливо ефективна у задачах ідентифікації фітопланктону з тієї причини, що вона поєднує у собі здатність ЕОМ до обробки чисел і здатність мозку до узагальнення і розпізнавання. Базовим набором ознак для ідентифікації є ГПФ, визначені по його відеозображенням. Результати ідентифікації фітопланктону використовуються для розрахунку його маси.

3. Перетворення відеоінформації в процесі вимірювань супроводжується виникненням похибок, які суттєво впливають на точність вимірювань геометричних параметрів фітопланктону. Це такі похибки:

– похибка, обумовлена дискретністю подання вимірювальної відеоінформації на цифрових відеозображеннях (дискретність значень координат об'єктів вимірювань та дискретність значень амплітуди відеосигналу);

– похибка, пов'язана із шумом, що виникає в цифровій відеокамері;

– похибка, що викликана геометричними викривленнями в оптичній системі цифрової відеокамери;

– похибка, обумовлена викривленнями амплітуди відеосигналу через обмеження його смуги частот в електронних схемах та розмиття зображення в оптичній системі цифрової відеокамери;

– похибка алгоритмічних обчислень геометричних параметрів і маси фітопланктону.

4. Основною похибкою вимірювань геометричних параметрів, яка не може бути скомпенсована, є похибка, пов'язана із дискретністю цифрового відеозображення. Вона дорівнює половині відстані між сусідніми дискретними точками цифрового відеозображення. Ця похибка визначає максимально можливу точність вимірювань за умови, що інші похибки зменшені або скомпенсовані до незначного рівня.

4. На основі дослідження складових частин похибок вимірювань визначено заходи по їх зменшенню і компенсації, що дозволяє підвищити точність вимірювань геометричних параметрів і маси фітопланктону.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ ТА ЙОГО МАСИ

Для вимірювань ГПФ та його маси необхідно виконати ряд операцій по формуванню, перетворенню та обробці вимірювальної відеоінформації про ці параметри. Ці операції виконуються за допомогою технічних засобів, що утворюють автоматизовану систему для вимірювань ГПФ. В літературі [36 – 38, 64, 65, 68, 72] наведено загальні методи і математичні моделі процесів формування, перетворення та обробки цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію. Але вказані методи і математичні моделі не враховують особливостей відеозображень фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення і не можуть бути безпосередньо використані для вимірювань ГПФ та його маси. Тому необхідно удосконалити вказані методи, виходячи із задач, що вирішуються при розробці і практичному використанні засобів вимірювань геометричних параметрів фітопланктону.

В даному розділі:

– створено автоматизовану систему для вимірювань ГПФ у водоймах, яка має розширені функціональні можливості і підвищену швидкодію у порівнянні із існуючими засобами вимірювань;

– вперше запропоновано використання математичного апарату штучних нейронних мереж для обробки вимірювальної інформації про ГПФ, вимірювання ГПФ та його маси і контролю за станом ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення;

– розроблено методику обробки вимірювальної інформації про стан водойм, що включає формування та цифрову обробку відеозображень проб води з водойм, визначення геометричних параметрів фітопланктону, його ідентифікацію і розрахунок маси, в тому числі – з використанням штучних нейронних мереж;

– визначено склад та характеристики технічних засобів для реалізації обробки вимірювальної інформації на основі штучних нейронних мереж, а також оцінено похибки, що виникають при цьому.

Всі основні положення і методики даного розділу мають практичне застосування і підтверджені шляхом експериментальних досліджень вимірювань ГПФ (див. розділ 5).

3.1. Обґрунтування можливостей побудови вимірювальної системи та вибір технічних засобів

Вимірювання ГПФ та його маси потребує використання певного набору технічних засобів, що виконують формування та обробку цифрових відеозображень з метою визначення вказаних механічних величин. Ці технічні

засоби зображено на структурній схемі автоматизованої системи для вимірювань ГПФ (рис. 3.1). Найсуттєвішим елементом даної структурної схеми є вимірювальний канал, від якого в значній мірі залежать точнісні та часові характеристики процесу вимірювань ГПФ.

Елементи даної структурної схеми є складними технічними засобами. Тому було використано існуючі стандартні технічні засоби, а необхідні точність, швидкодію та функціональні можливості автоматизованої системи забезпечено на основі алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації.

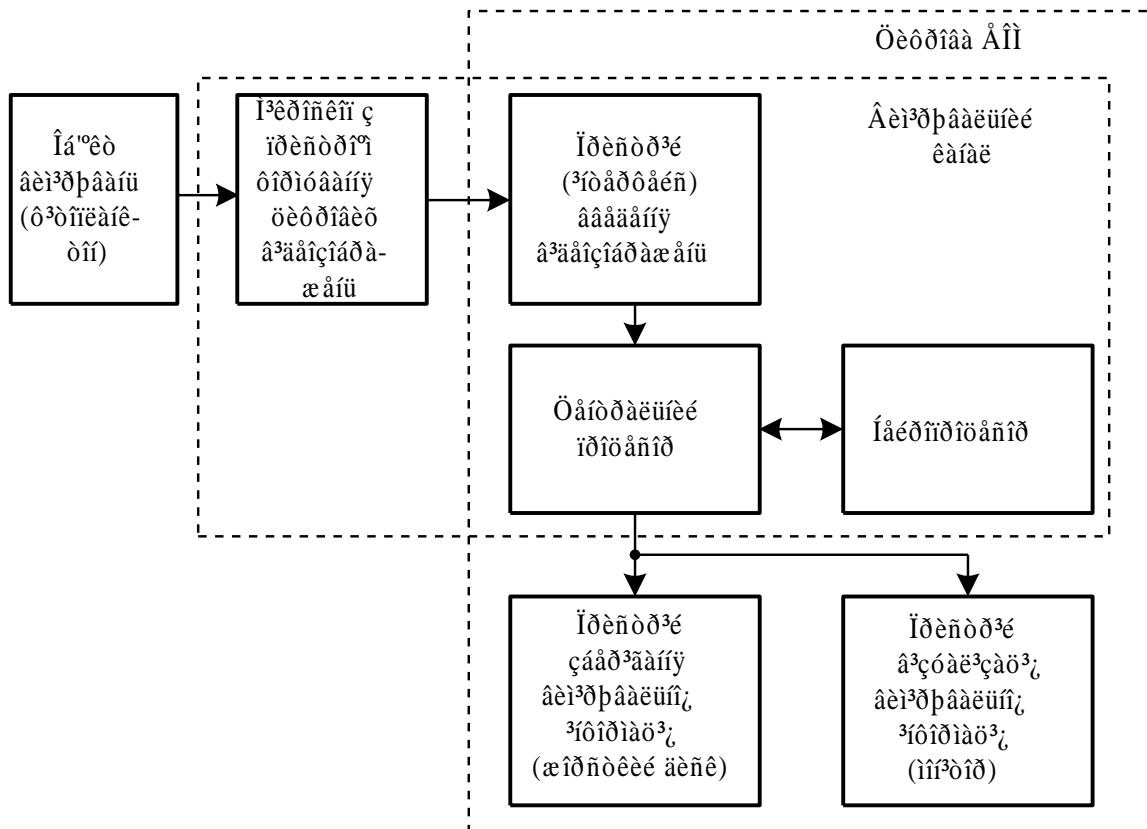


Рис. 3.1. Структурна схема автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Проведення вимірювань за схемою, зображеною на рис. 3.1, базується на таких принципах:

- використання стандартних технічних засобів формування і обробки цифрових відеозображень з параметрами, що забезпечують потрібні метрологічні характеристики автоматизованої системи;
- використання алгоритмічної обробки вимірювальної відеоінформації та забезпечення на цій основі потрібних функціональних можливостей і точнісних характеристик засобів вимірювань;
- пошук і вибір потрібних параметрів алгоритмів цифрової обробки відеозображень, виходячи з особливостей задачі вимірювань ГПФ, забезпечення потрібних точності та швидкодії автоматизованої системи, а також удосконалення цих алгоритмів;

– застосування стиснення відеозображень у цифровій відеокамері, без якого неможлива реєстрація та введення в обчислювальний пристрій наявного обсягу вимірювальної відеоінформації, а також неможливе компактне зберігання цього обсягу відеоінформації;

– застосування сучасних технологій штучного інтелекту в формі штучних нейронних мереж для обробки вимірювальної відеоінформації.

Процес вимірювання ГПФ та його маси забезпечується роботою технічних засобів (мікроскоп, пристрій формування цифрових відеозображень, цифрова ЕОМ та нейропроцесор) і програмного забезпечення, у якому реалізовано розроблені нові методи та алгоритми цифрової обробки відеозображень.

Найбільш досконалим у цій схемі є цифрова ЕОМ та нейропроцесор, можливості яких дозволяють здійснювати обробку вимірювальної відеоінформації. При проведенні наукових досліджень змін ГПФ у водоймах, як правило, необхідно використовувати персональний комп'ютер, при вирішенні виробничих задач контролю за станом водойм господарсько-побутового призначення – промисловий комп'ютер або мікроконтролер.

Існують різноманітні алгоритми обробки цифрових відеозображень [64, 68, 69, 72, 105], які реалізовані в такому потужному програмному продукті як Matlab, та його складових частинах – пакетах Image Processing Toolbox та Neural Network Toolbox [80, 81, 106]. Ці засоби було використано для вирішення наукових задач та для відпрацювання і налагодження алгоритмів обробки вимірювальної відеоінформації на етапі створення діючого макету автоматизованої системи, а також для можливого впровадження цієї системи у виробництво та вирішення виробничих задач.

Широкое застосування інформаційно-комп'ютерної техніки призвело до створення різноманітних технічних засобів отримання цифрових відеозображень, що містять вимірювальну відеоінформацію [70, 79, 107]. Ці засоби цілком здатні забезпечити отримання відеозображень проб води з фітопланктоном, розміщених у мікроскопі. Основними з цих засобів є цифрові фотоапарати та цифрові відеокамери. Вони можуть бути використані для формування цифрових відеозображень проб води. Отримані таким чином відеозображення придатні до алгоритмічної обробки з метою визначення ГПФ та його маси. Саме ці показники є початковими даними для оцінки стану водойм господарсько-побутового призначення та прогнозування розвитку фітопланктону. Адже потенційні можливості фітопланктону до розмноження є досить високими, цей процес здатний дуже швидко виходити з під контролю та досягати катастрофічних масштабів. Стан водойм при цьому суттєво змінюється, що в кінцевому рахунку призводить до значного погіршення якості питної води [55]. Виходячи з вищесказаного слід зауважити, що результати вимірювань ГПФ на відеозображеннях використовуються для вирішення багатьох наукових і виробничих задач. Наприклад, важливою виробничою задачею є забезпечення якісного водопостачання населених

пунктів. Це неможливо без контролю за процесами розвитку ГПФ у водоймищах, які використовуються для водопостачання населення.

Розглянемо параметри технічних засобів, що входять до складу автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси.

Для формування відеозображень проб води з фітопланктоном було використано мікроскоп МС 200Т (виробництво "Micros", Австрія) [108] з вбудованою цифровою відеокамерою (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Основні технічні характеристики мікроскопа МС 200Т

Збільшення	40 ^x ... 1000 ^x (в стандартній комплектації)
Візуальна насадка	Тринокулярна, повертається на 360° з нахилом 30°, компенсація діоптрійної різниці (±5 діоптрій), міжзрачкова відстань 55...75 мм, світлоподілення між каналами 80% та 20% або 100% та 0%)
Окуляр	Широкопольний WF 10 ^x /18 мм
Набір об'єктивів (збільшення/чисельна апертура)	Ахроматичні об'єктиви 4 ^x /0,10; 10 ^x /0,25; 40 ^x /0,65 підпружинений; 100 ^x /1,25 підпружинений з масляною імерсією

Модель мікроскопу МС 200Т має тринокулярну візуальну головку, яка необхідна для підключення відеокамери, інший канал візуальної головки використовується для підключення бінокулярної насадки з метою безпосереднього візуального спостереження за фітопланктоном. Ахроматичні об'єктиви – це відносно прості об'єктиви з невеликою кількістю лінз. Забезпечують хорошу корекцію по кольору. У цих об'єктивах видалені сферична аберация, хроматична аберация положення, кома, астигматизм і частково сферохроматична аберация. Забезпечені плоскість поля зору в центрі зображення для полів зору діаметром до 18 мм та виправлення викривлень по полю зору приблизно на 2/3 площини.

До мікроскопу можуть бути підключені декілька моделей цифрових відеокамер, в тому числі САМ 2800, САМ РК-1030, САМ Professional. Ці відеокамери не потребують спеціальних перехідних оптичних пристроїв, а вбудовуються прямо в окуляр мікроскопа. До комп'ютера ці відеокамери підключаються через один з стандартних інтерфейсів передачі цифрових даних, наприклад USB-інтерфейс. Безпосередньо в автоматизованій системі для вимірювань ГПФ було використано відеокамеру САМ 2800 (табл. 3.2), що є компактною цифровою відеокамерою для економічних комп'ютерних мікроскопів та забезпечує точність вимірювань, достатню для контролю за станом водойм господарсько-побутового призначення. Інші дві відеокамери мають більшу вартість та можуть бути використані у випадку необхідності подальшого підвищення точнісних характеристик автоматизованої системи.

Таблиця 3.2

Основні характеристики цифрової відеокамери САМ 2800

ПЗС-матриця	Panasonic CCD 1/3"
Розподільча здатність	359 600 дискретних точок, 360 ТВ-ліній по горизонталі
Баланс білого кольору	Автоматичний
Світлочутливість	1,0 люкс
Вихідний сигнал	Цифровий за стандартом USB
Джерело живлення	Постійна напруга з USB-інтерфейсу цифрової ЕОМ
Умови експлуатації	18 ... 35°С, вологість до 85%
Вага і габарити	112 г, 60x30x30 мм

САМ РК-1030 – це професійна цифрова відеокамера, призначена для отримання відеозображення високої розподільчої здатності і якості. Відеокамера має цифровий (IEEE-1394) і аналоговий (RGB) виходи. Керування об'єктивом і настройками відеокамери здійснюється від ЕОМ через інтерфейс IEEE-1394 з використанням програмного забезпечення.

Технічні характеристики САМ РК-1030:

- ПЗС-матриця: 1/2"; прогресивне сканування растру; кількість дискретних точок 1,5 млн;
- розподільча здатність: 1360x1024 або 1280x960 дискретних точок; 800 телевізійних ліній по горизонталі;
- частота кадрів у відеопослідовності: 7,5 кадрів в секунду;
- формати відеозображень: BMP, TIFF, JPEG, MJPEG;
- квантування амплітуди відеосигналу: 10 біт у вбудованому аналого-цифровому перетворювачі, 8 біт у вихідному сигналі відеокамери;
- підсилення відеосигналу: 0 ... +12 дБ;
- швидкість затвору: 4, 2, 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000 с;
- баланс білого кольору: автоматичний або ручний;
- цифровий вихід: по інтерфейсу IEEE-1394;
- аналоговий вихід: RGB-сигнали;
- електроживлення: 12 В постійного струму від блоку живлення або 8 В постійного струму з інтерфейсу IEEE-1394;
- потужність, що споживається: Вт;
- умови експлуатації: 0 ... +40°С, вологість до 85%;
- вага та габарити: 0,5 кг, 66x64x120 мм.

САМ Professional – це професійна цифрова відеокамера з програмним забезпеченням Visual Communication Suite, що призначене для введення відеозображень в ЕОМ і керування відеокамерою, а також для обробки, зберігання та архівації відеозображень.

Технічні характеристики САМ Professional :

- розподільча здатність: 1,2 млн. дискретних точок (відеозображення розміром 1260x960 або 640x480 дискретних точок);
- підключення до ЕОМ через інтерфейсну плату та системну шину PCI або через інтерфейс PCMCIA до ноутбука.
- інші характеристики подібні до відеокамери САМ РК-1030.

Серед всіх технічних характеристик мікроскопу та відеокамери найважливішою є розподільча здатність та точність вимірювань ГПФ. В даному випадку розподільча здатність складається з оптичної розподільчої здатності оптичної системи мікроскопу та розподільчої здатності відеокамери, що обмежується кількістю дискретних точок в ПЗС-матриці.

Вимірювальний комплекс на основі мікроскопа з вбудованою відеокамерою має схему об'єктив-тубус-телевізійна камера. В такому випадку зображення від об'єктиву проектується безпосередньо на ПЗС-матрицю відеокамери.

Відомо, що розподільча здатність оптичної системи мікроскопа при спостереженні реальних об'єктів дорівнює [109 - 111]

$$\delta_{oc} = \frac{\lambda}{2A},$$

де λ – довжина хвилі світла; A – чисельна апертура об'єктива мікроскопа.

Чисельна апертура дає уяву про максимальне ефективне збільшення при добутку на 1000, тобто про таке збільшення, при якому два суміжні об'єкти вимірювань ще відрізняються як окремі.

В мікроскопі Micros 200T для видимого світла ($\lambda = 0,53$ мкм) та збільшення 400^x маємо:

$$\delta_{oc} = \frac{0,53\text{мкм}}{2 \cdot 0,65} = 0,41\text{мкм}.$$

Визначимо розподільчу здатність відеокамери. При збільшенні 400^x поле зору відеокамери по горизонталі складає 250 мкм, а розмір ПЗС-матриці дорівнює 640 дискретних точок. Тому розподільча здатність відеокамери $\delta_{ек} = 250\text{мкм} / 640 = 0,39$ мкм.

Таким чином, характеристики оптичної системи та цифрової камери в мікроскопі є узгодженими між собою ($\delta_{ек} \approx \delta_{oc}$). Значення розподільчої здатності оптичної системи визначає мінімальну відстань між двома точками об'єктів вимірювань, для яких можуть бути зафіксовані різні значення координат в процесі вимірювань ГПФ. Значення розподільчої здатності відеокамери визначає похибку дискретності, що має місце при вимірюванні лінійних розмірів екземплярів фітопланктону.

Для введення в ЕОМ відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ, використовується цифровий інтерфейс передачі даних. Такий інтерфейс дозволяє підключати до цифрової ЕОМ різні периферійні пристрої і перетворювачі вимірювальної інформації [76, 112].

Основними характеристиками інтерфейсу є:

- пропускна спроможність (швидкість передачі даних);
- максимальна довжина сигнальних ліній інтерфейсу;
- спосіб передачі даних (паралельний або послідовний),
- режими передачі даних (послідовний або паралельний, синхронний або асинхронний);
- топологія (схема) підключення та способи підключення периферійних пристроїв та вимірювальних перетворювачів;
- наявність пристроїв даного інтерфейсу в обладнанні, що формує, передає та накопичує вимірювальну інформацію.

Найбільш суттєвою характеристикою, що впливає на швидкодію вимірювальної системи, є пропускна спроможність. Вона залежить від способу передачі даних, електричних параметрів, максимальної довжини ліній інтерфейсу та режимів передачі даних.

Для введення відеозображень можуть бути використані інтерфейси IEEE 1394 (FireWire) або USB [76].

Інтерфейс USB (Universal Serial Bus – універсальна послідовна шина) є стандартним елементом архітектури цифрових ЕОМ, орієнтованим на інтеграцію з різними периферійними пристроями, в тому числі і з пристроями формування цифрових відеозображень. Сучасна версія USB 2.0, забезпечує швидкості передачі даних: низька швидкість LS (Low Speed) – 1,5 Мбіт/с, повна швидкість FS (full speed) – 12 Мбіт/с, висока швидкість HS (High Speed) – 480 Мбіт/с. Висока швидкість дозволяє суттєво розширити коло пристроїв, що підключаються до інтерфейсу. Перш за все, це важливо для пристроїв формування цифрових відеозображень. USB 2.0 дозволяє передавати послідовність відеозображень великого розміру з мінімальним стисненням і з високою якістю.

Стандарт цифрового інтерфейсу IEEE 1394 був прийнятий у 1995 році. Стандарт IEEE 1394 визначає три можливі швидкості передачі цифрових даних: 98,304, 196,608 і 393,216 Мбіт/с, що округлюють до 100, 200 і 400 Мбіт/с.

Основні властивості інтерфейсу IEEE 1394:

1. Багатофункціональність. Шина забезпечує цифровий зв'язок до 63 периферійних пристроїв без застосування додаткової апаратури. Цифрові відеокамери, цифрові фотоапарати, цифрові CD і DVD накопичувачі даних, периферійні пристрої ЕОМ (принтери, сканери, пристрої дискової пам'яті) і самі ЕОМ можуть бути об'єднані в локальну мережу.

2. Висока швидкість обміну даними. Шина дозволяє навіть на початковому рівні (100 Мбіт/с) передавати одночасно два канали відео (30 кадрів за секунду) високої якості.

3. Низька ціна компонентів.

4. Простота налаштування і використання. FireWire допускає динамічне підключення і відключення пристроїв.

В автоматизованій системі для вимірювань ГПФ та його маси було обрано інтерфейс USB для підключення відеокамери САМ 2800 до ЕОМ, як такий що має достатню пропускну спроможність та наявний у цій відеокамері та цифровій ЕОМ.

Мінімальними вимогами до технічних засобів ЕОМ, яка виконує алгоритмічну обробку вимірювальної інформації про ГПФ, є: процесор Pentium 4 або Celeron з тактовою частотою 2 ГГц; оперативна пам'ять 512 Мбайт; монітор та відеокарта з розрізненням 1024x768 дискретних точок; дискова пам'ять 80 Гбайт; наявність інтерфейсів USB або IEEE 1394.

3.2. Принципи побудови засобів вимірювання геометричних параметрів об'єктів за їх відеозображеннями

Вимірювальну систему з комп'ютеризованою обробкою відеозображень можна віднести до засобів вимірювань неелектричних величин, що перетворюють ці величини у електричні. Типові структурні схеми, принципи побудови та вимірювальні перетворювачі вказаних засобів вимірювань розглянуто в [17, 18, 22 - 24]. Однак, в цих публікаціях розглянуто загальні принципи побудови і структуру засобів вимірювань, але не враховані особливості, що пов'язані з формуванням та комп'ютеризованою обробкою відеозображень.

Відомо багато наукових публікацій, що висвітлюють побудову технічних систем, призначених для обробки відеозображень [36, 74, 75, 107, 113 - 115]. Це, наприклад, системи технічного зору в робототехніці, інформаційні та мультимедійні системи. Але в них не завжди в повній мірі враховуються вимоги до метрологічних характеристик відеозображень, що впливають з необхідності розрахунку ГП ОБ на основі вимірюваних координат точок цих об'єктів. Існуючі технічні рішення в області систем технічного зору та інформаційно-вимірювальних систем з візуалізацією ОБ викладено в [36 - 38, 71, 74, 75, 116, 117].

Тому на цій основі необхідно розробити принципи побудови нової вимірювальної системи, що призначена для вимірювання ГП об'єктів на основі комп'ютеризованої обробки відеозображень. Суттєвою відмінністю розроблених принципів побудови вимірювальної системи є використання сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій для формування та комп'ютеризованої обробки відеозображень [36, 37, 59, 75]. Також враховано принципи побудови засобів вимірювань механічних величин [17 - 19, 22] та сучасні методи обробки вимірювальної інформації [73, 118].

Вимірювальна система побудована на основі таких принципів:

1. Використання існуючих технічних засобів формування відеозображень ОБ, що забезпечують високу розподільчу здатність і швидкодію вимірювальної системи. [36, 59, 107]. Тому розробка нових технічних засобів для вимірювальної системи є недоцільною. Високі

розподільча здатність і швидкодія цих засобів є технічною базою для вирішення наукової проблеми даної роботи.

2. Застосування комп'ютеризованої обробки відеозображень в цифровій ЕОМ, що входить до складу вимірювальної системи. Метою комп'ютеризованої обробки є алгоритмічна компенсація похибок відеозображень та похибок вимірювання ГП об'єктів. Таким чином, забезпечується суттєве підвищення точності вимірювальної системи. Використання сучасних методів накопичення, аналізу і візуалізації відеозображень і результатів вимірювання ГП також розширює функціональні можливості вимірювальної системи.

3. Розробка та використання у вимірювальній системі нових методів комп'ютеризованої обробки відеозображень (методів фільтрації та відновлення відеозображень, методів пошуку і виділення ОВ, методів апроксимації контурів і траєкторій руху ОВ). Ці методи повинні враховувати високі вимоги до точності і швидкодії вимірювання ГП ОВ.

4. Розробка та використання у вимірювальній системі методів перетворення та стиснення відеозображень. Метою застосування цих методів є підвищення точності і компактності вимірювальної інформації про ГП при її накопиченні та зберіганні, підвищення швидкодії вимірювальної системи.

5. Використання часових послідовностей відеозображень для ідентифікації параметрів руху ОВ. Для ідентифікації параметрів руху необхідно додатково розробити методи комп'ютеризованої обробки відеозображень в реальному часі на основі теорії ідентифікації технічних систем. Результати ідентифікації використовуються для компенсації динамічних похибок вимірювання ГП об'єктів, що рухаються в процесі вимірювань.

6. Оптимізація параметрів вимірювальної системи відповідно до поточних характеристик ОВ та умов вимірювання ГП. В тому числі – це оптимізація параметрів відеозображень, параметрів технічних засобів вимірювального каналу та параметрів комп'ютеризованої обробки відеозображень. При цьому потрібно враховувати те, що підвищення точності та швидкодії вимірювальної системи є задачами, які висувають різні вимоги до вказаних параметрів. Тому необхідно використовувати методи оптимізації у вимірювальній системі. Результатом вирішення оптимізаційних задач є підвищення точності вимірювальної системи при заданій швидкодії або підвищення швидкодії при заданій точності.

7. Використання сучасних технологій візуалізації ОВ та обробки вимірювальної інформації на основі теорії штучних нейронних мереж. Ці мережі здійснюють адаптацію та оптимальне настроювання параметрів вимірювальної системи відповідно до робочих умов вимірювання ГП, що характеризуються впливом несприятливих і нестаціонарних факторів на вимірювальну систему. Результатом застосування штучних нейронних мереж є компенсація додаткової похибки вимірювання ГП і параметрів руху ОВ у

вказаних умовах. Якщо у вимірювальній системі використовується нейропроцесор, то також забезпечується суттєве підвищення її швидкодії.

На основі розроблених принципів побудови створено нову вимірювальну систему для вимірювання ГП об'єктів (рис. 3.2).

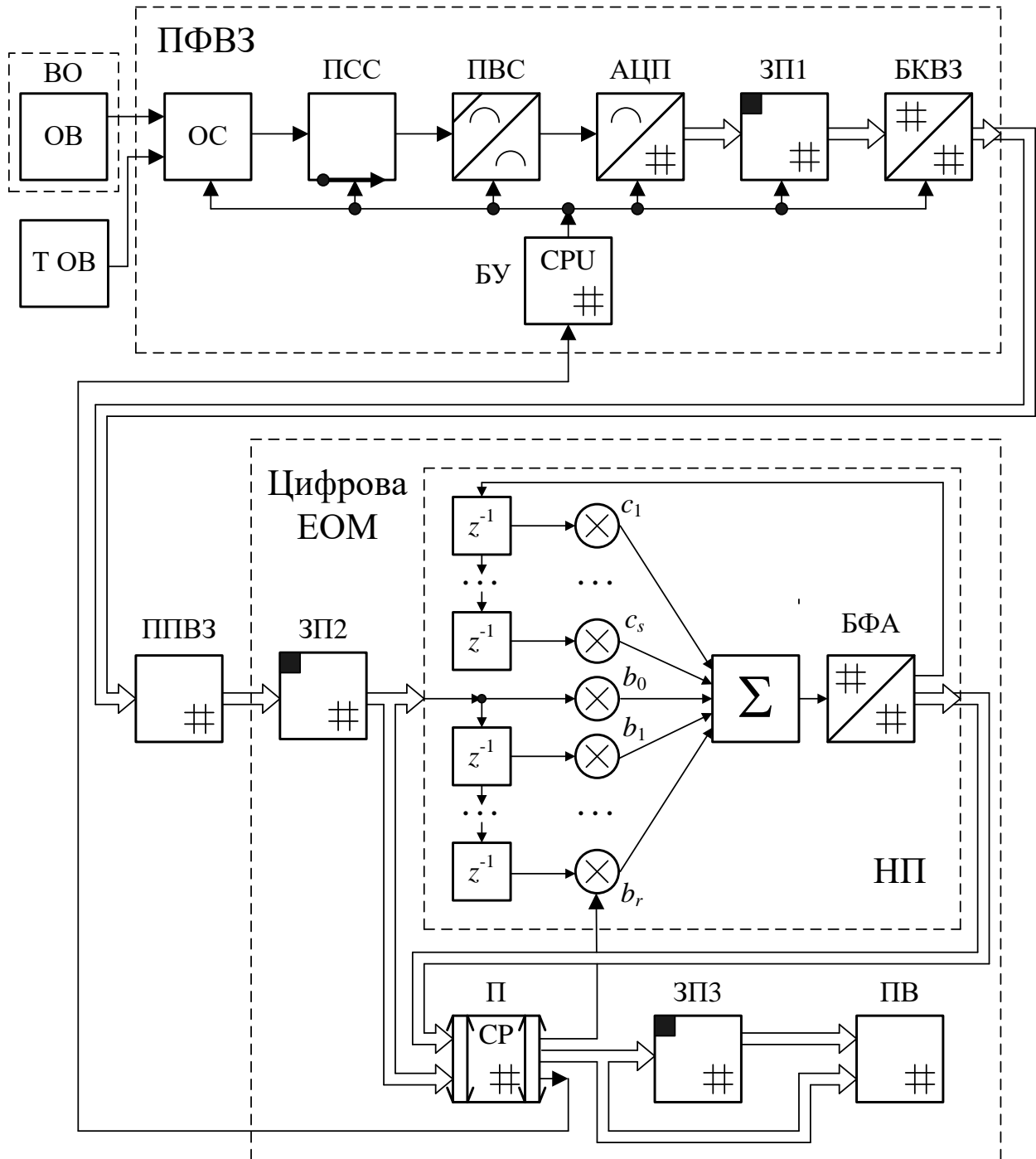


Рис. 3.2. Вимірювальна система для вимірювання ГП об'єктів на основі комп'ютеризованої обробки відеозображень

На рис. 3.2 позначено: ОВ – об’єкт вимірювань; ВО – виробниче або лабораторне обладнання; Т ОВ – тестовий ОВ для калібрування вимірювального каналу; ПФВЗ – пристрій формування відеозображень; ОС – оптична система ПФВЗ; ПСС – перетворювач «світло-сигнал»; ПВС – підсилювач відеосигналу; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЗП1 ... ЗПЗ – запам’ятовуючі пристрої для відеозображень; БКВЗ – блок кодування відеозображень; БУ – блок управління ПФВЗ; ППВЗ – пристрій передачі відеозображень в цифрову ЕОМ; НП – нейропроцесор у складі цифрової ЕОМ; z^{-1} – блок затримки; $c_1...c_s, b_0...b_r$ – вагові коефіцієнти штучної нейронної мережі, що настраюються відповідно до поточних умов вимірювань; БФА – блок функції активації нейронної мережі; П – процесор цифрової ЕОМ; ПВ – пристрій візуалізації відеозображень і результатів вимірювання ГП об’єктів.

У вимірювальній системі в якості пристрою обробки відеозображень використовується цифрова ЕОМ, до складу якої додатково введено нейропроцесор. Нейропроцесор містить базові елементи штучних нейронних мереж, які з’єднані в певній послідовності і використовуються для відновлення відеозображень з випадковими і динамічними похибками вимірювальної інформації про ГП, для пошуку і виділення ОВ та їх структурних елементів на відеозображеннях. Завдяки адаптивним властивостям штучної нейронної мережі, параметри алгоритмів обробки відеозображень можуть налаштовуватися відповідно до поточних умов вимірювань та властивостей ОВ. В результаті, компенсується додаткова похибка вимірювань геометричних параметрів об’єктів і суттєво підвищується точність вимірювальної системи.

У вимірювальній системі вихід другого запам’ятовуючого пристрою відеозображень підключено до додаткового входу пристрою візуалізації відеозображень і результатів вимірювання ГП. Таке рішення забезпечує безпосередню передачу на цей пристрій результатів обробки поточного відеозображення та результатів вимірювання геометричних параметрів об’єктів. При цьому цифрова ЕОМ виконує обробку наступного відеозображення. В результаті, підвищується швидкодія вимірювальної системи.

У вимірювальній системі використовується комп’ютеризована обробка відеозображень ОВ з метою вимірювання їх ГП. При цьому оптико-електронними методами формується відеозображення ОВ. Це здійснюється шляхом растрового сканування двовимірного образу ОВ, що створений оптичною системою ПФВЗ на поверхні матричного перетворювача «світло-сигнал». Для комп’ютеризованої обробки сформованих відеозображень в цифровій ЕОМ використовуються методи фільтрації та відновлення відеозображень, методи пошуку і виділення контурів ОВ та множини точок, що належать ОВ. У результаті, вимірюються координати точок, що належать ОВ.

Результати вимірювань координат точок використовуються у вимірювальній системі для розрахунку ГП ОВ та їх структурних елементів (довжина і ширина, площа, кут орієнтації головної осі інерції, центр мас, морфометричні ознаки, коефіцієнти геометричної форми екземплярів фітопланктону).

В ході калібрування вимірювального каналу вимірювальної системи використовуються: тестові ОВ з відомими лінійними розмірами для визначення масштабних коефіцієнтів k_{mx} , k_{my} в рівняннях вимірювань; тестові ОВ з відомими характеристиками поверхні та процедури адаптації та навчання штучних нейронних мереж, що дозволяють компенсувати вплив нестационарних та несприятливих факторів на вимірювальну систему в умовах промислових підприємств.

Технічні засоби вимірювальної системи забезпечують формування та алгоритмічну обробку відеозображень. Це ПФВЗ, ППВЗ та цифрова ЕОМ.

В якості ПФВЗ можливе використання різних технічних засобів [59, 107, 113, 114]. Це можуть бути аналогові і цифрові відеокамери, цифрові фотоапарати. Різні технічні засоби можуть формувати вихідне відеозображення в аналоговій або цифровій формі. На теперішній час найбільш досконалими і розповсюдженими є цифрові засоби формування відеозображень. Розподільча здатність та швидкодія цих засобів є достатньою для вимірювальної системи.

ППВЗ забезпечує введення відеозображень в цифрову ЕОМ [107, 119]. У вимірювальній системі з цифровими ПФВЗ використовуються інтерфейси *USB* або *IEEE 1394*. Якщо в реальному часі вимірюється рух ОВ з високою швидкістю, то необхідна швидкодіюча спеціалізована цифрова відеокамера і електронна плата для підключення цієї відеокамери до системної шини цифрової ЕОМ.

Для підвищення точності вимірювальної системи необхідна обробка відеозображень з метою алгоритмічної компенсації похибок, що здійснюється обчислювальними засобами. Відомі оптичні обчислювальні засоби, що виконують обробку відеозображень в аналоговій формі [120], та цифрові обчислювальні засоби, що виконують комп'ютеризовану обробку відеозображень в цифровій формі [36, 37, 121, 122].

В оптичних засобах виконується багатоканальна паралельна обробка відеозображень. Оптичні засоби мають високу швидкодію, але точність вимірювальної системи на основі таких засобів буде нижчою, ніж на основі цифрових засобів. Це пояснюється технологічними обмеженнями на точність виготовлення складових частин оптичних засобів. Тому у вимірювальній системі використовуються цифрові обчислювальні засоби (цифрова ЕОМ) з метою підвищення точності результатів вимірювання ГП. При цьому ефективним варіантом підвищення швидкодії вимірювальної системи з цифровою ЕОМ є введення до її складу нейропроцесора. Цей процесор містить

базові елементи штучних нейронних мереж, що виконують швидкісну паралельну обробку цифрових відеозображень [126 - 129].

Згідно розроблених принципів побудови, важливою складовою частиною комп'ютеризованої обробки відеозображень у вимірювальній системі є штучні нейронні мережі. Відомо багато різних типів цих мереж та прикладів їх застосування у задачах автоматизації, управління, обробки сигналів [39 – 41]. Нейронні мережі можуть бути застосовані для лінійних і нелінійних операцій обробки сигналів, що містять вимірювальну інформацію [123, 124]. Оскільки вимірювальна система повинна мати підвищену швидкодію та забезпечувати вимірювання ГП та параметрів руху в реальному часі, то слід надати перевагу лінійним методам алгоритмічної обробки. Лінійні методи можуть бути реалізовані на основі адаптивної лінійної нейронної мережі [123, 124], що складається з ряду адаптивних лінійних нейронів.

На основі штучних нейронних мереж можуть бути реалізовані такі операції комп'ютеризованої обробки відеозображень:

1. Алгоритмічна компенсація випадкових і динамічних похибок відеозображень, отриманих від ПФВЗ.
2. Пошук та виділення ОВ на відеозображеннях.
3. Ідентифікація параметрів руху ОВ на основі часових послідовностей відеозображень з наступною компенсацією динамічних похибок за результатами ідентифікації.

Зазвичай, вказані операції комп'ютеризованої обробки розробляються на основі апріорних відомостей про відеозображення та їх похибки. Ці відомості відповідають нормальним умовам проведення вимірювань і усередненим значенням параметрів відеозображень та ПФВЗ. В робочих умовах роботи вимірювальної системи ці параметри можуть відхилитися від значень, використаних при розрахунках. Внаслідок цього виникає додаткова похибка вимірювання ГП і параметрів руху ОВ вимірювальною системою.

Для компенсації цієї похибки необхідні адаптація та оптимальне настроювання параметрів комп'ютеризованої обробки у відповідності з поточними робочими умовами проведення вимірювань. Така процедура найкращим чином може бути здійснена в штучній нейронній мережі за допомогою вбудованих процедур навчання цієї мережі.

В результаті, штучна нейронна мережа забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання ГП в умовах впливу нестаціонарних і несприятливих факторів на вимірювальну систему. За умови використання нейропроцесора в складі цифрової ЕОМ також суттєво підвищується швидкодія вимірювальної системи.

Таким чином, розроблено нові принципи побудови та структурну схему вимірювальної системи для вимірювання ГП об'єктів. Вимірювальна система використовує формування та комп'ютеризовану обробку відеозображень ОВ. Вимірювальна система може забезпечити суттєве підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей процесів вимірювання

ГП. Комп'ютеризована обробка відеозображень у вимірювальній системі включає методи на основі теорії штучних нейронних мереж.

3.3. Нейропроцесор як засіб обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону

Нейропроцесор представляє собою спеціалізований обчислювальний технічний засіб, що введено в склад цифрової ЕОМ для збільшення її обчислювальної потужності [125 – 129]. Він дозволяє значно підвищити швидкодію вимірювальної системи на базі такої ЕОМ за рахунок ефективної реалізації операцій по обробці вимірювальної відеоінформації на базі штучних нейронних мереж.

Основними принципами побудови нейропроцесора є наступні [127, 128, 130]:

- нейропроцесор повинен бути приладом, що програмується та має у своєму складі операційні вузли, спеціально розроблені для ефективної підтримки нейророзрахунків;
- нейропроцесор повинен забезпечувати розрахунок значень виходів штучних нейронів створеної штучної нейромережі;
- нейропроцесор повинен проводити операції над даними з розрядністю від 1 до 64 біт та фіксованою комою;
- нейропроцесор повинен мати у своєму складі засоби комплексування для створення розподілених паралельних обчислювальних систем, що складаються з будь-якої кількості процесорних вузлів;
- нейропроцесор повинен мати власну систему команд, яка підтримує операції, що найбільш часто використовуються для обробки даних (в тому числі матриць та цифрових відеозображень) за допомогою штучних нейронних мереж.

Нейропроцесор призначений для реалізації нейромережі, яка має наступні параметри:

1. Кожен базовий елемент нейромережі (рис. 3.3) реалізує функцію:

$$Z_i = \varphi(Y_i) = \varphi\left(U_i + \sum_{j=1}^N X_j W_{ij}\right), \quad i = 1 \dots M; j = 1 \dots N,$$

де: Z_i – вихідний сигнал i -го нейрона ШНМ;

X_j – j -й вхідний сигнал ШНМ;

U_i – початкові умови (зсув) для i -го нейрона;

W_{ij} – ваговий коефіцієнт j -го входу i -го нейрона;

Y_i – сума нормованих входів i -го нейрона,

φ – функція активації,

N – кількість входів мережі, що дорівнює кількості геометричних параметрів;

M – кількість нейронів в мережі, що дорівнює кількості видів фітопланктону при ідентифікації і розрахунку його маси.

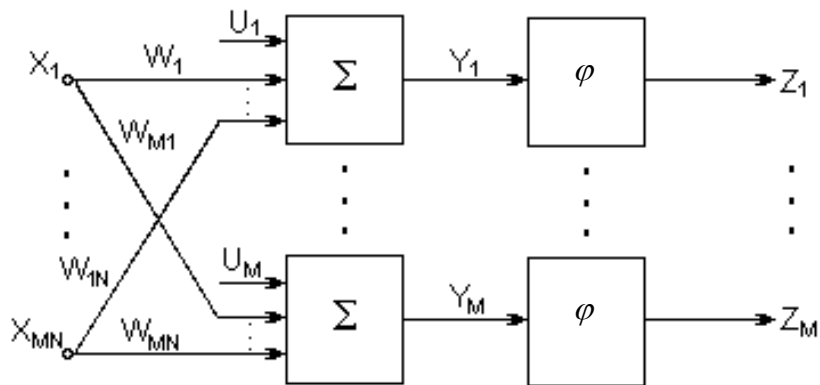


Рис. 3.3. Базовий елемент ПНМ, що використовується в нейропроцесорі для обробки виміральної відеоінформації

2. Операнди Z_i , X_j , U_i і W_{ij} представляються в цифровому коді з фіксованою комою і можуть мати змінну розрядність.

3. Кількість шарів нейронів у нейромережі, а також кількість нейронів і сигналів у кожному шарі можуть бути змінними.

4. Між входами і виходами окремих шарів нейромережі допускаються будь-які з'єднання. Тобто вихідний сигнал k -го шару може надходити на будь-який з входів i -го шару.

Загальна структура нейропроцесора NeuroMatrix NM6403 приведена на рис. 3.4. До його складу входять [130]:

- векторний процесор (Vector processor), який дозволяє реалізовувати базові операції в нейромережах над масивами даних, що представлені у вигляді векторів з елементами, які можуть мати змінну розрядність; головним елементом векторного процесора є операційний вузол, який описано вище;
- скалярний процесор (Scalar processor), призначений для обчислення адрес команд, керування їх вибіркою, обчислень адрес операндів і вагових коефіцієнтів при роботі з пам'яттю, а також для підтримки скалярних операцій над даними;
- два ідентичних інтерфейси з локальною і глобальною шинами (MUX), що можуть працювати з двома зовнішніми пристроями пам'яті по 64-розрядним шинам даних;
- два комунікаційних порти з співпроцесорами прямого доступу до пам'яті, що призначені для підтримки обміну даними по двонаправленим шинам (Link0 і Link1) через порти (Port0 і Port1);
- пристрій управління (Control unit), що виконує функції загального управління, здійснює контроль за використанням зовнішньої пам'яті, а також підтримує 8 типів переривань.

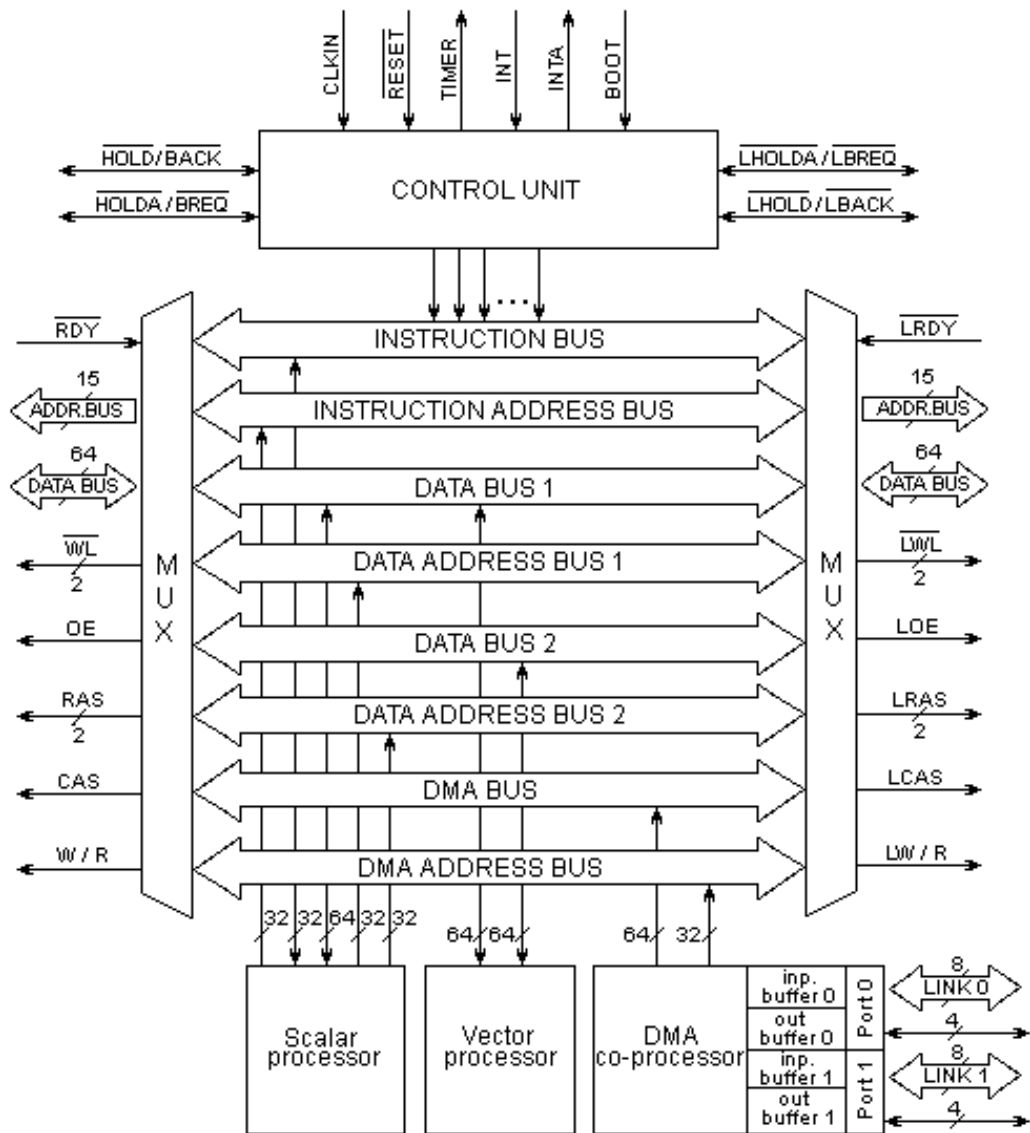


Рис.3.4. Загальна структура нейропроцесора NeuroMatrix NM6403

Плата нейропроцесора [63, 129, 130] (рис. 3.5), що встановлюється в цифрову ЕОМ, містить два процесора NeuroMatrix NM6403, чотири блоки пам'яті об'ємом по 2 Мбайт та контролер переривань. Програмне забезпечення нейропроцесорної плати виконує операції керування обчислювальним процесом та обробки відеозображень з ГПФ. Базовим програмне забезпечення (транслятор, компілятор, компоновщик) керує обчислювальним процесом та дозволяє створювати програми користувачам для вирішення їх конкретних задач. За допомогою бібліотек типових функцій обробки відеозображень реалізовано вимірювання ГПФ.

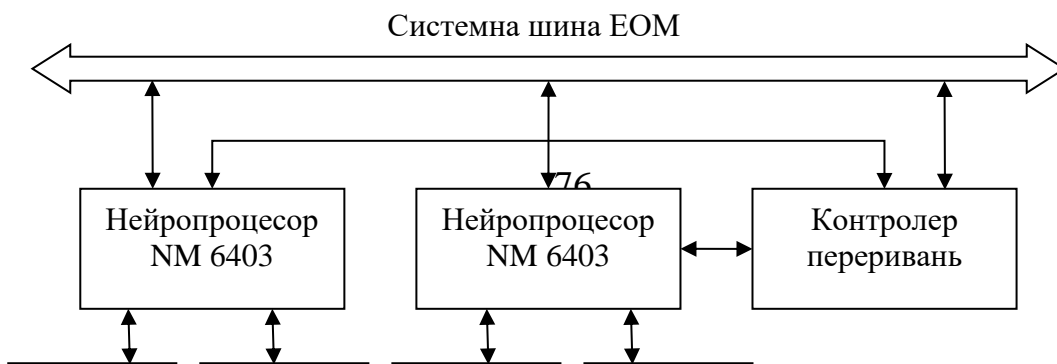


Рис. 3.5. Плата нейропроцесора NeuroMatrix NM6403

В основу архітектури нейропроцесора NeuroMatrix NM6403 фірми НТЦ "Модуль" [63, 130], що використовується у вимірювальній системі, покладено метод виконання його базових операцій за допомогою операційного вузла, який являє собою однорідне обчислювальне середовище та дозволяє проводити операції над синапсами і вагами штучних нейронів з розрядністю від 1 до 64 біт. Вказаний нейропроцесор має значно вищу продуктивність у порівнянні з іншими відомими нейропроцесорами, наприклад L-neuro 1.0 фірми Philips. В L-neuro 1.0 використовується передача даних в послідовному коді, що значно знижує продуктивність, а розрядність даних, які обробляються, може вибиратися тільки з фіксованого набору значень 1, 2, 4, 8, 16. Продуктивність в процесі обчислень L-neuro 1.0 складає 100 мільйонів операцій за секунду для 1 бітних даних і 26 мільйонів операцій за секунду для 8 бітних даних.

Множення сигналів ШНМ на вагові коефіцієнти і додавання цих сигналів є найбільш складною і ресурсомісткою обчислювальною операцією. Тому дана операція являється основною операцією, яку виконує операційний вузол процесора NeuroMatrix NM6403. Його структурна організація дозволяє виконувати ряд таких операцій паралельно. Тому за один такт виконується обчислення сигналів одночасно для декількох нейронів. Тобто за один такт нейропроцесор реалізує функції фрагменту нейромережі, що містить у собі декілька синапсів і нейронів.

У випадку роботи нейропроцесора NeuroMatrix NM6403 з розрядністю даних 8 біт за один процесорний такт виконується 24 операції добутку з накопиченням, що при частоті тактових імпульсів 30 МГц забезпечує продуктивність 720 мільйонів операцій за секунду. В табл. 3.3 і 3.4 для даного нейропроцесора наведено час виконання ряду типових операцій цифрової обробки відеозображень [130], що використовуються при вимірюванні ГПФ та його маси.

Таблиця 3.3

Продуктивність обчислень для масок-згорток, що використовуються при фільтрації та сегментації відеозображень ГПФ

Розмір маски-згортки, дискретних точок	Продуктивність, тактів процесора на 1 дискретну точку відеозображення	
	Нейропроцесор NeuroMatrix NM6403	Звичайний процесор цифрової обробки сигналів TMS 320C80
3x3	1,8	2,1
5x5	2,6	7,3
7x7	4,3	не підтримується
9x9	5,4	не підтримується

Таблиця 3.4

Швидкодія нейропроцесора NeuroMatrix NM6403 при виконанні типових операцій обробки відеозображень ГПФ

Операція	Розмір вхідного вектора або матриці, що обробляються, дискретних точок	Розряд- ність вхідних даних, біт	Розряд- ність вихідних даних, біт	Час виконання операції, мкс
Медіанний фільтр (розмір вікна – 3 дискретні точки)	1024	16	16	185
Медіанний фільтр (розмір вікна – 5 дискретних точок)	1024	16	16	320
Медіанний фільтр (розмір вікна – 100 дискретних точок)	1024	16	16	2144
Медіанний фільтр (розмір вікна – 3x3 дискретні точки)	640x480	8	8	83750
Обчислення лінійних розмі- рів (відстані) двох векторів з координатами точок	1024	8	8	134
Згортка (фільтрація) з маскою 3x3 дискретні точки	640x480	8	8	4759
Фільтр Собела	640x480	8	8	2760

Розглянемо фільтрацію відеозображень в нейропроцесорі. В цьому випадку задача фільтрації зводиться до розрахунку згортки [68]:

$$y[m, n] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} W[k, l] \cdot x[m - k, n - l],$$

де $x[m, n]$ – вхідне відеозображення (вхід фільтра);

$W[m, n]$ – імпульсна характеристика фільтра;

$y[m, n]$ – вихідне відеозображення (вихід фільтра).

Рішення на практиці завдання фільтрації зводиться до знаходження $W[m, n]$. Однак важливим питанням залишається практична реалізація згортки.

Якщо $W[m, n]$ відрізняється від нуля в невеликій області $-r \leq m \leq r, -r \leq n \leq r$ (частіше всього беруться області 3×3 або 5×5 дискретних точок), то виконується локальна фільтрація, при цьому згортка обчислюється безпосередньо за формулою:

$$y[m, n] = \sum_{l=-r}^r \sum_{k=-r}^r W[k, l] \cdot x[m-k, n-l],$$

Приклади матриць $W[m, n]$ для різних типів фільтрів відомі з [68, 72].

Для розрахунку згортки може бути використовується швидке перетворення Фур'є, але обчислювальні затрати при цьому значно більші, ніж в першому варіанті.

Таким чином, згортка – це основа фільтрації і відновлення відеозображень, а нейропроцесор ефективно реалізує операцію згортки. Згортка представляє собою добуток зображення на маску фільтра, що переміщується. Алгоритм згортки лежить в основі величезної кількості різноманітних фільтрів, таких як, наприклад, визначення границь об'єктів, перепадів яскравості, низькочастотне згладжування відеозображення тощо. В результаті застосування фільтра-згортки при підібраних відповідним чином коефіцієнтах зростає контрастність зображення. Застосувавши до обробленого зображення порогову функцію, можна виділити контури об'єктів вимірювань, що вкрай важливо для задачі вимірювання ГПФ.

Для операцій фільтрації та сегментації відеозображень ГПФ прискорення алгоритмічної обробки складає до 10 разів у порівнянні з варіантом цифрової ЕОМ без нейропроцесора. Загалом нейропроцесор забезпечує прискорення обробки вимірювальної інформації про ГПФ у 4...6 разів.

Можливість роботи з цифровими даними змінної розрядності у нейропроцесорі забезпечує збільшення швидкодії та продуктивності зі зменшенням розрядності даних, що дозволяє знаходити необхідне співвідношення точності вимірювань та швидкодії автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси.

Час вимірювань однієї проби води складає 5 сек. на відміну від відомих засобів вимірювань, що потребують на цю операцію 30 хвилин. Максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктонних водоростей дорівнює ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою CAM-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань лінійних розмірів фітопланктонних водоростей $\pm 1,0$ мкм на відміну від відомих засобів вимірювань, у яких точність дорівнює 20 мкм в залежності від величини збільшення мікроскопу.

Таким чином, використання нейпроцесора NeuroMatrix NM6403 в складі автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси дозволяє забезпечити потрібні точнісні характеристики вимірювань та швидкодію, вищу за відомі засоби вимірювань.

3.4. Розробка методики формування та обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону

3.4.1. Вибір проб води для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Проби води з фітопланктоном для вимірювань його геометричних параметрів і маси відбиралися з водойм господарсько-побутового призначення. Для врахування змін ГПФ в залежності від глибини водойми і для мінімізації впливу його міграції в товщі води, проби були відібрані через кожен метр водної товщі, починаючи з поверхневого горизонту. Проби зливались в один посуд (поліетиленове відро об'ємом 10,0...12,0 дм³), з якого потім відбиралися інтегровані проби об'ємом 0,5...1,0 дм³. Об'єм інтегрованої проби (0,5 чи 1,0 дм³) визначався попередньою візуальною оцінкою розвитку фітопланктону: при інтенсивному розвитку фітопланктону достатньо проби в об'ємі 0,5 дм³; при незначній вегетації фітопланктону, особливо в зимовий чи ранньовесняний-пізньоосінній періоди, відбирали пробу об'ємом 1,0 дм³.

Проби фітопланктону відбирали і зберігали в скляних пляшках чи поліетиленових флягах, відповідно відкаліброваних на 0,5 і 1,0 дм³, щільно закритих кришками.

3.4.2. Послідовність перетворення та обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону

На сьогоднішній день відомо багато варіантів досліджень, оцінки та вимірювань процесів розвитку фітопланктону, а також розроблено багато відповідних методик та засобів контролю за цими процесами. Існуючі методики включають в себе: використання звичайного мікроскопа; підрахунок кількості екземплярів фітопланктону у пробі води шляхом візуального спостереження цієї проби людиною; ручне визначення ГПФ за допомогою окуляра мікроскопа з вбудованою лінійкою; подальший розрахунок потрібних показників, в тому числі – маси фітопланктону. Ці методики мають обмежені функціональні можливості, недостатню точність і швидкодію вимірювань, особливо при дослідженнях динаміки змін ГПФ у часі. Дані методики також потребують виконання великого об'єму ручної праці в процесі вимірювань. Тому виникла необхідність створити нову методику вимірювань, що використовує сучасні інформаційно-комп'ютерні технології для збору та обробки вимірювальної інформації і в якій відсутні вказані недоліки існуючих методик.

Розроблена методика включає:

- відбір з водойм проб води, що містять фітопланктон;

- підготовку препарату з кожної проби води на предметному склі та розміщення його під окуляром мікроскопа;
- формування відеозображення препарату з кожної проби води за допомогою відеокамери, приєднаної до оптичної системи мікроскопа та введення цього відеозображення в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ;
- виявлення кожного екземпляра фітопланктону у препаратах з кожної проби води шляхом цифрової обробки відеозображень цих препаратів (попередня обробка відеозображень);
- підрахунок для кожного екземпляра фітопланктону геометричних ознак форми, інваріантних до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення;
- виконання ідентифікації кожного екземпляру фітопланктону за його належністю до одного з видів фітопланктону;
- визначення загальної кількості та маси фітопланктону кожного виду у кожному препараті з урахуванням результатів ідентифікації;
- розрахунок кількісних показників, що характеризують розвиток фітопланктону в цілому та його окремих видів у водоймі та загальний стан цієї водойми (частота зустрічі конкретних видів фітопланктону, його інформаційне різноманіття тощо).

Послідовність перетворення та обробки вимірювальної інформації наведена на рис. 3.6.

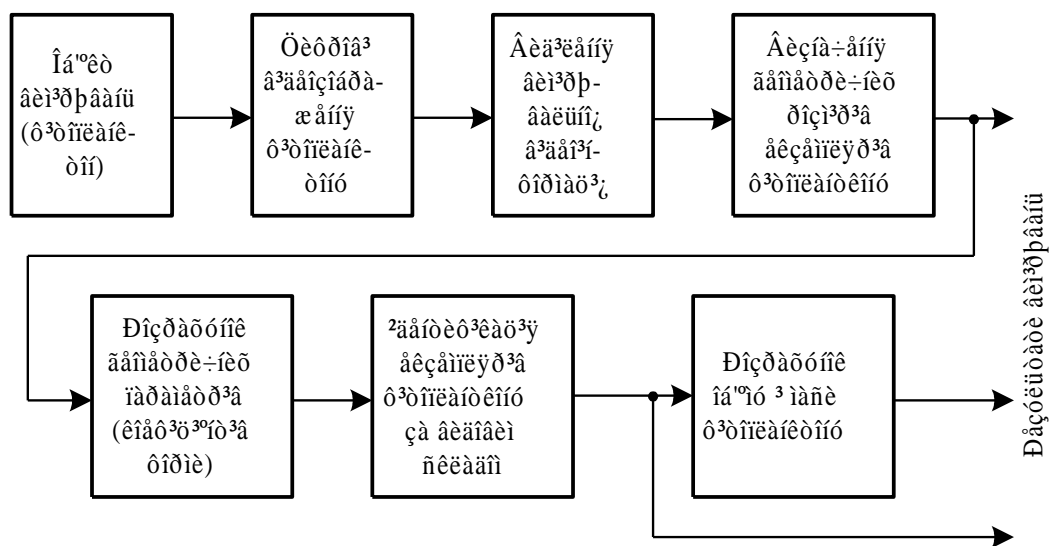


Рис. 3.6. Послідовність перетворення та обробки вимірювальної інформації про ГПФ у вимірювальному каналі автоматизованої системи

При цьому забезпечуються такі переваги:

1. Розширюються функціональні можливості засобів вимірювань ГПФ при обробці вимірювальної інформації, зберіганні та відображенні результатів вимірювань. Це відбувається за рахунок використання цифрової ЕОМ та

інтелектуальних методів обробки вимірювальної інформації на основі ШНМ на відміну від відомих засобів вимірювань, які побудовано на основі використання ручної праці.

2. Підвищується швидкодія засобів вимірювань за рахунок автоматизації обробки вимірювальної інформації, використання нейропроцесора та формування стиснутих відеозображень у відеокамері для передачі в ЕОМ. Час вимірювань однієї проби води складає до 5 сек. на відміну від відомих засобів вимірювань, що потребують на цю операцію близько 30 хвилин.

На рис. 3.7 зображено приклад відеозображень деяких видів фітопланктону.

Далі вводять це відеозображення в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ. При настроюванні оптичної системи мікроскопа та цифрової відеокамери на фіксований коефіцієнт збільшення отримуємо фіксований масштабний коефіцієнт, що використовується для розрахунку геометричних розмірів, об'єму і маси фітопланктону. Маса фітопланктону визначається розрахунково-об'ємним методом [4, 44]. Для цього визначають чисельність різних видів фітопланктону у пробах та лінійні розміри його клітин.

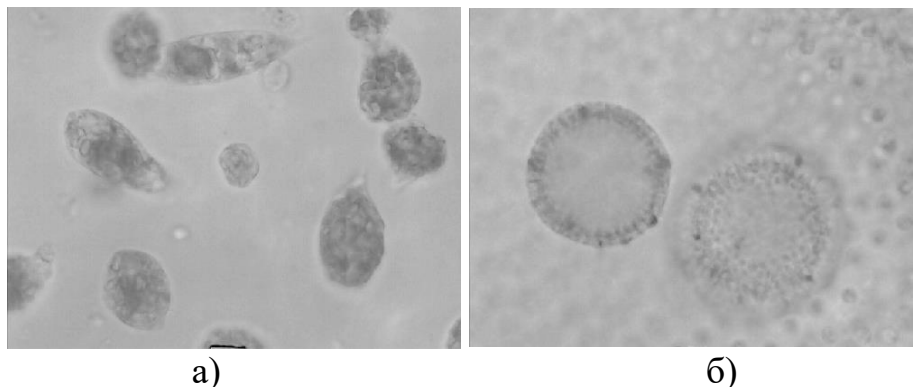


Рис. 3.7. Відеозображення водоростей *Euglena proxima* (а) та *Volvox globator* (б) (збільшення 400^x)

Для вимірювань розмірів екземплярів фітопланктону, їх порівнюють до певних, найбільш подібних до даної морфологічної форми фітопланктону, геометричних тіл: кулі, паралелепіпеду, циліндру, конусу тощо. Далі проводять вимірювання необхідних геометричних параметрів фітопланктону. Визначення об'єму клітин фітопланктону проводять по відомих геометричним формулам на основі отриманих лінійних розмірів конкретного екземпляра фітопланктону [2, 4, 44]. Відносну густину екземплярів прісноводних фітопланктонних водоростей (відносно води) приймають рівною 1,00-1,05. Вирахувану масу кожного виду множать на його чисельність і результат приводять у мг/дм³ або у г/м³. На основі результатів вимірювань визначаються інтегральні показники стану і розвитку фітопланктону як складової частини водойм. Найбільш інформативними і поширеними

структурно-функціональними показниками стану фітопланктону є видове, таксономічне, екологічне, інформаційне та кількісне різноманіття, ГПФ та його маса [50, 131].

3.4.3. Попередня обробка відеозображень фітопланктону, що містять вимірювальну інформацію

Процедура цифрової обробки відеозображень проб води для визначення геометричних розмірів фітопланктону включає такі операції, як перетворення кольорової схеми відеозображення, його сегментацію, видалення шумів та інших завад.

На відеозображенні фітопланктону наявні шуми, які суттєво ускладнюють пошук екземплярів фітопланктону і виділення їх контурів. Тому необхідно передбачити заходи по видаленню шумів.

Основою більшості методів видалення шумів є згладжування [68, 72]. Поняття згладжування зображень має двояке значення. При корекції спотворень сигналу, внесених системою, що зображує, згладжування – це видалення перешкод, пов'язаних із недосконалістю системи, що зображує: адитивних, флуктуаційних, імпульсних та інших; але це також і усунення дрібних деталей, що заважають сприйняттю потрібних об'єктів на зображеннях (так звана генералізація зображення).

При корекції спотворень, викликаних системою, що зображує, згладжуванню піддається зображення на виході цієї системи. Під поняттям згладжування завжди мається на увазі деяке уявлення про "ідеально гладкий" сигнал, тому такий сигнал є ціллію згладжування.

Поняття згладжування містить також уявлення про те, яка частина цифрових даних на відеозображенні повинна бути видалена при згладжуванні. Перш за все це будь-який шум, що міститься у зображенні.

Фільтр, що згладжує – це фільтр нижніх частот, який видаляє в зображенні високі частоти. Послаблюючи шум, він також видаляє деякі дрібні деталі об'єктів на відеозображенні.

Згладжування шуму забезпечується низькочастотною фільтрацією, і, так як в даному випадку амплітуда шуму має нормальний розподіл, а спектр частот шуму рівномірний ("білий" шум із нормальним законом розподілу амплітуди), то можна використовувати такі фільтри низьких частот, як усереднюючий фільтр чи фільтр Гауса. Однак використання усереднюючого фільтра для зменшення впливу шуму на відеозображення фітопланктонних водоростей призводить до розмиття зображення та погіршення його чіткості, а це погано впливає на точність вимірювань. Тому використовувався фільтр Гауса, який, у порівнянні з усереднюючим, значно менше "розмиває" зображення фітопланктону.

Найбільш поширений метод сегментації цифрових відеозображень – це сегментація на основі порогу яскравості. Для кольорових відеозображень сегментація виконується шляхом перетворення кольорового відеозображення

у напівтонове або шляхом визначення відстані між значеннями кольору дискретних точок в кольоровому просторі.

Сегментація кольорового відеозображення виконувалась на основі аналізу деякого набору ознак точок відеозображення з метою пошуку та виділення на цьому відеозображенні фітопланктону. В даному випадку цими ознаками є колір дискретних точок цифрового кольорового відеозображення. Для знаходження фітопланктону на відеозображенні визначали кількісні значення кольору для водоростей і фону.

Так як яскравість об'єкта та фону приблизно однакові (зображення отримано за допомогою світла, що проходить крізь предметне скло мікроскопа), то сегментація по яскравості неефективна, і тому було використано сегментацію по кольору.

3.5. Обробка вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону на основі штучних нейронних мереж

3.5.1. Відновлення відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри фітопланктону

Відеозображення, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ, формуються оптичною системою цифрової відеокамери та потім проходять через електронні схеми вимірювального каналу. Оптична система має обмежену розподільчу здатність та вносить ряд викривлень у відеозображення. Електронні схеми також додають до початкового відеозображення шуми та інші викривлення. Таким чином, відеозображення, що пройшло вимірювальний канал автоматизованої системи, містить ряд викривлень вимірювальної інформації, які негативно впливають на точність вимірювань ГПФ.

Основним методом боротьби з вказаними викривленнями є відновлення відеозображень за допомогою фільтрації цих викривлень. Відповідно до матеріалів, викладених в підрозділі 3.3, така фільтрація може бути реалізована на основі ШНМ [132] та, відповідно, нейропроцесора. В автоматизованій системі для вимірювань ГПФ та його маси на основі ШНМ було реалізовано відновлюючий фільтр (рис. 3.8).

3.5.2. Сегментація кольорових відеозображень фітопланктону

Цифрові кольорові відеозображення містять вимірювальну інформацію про ГПФ та його масу. Для отримання цієї інформації необхідно сформулювати відеозображення фітопланктону за допомогою цифрової відеокамери, ввести ці відеозображення в ЕОМ та виконати їх алгоритмічну обробку [64, 68].

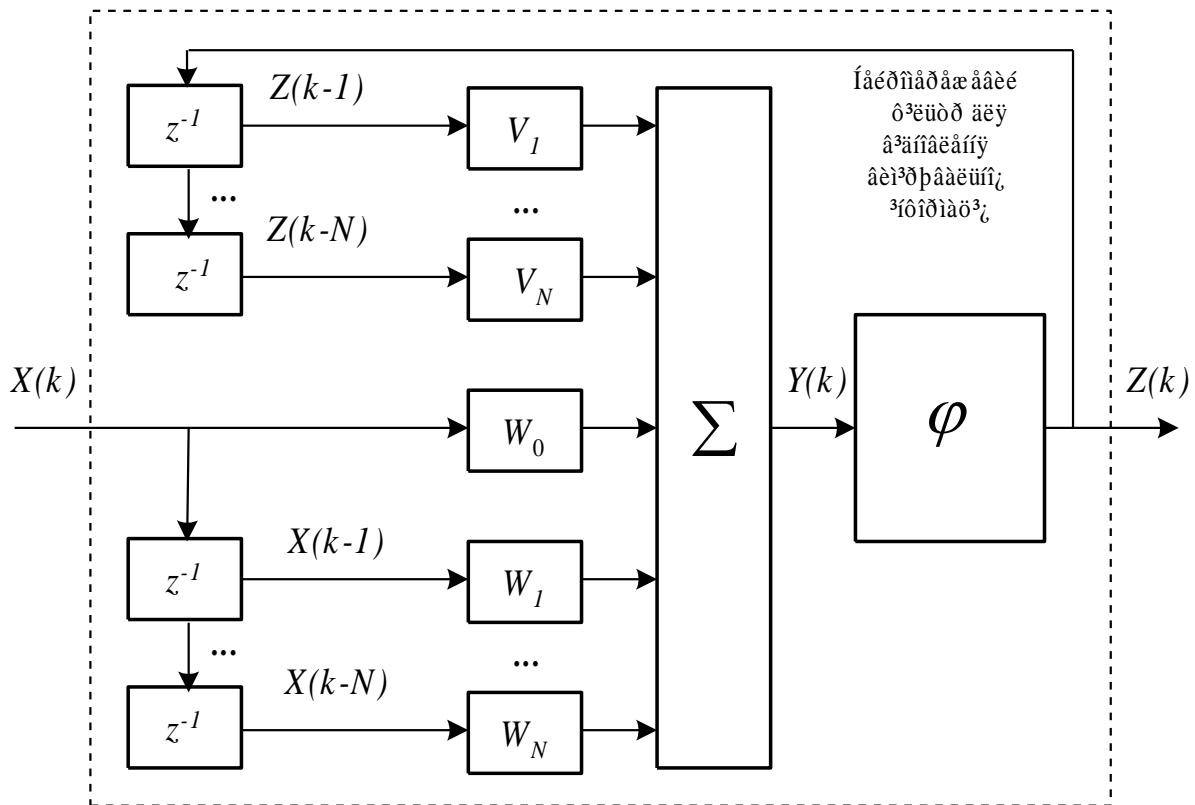


Рис. 3.8. Відновлючий фільтр відеозображень ГПФ на основі ШНМ: z^{-1} – елемент затримки на часовий інтервал між надходженням двох дискретних відліків відеосигналу; V і W – вагові коефіцієнти фільтра; φ – функція активації ШНМ, в даному випадку $\varphi(Y(k))=Y(k)$

Складовою частиною алгоритмічної обробки цифрових кольорових відеозображень є їх сегментація, тобто операція розподілу цих відеозображень на області, кожна з яких характеризується певною особливою властивістю [62, 72]. Об'єкти вимірювань (фітопланктон) на цифровому кольоровому відеозображенні відрізняються один від одного та від фону цього відеозображення перш за все кольором. Тому ознакою, що використовується для сегментації, є колір дискретних точок цифрових кольорових відеозображень. В результаті сегментації на цифровому кольоровому відеозображенні виділяються області, що належать об'єктам вимірювань, причому ці об'єкти можуть бути розподілені на декілька класів. В результаті подальшої обробки визначаються геометричні параметри цих об'єктів вимірювань.

Існують методи сегментації цифрових кольорових відеозображень на основі кластер-аналізу [62, 72], що включають перетворення цифрового кольорового відеозображення в простір ознак з розподілом на кластери, кожен з яких відповідає одному з класів об'єктів вимірювань на цифровому кольоровому відеозображенні, та подальше визначення належності кожної дискретної точки цифрового кольорового відеозображення одному з кластерів.

Так як яскравість фітопланктону та фону приблизно однакові (зображення отримано за допомогою світла, що проходить крізь предметне скло мікроскопа), то вказані методи сегментації недостатньо ефективні, і тому було використано сегментацію на основі ШНМ.

Розподіл простору ознак на кластери та визначення центрів кластерів виконували за допомогою ШНМ Кохонена. Така нейронна мережа в режимі навчання забезпечує виявлення кластерів та визначення їх центрів в просторі ознак. В даному випадку в якості ознак використовується інформація про колір дискретних точок цифрового кольорового відеозображення. В робочому режимі штучна нейронна мережа Кохонена виконує сегментацію цифрового кольорового відеозображення на об'єкти вимірювань (фітопланктон) та фон.

Відомо, що використання штучних нейронних мереж при вирішенні задач класифікації та кластер-аналізу дає більш точні і достовірні результати у порівнянні з іншими методами для обмеженого набору початкових даних, що містять викривлення і завади [89, 93]. В даному випадку цифрові кольорові відеозображення містять завади, що обумовлені об'єктивними умовами отримання цих відеозображень та перешкоджають отриманню вимірювальної інформації про об'єкти, що наявні на цих відеозображеннях. Тому маємо підвищення точності виділення об'єктів на цифрових кольорових відеозображеннях за рахунок використання штучної нейронної мережі Кохонена для розподілу простору ознак на кластери та визначення центрів кластерів.

Окрім того, в процесі сегментації виконується розподіл інформації про яскравість і колір дискретних точок цифрового кольорового відеозображення по різних каналах цього відеозображення, причому в якості ознак використовують інформацію про колір. Це дозволяє виключити вплив нерівномірності освітлення в межах одного цифрового кольорового відеозображення або послідовності таких відеозображень на результати сегментації.

Сегментацію відеозображень ГПФ виконують в такій послідовності:

1. Попередньо визначають кількість видів фітопланктону на цифровому кольоровому відеозображенні, для яких потрібно визначити геометричні параметри та масу.

2. Виконують перетворення цифрового кольорового відеозображення в простір ознак шляхом розподілу інформації про яскравість і колір по різних каналах відеозображення, наприклад, шляхом перетворення відеозображення з кольорової системи *RGB* в кольорову систему *HSV* або *Lab* [72].

3. Виконують розподіл простору ознак на кластери та визначення центрів кластерів за допомогою штучної нейронної мережі Кохонена, причому кількість входів цієї мережі дорівнює кількості каналів цифрового кольорового відеозображення, що містять інформацію про колір, а кількість *N* нейронів у прошарку нейронів Кохонена для цієї мережі дорівнює кількості видів фітопланктону та фону.

4. Визначають належність кожної дискретної точки цифрового кольорового відеозображення одному з кластерів, що і є результатом сегментації цифрового кольорового відеозображення.

Приклад простору ознак для сегментації відеозображень ГПФ на основі ШНМ приведено на рис. 3.9 (один кластер відповідає фону, три інші – трьом видам фітопланктону).

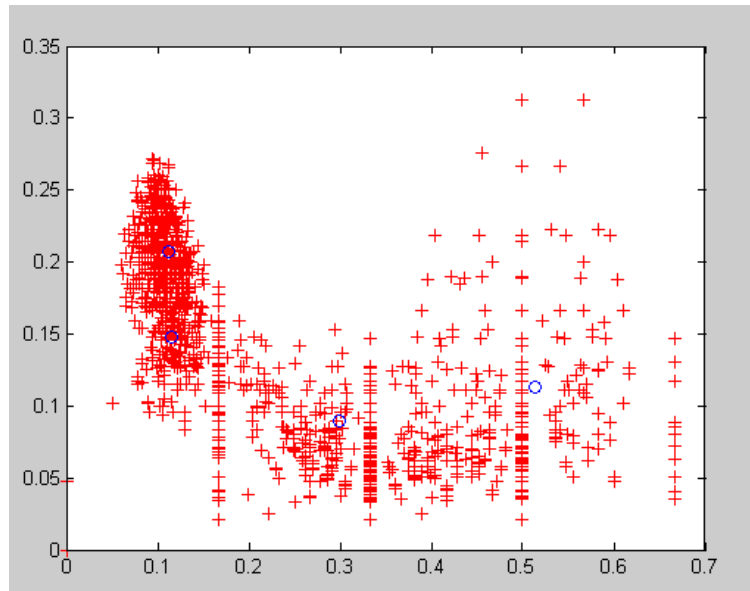


Рис. 3.9. Простір ознак для сегментації відеозображень ГПФ на основі ШНМ: по горизонталі – амплітуда відеосигналу в каналі H (кольоровий тон); по вертикалі – амплітуда відеосигналу в каналі S (насиченість кольору); + – значення кольору дискретних точок відеозображення, представленого у кольоровій схемі HSV ; о – центри кластерів, виявлених ШНМ

3.5.3. Ідентифікація та розрахунок маси фітопланктону

Задача ідентифікації фітопланктону полягає в розподілі множини об'єктів (екземплярів фітопланктону) на класи (види фітопланктону). Основою для цього служить вектор параметрів об'єктів (геометричні параметри кожного з екземплярів фітопланктону). Об'єкти в межах одного класу вважаються еквівалентними з погляду критерію розбивки на класи. Самі класи часто бувають невідомі заздалегідь, а формуються динамічно (як, наприклад, в шарах Кохонена відповідної штучної нейронної мережі). Класи залежать від досліджуваних об'єктів, і тому додавання нового об'єкта вимагає коректування системи класів.

Будемо характеризувати об'єкти, що підлягають ідентифікації, вектором параметрів $x^p \in X$, що мають N компонент, компоненти позначаємо нижнім індексом: $x^p = (x_1^p, \dots, x_n^p)$. Вектор параметрів – єдина ознака об'єктів при їх ідентифікації.

Введемо множину класів $C^1, \dots, C^M = \{C^m\}$ в просторі класів C :

$$(C^1 \cup C^2 \dots \cup C^M) \subset C.$$

Простір класів може не збігатися з простором об'єктів X і мати іншу розмірність. В найпростішому випадку, коли простір класів і об'єктів збігаються, $X = C$, класи являють собою області простору X , і об'єкт x^p буде віднесений до одного з класів m_0 , якщо $x^p \in C^{m_0}$. У загальному випадку X і C різні. Визначимо ядра класів $\{c^m\} = c^1, \dots, c^m$ в просторі класів C , як об'єкти, типові для свого класу.

Очевидно, що близькість об'єкта до ядра необхідно оцінювати чисельно. Введемо міру близькості $d(x^p, c^m)$ – скалярну функцію від об'єкта і ядра класу, що тим менше, чим більше об'єкт схожий на ядро класу. Можуть знадобитися допоміжні міри близькості, визначені для двох об'єктів, $d(x^{p1}, x^{p2})$, і для двох ядер класів, $d(c^{m1}, c^{m2})$.

Найчастіше застосовується евклідова міра:

$$d(x, y) = \sum_i (x_i - y_i)^2$$

або евклідова відстань:

$$d(x, y) = \sum_i |x_i - y_i|$$

Задавшись числом класів M , можна поставити задачу ідентифікації: знайти M ядер класів $\{c^m\}$ і розбити об'єкти $\{x^p\}$ на класи $\{C^m\}$, тобто побудувати функцію $m(p)$ таким чином, щоб мінімізувати суму мір близькості:

$$\min \left\{ D = \sum_p d(x^p, c^{m(p)}) \right\}$$

Функція $m(p)$, що визначає номер класу по індексу p множини об'єктів $\{x^p\}$, задає розбивку на класи і є рішенням задачі ідентифікації.

У найпростішому випадку $X = C$, простір об'єктів X розбивається на області $\{C^m\}$, і якщо $x^{p_0} \in C^{m_0}$, то $m(p_0) = m_0$, і об'єкт відносять до класу m_0 .

Кількість класів M може динамічно мінятися. При цьому часто виникають ситуації, коли об'єкти розподілені по класах нерівномірно. Необхідно контролювати рівномірність щільності ядер c^m у просторі C і частку об'єктів, що відносяться до кожного класу m_0 . Конкретні вимоги повинні вибиратися в залежності від задачі. При необхідності можна коректувати щільність злиттям і поділом ядер. Критерії для цього можуть використовуватися різні, і, в основному, емпіричні. Наприклад, два класи можуть зливатися в один, якщо міра близькості їхніх ядер менше, ніж середня міра близькості ядер і всіх об'єктів у цих двох класах. Застосовуючи аналогічні правила, треба пам'ятати про "побічні ефекти". Приведений критерій злиття може працювати некоректно [91, 93].

Міра близькості ядер у цьому випадку багато менше, ніж середня міра близькості між об'єктами і ядрами. Відповідно до правила, класи будуть

об'єднані, хоча в багатьох задачах таке об'єднання необґрунтовано.

Корисно визначити діаметр класу – максимальне значення міри близькості між об'єктами даного класу.

Якщо для ідентифікації застосовувати нейронні мережі, необхідно формалізувати задачу [39, 85, 91]. Самий очевидний спосіб: виберемо в якості вхідних даних вектор параметрів об'єкта. Результатом роботи мережі буде код класу, до якого належить пред'явлений на вході об'єкт. Тому мережа буде мати M виходів, по числу класів, і чим більше значення приймає вихід номера m_0 , тим більше "упевненість" мережі в тім, що вхідний об'єкт належить до класу m_0 .

Виберемо евклідову міру близькості. У цьому випадку ядро класу, що мінімізує суму мір близькості для об'єктів цього класу, збігається з центром ваги об'єктів:

$$c^{m_0} = \frac{1}{N(m_0)} \sum_{p:p(m)=m_0} x^p$$

де $N(m_0)$ – число об'єктів x^p в класі m_0 .

При розбивці на класи повинна бути мінімізована сумарна міра близькості для всієї безлічі $\{x^p\}$ вхідних об'єктів:

$$\begin{aligned} D &= \sum_p \sum_i (x_i^p - c_i^{m(p)})^2 = \\ &= \sum_p [(x^p, x^p) - 2(x^p, c^{m(p)}) + (c^{m(p)}, c^{m(p)})] \end{aligned}$$

У цій сумі два доданки не залежать від способу розбивки і постійні:

$$\sum_p (c^{m(p)}, c^{m(p)}) = const, \quad \sum_p (x^p, x^p) = const.$$

Тому задача пошуку мінімуму D еквівалентна пошуку максимуму виразу:

$$\min D \rightarrow \max \sum_p \sum_i x_i^p c_i^{m(p)}.$$

Запишемо варіант алгоритму ідентифікації для пошуку максимуму цієї функції:

1. Цикл: для кожного вектора x^p

2. Цикл: для кожного m

3. Розрахувати

$$\sum_i x_i^p c_i^m = D^{m,p}.$$

// кінець циклу по m

4. Знаходимо m_0 , для якого

$$m_0 : \max_m \{D^{m,p}\}.$$

5. Відносимо об'єкт до класу m_0 .

// кінець циклу по x^P .

Такий алгоритм легко реалізується у вигляді нейронної мережі. Для цього потрібно M суматорів, що знаходять всі $D^{m,p}$, і інтерпретатора, що знаходить суматор з максимальним виходом.

Сума $\sum_i x_i^p c_i^m$ дуже нагадує зважену суму $NET_{jl} = \sum_i w_{ijl} x_{ijl}$, що розраховується формальним нейроном. Виберемо x_i^p як вхідні сигнали (що ми, утім, уже зробили) і компоненти ядер c_i^m як вагові коефіцієнти w_{ijl} . Тоді кожен формальний нейрон з числом входів, рівним числу компонентів у вхідному векторі, буде давати на виході одну із сум $D^{m,p}$.

Щоб визначити клас, до якого відноситься об'єкт, потрібно вибрати серед усіх нейронів даного шару один з максимальним виходом – це здійснює інтерпретатор. Інтерпретатор вибирає нейрон з максимальним виходом.

Розглянута мережа нейронів, що використовує евклідову міру близькості для класифікації об'єктів, називається мережею Кохонена, яка зображена в загальному випадку на рис. 3.10.

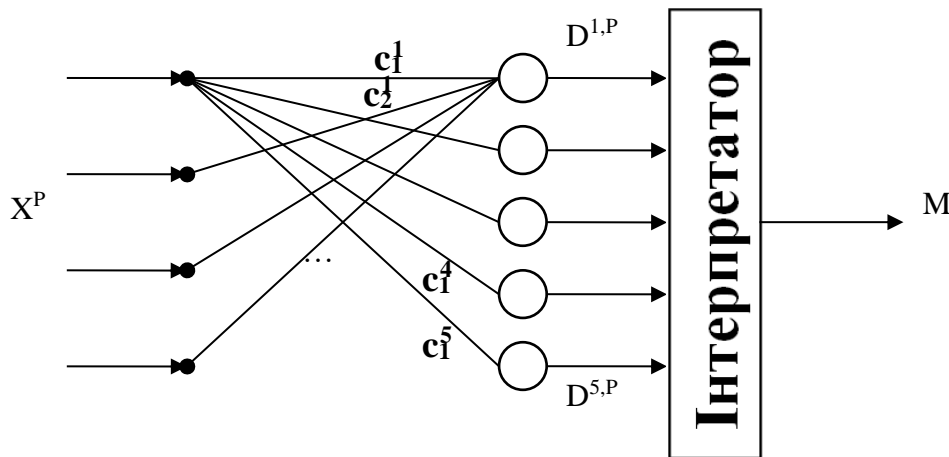


Рис. 3.10. Мережа Кохонена для ідентифікації фітопланктону за його геометричними параметрами: X^P – вектор ГПФ; M – вид фітопланктону; c_i^m – компоненти ядер (вагові коефіцієнти); $D^{m,p}$ – суматор

Нейрони шару Кохонена генерують сигнали $D^{m,p}$. Інтерпретатор вибирає максимальний сигнал шару Кохонена і видає номер класу, що відповідає номеру входу, по якому інтерпретатором отриманий максимальний сигнал. Це відповідає номеру класу об'єкта, що був пред'явлений на вході у виді вектора x^p . Ядра c^m є ваговими коефіцієнтами нейронів. Кожен нейрон Кохонена запам'ятовує одне ядро класу, і відповідає за визначення об'єктів у своєму класі, тобто величина виходу нейрона тим більша, чим ближчий об'єкт до даного ядра класу.

Загальна кількість класів збігається з кількістю нейронів Кохонена. Змінюючи кількість нейронів, можна динамічно змінювати кількість класів.

Нейрони Кохонена мають лінійну функцію активації.

Вхідні вектора мережі найчастіше нормуються:

$$\frac{x^p}{|x^p|} \rightarrow x^p \quad \text{або} \quad \frac{x^p}{\sum_p |x^p|^2} \rightarrow x^p.$$

Для виявлення центрів кластерів на етапі обробки інформації в нейронних мережах використовується шар нейронів Кохонена (мережа Кохонена). Мережа Кохонена виконує пошук центрів кластерів в тестовій навчальній вибірці даних. В тестовій вибірці містяться набори геометричних ознак визначених відділів фітопланктонних водоростей.

Шар Кохонена ідентифікує вхідні вектори в групи схожих. Це досягається за допомогою такого підстроювання ваг шару Кохонена, що близькі вхідні вектори активують той самий нейрон даного шару. Не важливо, який конкретно нейрон буде активований. Необхідно лише гарантувати, щоб в результаті навчання розділялися несхожі вхідні вектори.

Навчання Кохонена є самонавчанням, що протікає без вчителя. Алгоритм Кохонена передбачає самонавчання по правилу «переможець забирає все».

Ваговим коефіцієнтам мережі перед початком навчання варто присвоїти початкові значення. Загально прийнятою практикою при роботі з нейронними мережами є присвоєння вагам невеликих випадкових значень. При навчанні шару Кохонена випадково обрані вагові вектори варто нормалізувати. Остаточні значення вагових векторів після навчання збігаються з нормованими вхідними векторами. Тому нормалізація перед початком навчання наближає вагові вектори до їх остаточних значень, скорочуючи, таким чином, процес навчання.

Якщо ваги ініціалізуються випадковими значеннями з рівномірним розподілом, то виникає проблема. Коли ядра розподіляються рівномірно, то в областях простору X , де мало вхідних векторів, ядра будуть використовуватися рідко, тому що мало буде схожих векторів. В тих областях, де вхідних векторів багато, щільність ядер виявиться недостатньою, і несхожі об'єкти будуть активувати той самий нейрон, тому що більш схожого ядра не знайдеться. Для усунення проблеми можна розподілити щільність ядер класів (векторів ваг) відповідно до щільності вхідних векторів в просторі X . Але розподіл вхідних векторів часто буває задалегідь невідомо. У цьому випадку допомагає метод випуклої комбінації.

1. Присвоюємо всім вагам те саме початкове значення:

$$w_i^m = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad n = \dim X.$$

Вектори ваг одержують довжину, рівну одиниці, як вимагає нормалізація. Всі вектори ваг однакові.

2. Задаємо навчальну множину $\{x^p\}$ і проводимо навчання, але не з векторами x^p , а з векторами $\beta(t)x^p + \frac{1-\beta(t)}{\sqrt{n}}$, де t – час навчання, $\beta(t)$ – монотонно зростаюча функція, що міняється від 0 до 1 в процесі навчання.

На початку навчання $\beta(t) = 0$ і всі навчальні вектори однакові і дорівнюють початковому значенню ваг. В міру навчання $\beta(t)$ росте і навчальні вектори розходяться із точки з координатами і наближаються до своїх кінцевих значень x^p , що досягаються при $\beta(t) = 1$. Кожен вектор ваг "захоплює" групу чи один навчальний вектор і відслідковує його в міру росту β .

Метод випуклої комбінації дає правильний розподіл щільності ядер. При цьому в мережі не залишається "непотрібних" ненавчених нейронів, що бувають при звичайному навчанні. Коли вектор ваг нейрона знаходиться далеко від всіх навчальних векторів, цей нейрон ніколи не буде "вигравати", і його ваги не будуть коректуватися при навчанні. Випукла комбінація не залишає в мережі таких нейронів.

Задача навчання – навчити мережу активувати той самий нейрон для схожих векторів x^p на вході. Якщо число вхідних векторів дорівнює числу ядер (тобто нейронів), то навчання не потрібно. Досить присвоїти ядрам значення вхідних векторів, і кожен вектор буде активувати свій нейрон Кохонена. Але найчастіше кількість класів менша числа вхідних векторів. У цьому випадку ваги мережі налаштовуються ітеративним алгоритмом.

Алгоритм аналогічний вихідному алгоритму ідентифікації, але корекції ваг проводяться після пред'явлення кожного вхідного вектора, а не після пред'явлення усіх, як вимагає вихідний алгоритм. Збіжність при цьому зберігається.

1. Присвоюємо початкові значення ваговим коефіцієнтам.
2. Подаємо на вхід один з векторів x^p .
3. Розраховуємо вихід шару Кохонена $D^{m,p}$, і визначаємо нейрона-переможця m_0 : $\max D^{m,p}$
4. Коректуємо ваги тільки нейрона-переможця. m_0 , його вихід дорівнює одиниці, а інших нейронів – нулю:

$$w_{m_0} := w_{m_0} - \alpha(x^p - w_{m_0})$$

В цій формулі корекція записана у вигляді векторного виразу (вектор ваг w_{m_0} нейрона m_0 має стільки компонент, скільки їх у вхідного вектора x^p). α – швидкість навчання, мала позитивна величина. Часто використовують

розклад з навчанням, коли $\alpha = \alpha(t)$ монотонно убиває. Вимоги до $\alpha(t)$ ті ж, що й у випадку багатосферного перцептрона.

5. Перевірка виконання правила останова (в якості цього правила можна прийняти, наприклад, стабілізацію векторів ваг на яких-небудь значень), якщо воно не виконується – продовження циклу навчання(перехід на крок 2); в протилежному випадку – перехід на крок 6.

6. Завершення процедури навчання.

Алгоритм виконується доти, поки ваги не перестануть мінятися.

Підсумковим результатом подібних корекцій для двовимірного випадку є вектори ваг, що показують на центри кластерів (центри групування) вхідних образів, що відповідають певним видам фітопланктону (рис. 3.11).

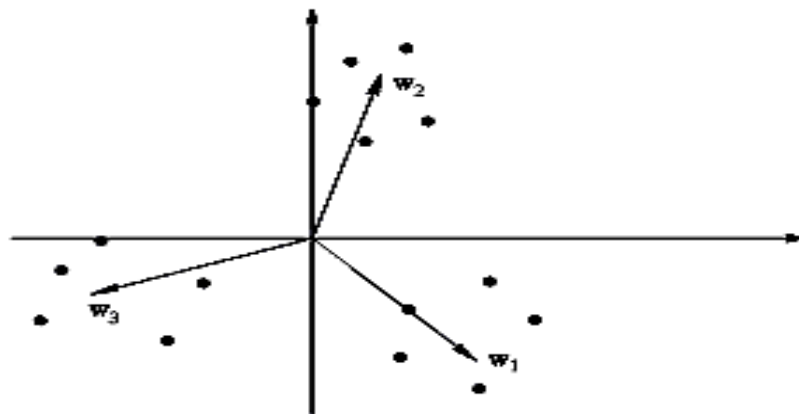


Рис. 3.11. Вектори ваг ШНМ Кохонена після закінчення процесу навчання: w_1 – вид 1 фітопланктону; w_2 - вид 2 фітопланктону; w_3 - вид 3 фітопланктону

Інакше кажучи, алгоритм навчання Кохонена забезпечує рішення задачі автоматичної ідентифікації, тобто віднесення пред'явленого вектора входів до одного з класів (наприклад на рис. 3.11 таких три класи). Правда, така ідентифікація можлива тільки у випадку, коли кластери є лінійно роздільними (гіперплощинами) відносно початку координат у просторі входів

Відзначимо, що число нейронів НМ для успішного рішення зазначеної задачі повинне бути не менше, ніж число кластерів; оскільки точне число кластерів може бути заздалегідь невідомо, кількість нейронів задають з визначеним запасом [91].

В 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 екземпляру фітопланктону до певного класу. Це і є номер виду фітопланктону, що ідентифікувався.

Існуючі методи ідентифікації фітопланктону за його належністю до одного з видів цих водоростей виконується людиною на основі візуального аналізу препарату з проби води, розміщеного в мікроскопі.

При цьому слід враховувати велике різноманіття зовнішнього вигляду фітопланктонних водоростей, довільне розташування екземплярів цих водоростей в полі зору оптичної системи мікроскопа, велику кількість ознак зовнішнього вигляду цих водоростей, що треба аналізувати одночасно. Окрім того, напружена робота та багаторазове повторення однакових дій при опрацюванні великої кількості препаратів з проб води та при наявності великої кількості екземплярів фітопланктонних водоростей в кожному препараті приводить до виникнення суб'єктивних помилок. Всі ці фактори ускладнюють візуальний аналіз екземплярів фітопланктонних водоростей та приводять до низької достовірності та низької продуктивності ідентифікації цих водоростей.

Таким чином, суттєвим недоліком існуючих методів є низька достовірність та низька продуктивність ідентифікації фітопланктону у пробах води з водойм.

Тому було розроблено метод ідентифікації фітопланктону на основі використання цифрових відеозображень проб води та ШНМ. В цьому методі після розміщення в мікроскопі препарату з проби води формують його відеозображення за допомогою відеокамери, приєднаної до оптичної системи мікроскопа. 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. Ідентифікацію фітопланктону виконують за допомогою штучної нейронної мережі, причому кількість входів цієї мережі відповідає кількості ГПФ, що використовують для ідентифікації, а кількість виходів цієї мережі відповідає кількості видів фітопланктону, що обрані для досліджень та можуть існувати в умовах водойм, які досліджують. Для навчання штучної нейронної мережі використовують тестові відеозображення, що містять фітопланктон заздалегідь відомих видів. В якості простора ознак для ідентифікації використовують ГПФ, 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.

Підвищення достовірності ідентифікації фітопланктону забезпечується за рахунок використання штучної нейронної мережі, яка успішно вирішує задачу ідентифікації навіть при наявності великої кількості ознак, що треба аналізувати, при великому різноманітті зовнішнього вигляду фітопланктонних

водоростей та при відсутності абсолютно чітких формальних критеріїв виконання процедури ідентифікації [89, 93].

В автоматизованій системі було використано ШНМ Кохонена, яка здатна в процесі навчання виявляти в даних, що надходять на її вхід, групи подібних даних (кластери) та визначати усереднені значення ознак (центри кластерів), що характеризують ці групи. Для фітопланктону групи даних (кластери) будуть відповідати його видам, відомим з гідробіології. Після навчання ШНМ для кожного вхідного набору даних визначає центр кластеру, найближчий до цього набору в просторі ознак. Так як кожному кластеру простора ознак відповідає певний вид фітопланктону, то результатом всіх цих дій буде ідентифікація кожного екземпляру фітопланктону за його належністю до одного з видів.

Якщо навіть початкові дані спотворені шумами, наявними на відеозображеннях препаратів з проб води, то ШНМ все одно спроможна після навчання виділяти ознаки та іншу інформацію, суттєву для ідентифікації фітопланктону. Це також забезпечує підвищення достовірності ідентифікації фітопланктону.

Іншим фактором підвищення достовірності ідентифікації фітопланктону є використання геометричних ознак форми, інваріантних до масштабування, зсуву та повороту цих водоростей в площині відеозображення. Використання цих ознак усуває можливі причини похибок ідентифікації при довільному розташуванні екземплярів фітопланктону в площині відеозображення, яке має місце для будь-яких препаратів з проб води.

Підвищення продуктивності та швидкодії ідентифікації фітопланктону забезпечується за рахунок виключення ручної праці та використання цифрової ЕОМ для обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про фітопланктонні водорості. Також при цьому підвищується достовірність за рахунок виключення суб'єктивних похибок, можливих у випадку використання ручної праці в процесі ідентифікації фітопланктонних водоростей.

Таким чином, розроблений метод ідентифікації забезпечує підвищення достовірності та підвищення продуктивності ідентифікації фітопланктону у пробах води з водойм.

Метод ідентифікації фітопланктону виконують в такій послідовності:

1. Відбирають з водойм проби води, що містять фітопланктон. 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 [44].

2. Підготовлюють препарат з кожної проби води на предметному склі та розміщують його під окуляром мікроскопа. Для точного дозування препарату при його нанесенні на предметне скло можуть бути використані

спеціальні штемпель-піпетки, розраховані на фіксований об'єм цього препарату [4, 44]. Основними вимогами до мікроскопа є збільшення окуляра не менше, ніж 5^x , об'єктива – не менше, ніж 20^x [44]. Сумарне збільшення мікроскопу повинно бути не менш 100^x , рекомендується 400^x .

3. Формують відеозображення препарату з кожної проби води за допомогою відеокамери, приєднаної до оптичної системи мікроскопа та вводять це відеозображення в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ.

4. Виявляють кожен екземпляр фітопланктону у препаратах з кожної проби води шляхом цифрової обробки відеозображень цих препаратів. Процедура цифрової обробки включає такі операції, як перетворення кольорової схеми відеозображення, видалення шумів, відновлення відеозображення, його сегментацію.

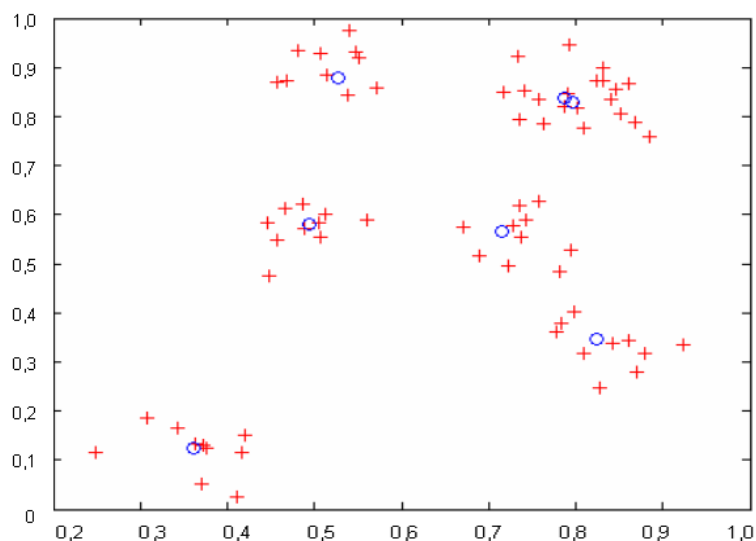
5. Для кожного екземпляра фітопланктонних водоростей розраховують геометричні параметри, інваріантні до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення.

6. Виконують ідентифікацію кожного екземпляру фітопланктону за його належністю до одного з видів. Ідентифікацію фітопланктону виконують за допомогою ШНМ, причому кількість входів цієї мережі відповідає кількості геометричних параметрів, що використовують для ідентифікації, а кількість виходів цієї мережі відповідає кількості видів фітопланктону, що обрані для досліджень та можуть існувати в умовах водойми, які досліджують. Для навчання ШНМ використовують тестові відеозображення, що містять фітопланктон заздалегідь відомих видів. В якості простора ознак для ідентифікації використовують геометричні параметри, розраховані в п. 5.

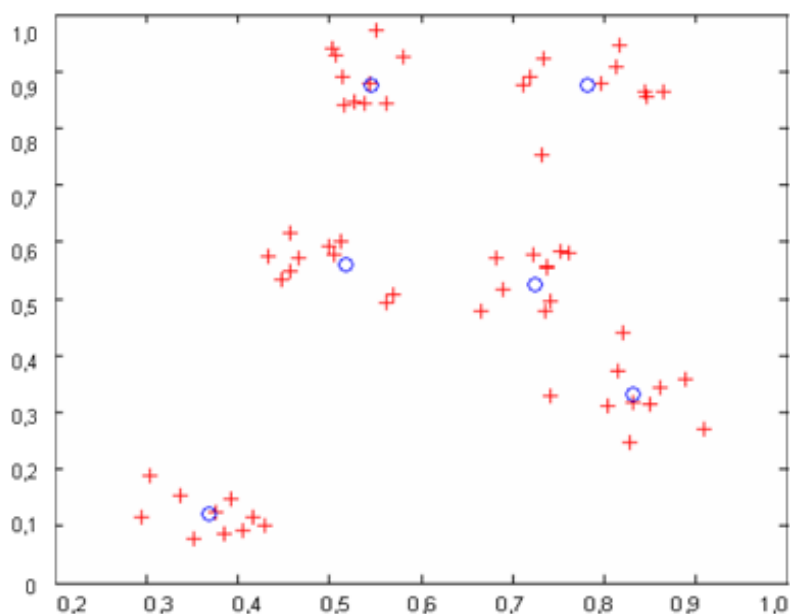
7. Визначають загальну кількість фітопланктону кожного виду у кожному препараті. Цю операцію зазвичай виконують в обчислювальному середовищі цифрової ЕОМ.

8. Розраховують кількісні показники, що характеризують розвиток фітопланктону в цілому та його окремих видів у водоймі. Наприклад, це можуть бути структурно-функціональні показники стану фітопланктону, частота зустрічі його конкретних видів, інформаційне різноманіття фітопланктону [2, 44]. Ці операції зазвичай виконують в обчислювальному середовищі цифрової ЕОМ.

Для прикладу формуємо тестовий сигнал, який складається з 60 наборів геометричних параметрів екземплярів фітопланктону (10 екземплярів для кожного з 6 видів фітопланктону). Цей сигнал подаємо на вхід ШНМ Кохонена. Ця ШНМ на виході визначає 6 центрів кластерів в режимі навчання (рис. 3.12).



а) режим навчання ШНМ на основі тестового сигналу



б) робочий режим ідентифікації в ШНМ

Рис. 3.12. Ідентифікація фітопланктону на основі ШНМ:

$p(1)$ – ексцентриситет; $p(2)$ – коефіцієнт заповнення;

+ - відображення геометричних параметрів екземплярів фітопланктону на площині ознак; \circ – виявлений центр кластера ГПФ

Для наведеного прикладу (рис. 3.12, відображено два геометричні параметри з трьох) кількість нейронів у вхідному прошарку i , відповідно, кількість входів цієї мережі дорівнювала 3 (використовується 3 геометричні параметри для ідентифікації: коефіцієнт випуклості, коефіцієнт заповнення, ексцентриситет). Кількість нейронів у вихідному прошарку, який приймає

рішення про належність екземплярів фітопланктону до одного з видів, і, відповідно, кількість виходів мережі становила 6 (на відеозображенні ідентифікуються фітопланктон 6 вказаних видів). Вірогідність безпомилкового визначення належності екземплярів фітопланктону до одного з видів на оброблених прикладах становила 0,95.

Програму, що реалізує запропоновану методику, наведено в додатку А.

Результати експериментальних досліджень підтвердили можливість практичної реалізації та впровадження розробленого методу ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону.

3.6. Оцінка точнісних характеристик штучної нейронної мережі як засобу обробки вимірювальної інформації

В автоматизованій системі для вимірювань ГПФ та його маси використано нейропроцесор для алгоритмічної обробки вимірювальної інформації про ГПФ. Нейропроцесор суттєво прискорює виконання операцій алгоритмічної обробки вимірювальної інформації та забезпечує підвищення швидкодії автоматизованої системи. Але цей нейропроцесор використовує цифрові дані з фіксованою комою та обмеженою розрядністю, що може призвести до виникнення додаткових похибок вимірювальної інформації про ГПФ. Тому необхідно оцінити точнісні характеристики алгоритмічної обробки вимірювальної інформації за допомогою ШНМ в нейропроцесорі.

В процесі розрахунків слід обмежитися деякою точністю, з якою може працювати ШНМ, тобто вибрати інтервал, в якому можуть змінюватися значення вектора вихідних сигналів мережі. Виходячи з вибраної похибки для вихідних сигналів мережі, слід обчислити допустимі похибки для вагів синапсів і вхідних сигналів мережі. Оцінка похибок сигналів мережі дуже корисна при розв'язанні задачі спрощення нейронної мережі. Знаючи допустиму похибку вихідного сигналу будь-якого елемента мережі, ми можемо замінити його більш простими, але не менш точними елементами так, щоб в результаті помилка не перевищувала задану.

Розглянемо два підходи до рішення задачі обчислення похибок сигналів мережі [39, 133, 134]. При першому підході (гарантовані інтервальні оцінки) обчислюються допустимі інтервали для похибок сигналів мережі такі, що похибка вектора вихідних сигналів гарантовано (з ймовірністю 1,0) не перевищує задану. При другому підході (середньоквадратичні оцінки похибок) обчислюються середньоквадратичні відхилення похибок сигналів. При цьому часто використовується припущення про те, що похибки різноманітних сигналів є незалежними випадковими величинами і сумарна похибка має нормальний розподіл.

Існує принципова різниця між цими двома типами оцінок. Гарантовані інтервальні оцінки виходять із розгляду найгірших можливих випадків, наскільки б малою не була їх ймовірність. Тому вони, як правило, завищують помилку. Формула додавання для інтервальних оцінок. Нехай для двох

величин x , y визначено гарантовані інтервали значень $x=x_0\pm\Delta x$, $y=y_0\pm\Delta y$. Тоді для їх суми маємо гарантовану оцінку: $x+y= x_0+y_0 \pm(\Delta x+\Delta y)$, тобто $\Delta x+y=\Delta x+\Delta y$.

Середньоквадратичні оцінки, навпаки, не враховують можливі великі відхилення. Формула додавання для середньоквадратичних оцінок. Нехай для двох незалежних величин x , y визначено середньоквадратичне відхилення σ_x , σ_y . Тоді $\sigma_{x+y}=(\sigma_x^2 +\sigma_y^2)^{1/2}$.

Похибки вагів синапсів обчислено на основі методу зворотнього поширення похибок [133, 134] для сигналів ШНМ. При розрахунках сигнал, що проходить по лініям ШНМ у зворотньому напрямку, фактично є допустимою похибкою сигналу, який проходить по цій лінії в прямому напрямку. При цьому будемо вважати, що ваги синапсів похибок не мають і похибки вихідних сигналів мережі утворюються за рахунок похибок вхідних сигналів. Для штучного нейрону при відомій похибці вихідного сигналу гарантована інтервальна оцінка похибки вхідного сигналу обчислюється наступним чином [39, 133, 134]:

1. Точка розгалуження сигналів ШНМ. Якщо похибки вихідних сигналів точки розгалуження рівні $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k)$, то похибка вхідного сигналу точки розгалуження не повинна перевищувати $\min\{\varepsilon_i\}_{i=1}^k$.

2. Нелінійний перетворювач (функція активації) ШНМ. Якщо похибка вихідного сигналу нелінійного перетворювача рівна ε , то похибка його вхідного сигналу не повинна перевищувати $\varepsilon/\max|\varphi'(x)|$, де x – вихідний сигнал нелінійного перетворювача, φ – його функція активації і $x \in [\varphi^{-1}(y-\varepsilon), \varphi^{-1}(y+\varepsilon)]$ або в лінійному наближенні $\varepsilon/|\varphi'(A)|$, де A – вхідний сигнал нелінійного перетворювача при прямому функціонуванні мережі.

3. Суматор ШНМ. Якщо при зворотньому поширенні похибка вихідного сигналу адаптивного суматора рівна ε , то похибка кожного входу суматора не повинна перевищувати ε_i , де $\varepsilon_i \leq \varepsilon/\sum_{i=1}^n |\alpha_i|$ для рівномірного розподілу і $\varepsilon_i = \varepsilon/(n \cdot \alpha_i)$ для нормального розподілу.

Для середньоквадратичних оцінок похибок вхідних сигналів при відомих похибках вихідних сигналів формули мають вигляд [39, 133, 134]:

1. Точка розгалуження сигналів ШНМ. Якщо дисперсії похибок вихідних сигналів точки розгалуження рівні D_1, D_2, \dots, D_k , то в якості похибки вхідного сигналу точки розгалуження вибирається $\min\{D_i\}_{i=1}^k$.

2. Нелінійний перетворювач (функція активації) ШНМ. Якщо середньоквадратичне відхилення похибки вихідного сигналу нелінійного перетворювача рівне σ , то похибка його вхідного сигналу не повинна перевищувати $\sigma/|\varphi'(A)|$, де A – вхідний сигнал нелінійного перетворювача при прямому функціонуванні і φ – його функція активації.

3. Суматор ШНМ. Якщо квадратичне відхилення похибки вихідного сигналу адаптивного суматора рівне σ , то похибка кожного входу суматора не повинна перевищувати σ_i , де $\sigma_i \leq \sigma / \sum_{i=1}^n \alpha_i^2$ для рівномірного розподілу і $\sigma_i = \sigma / (n \cdot \alpha_i)$ для нормального розподілу.

Дослідимо випадок, коли ваги синапсів мають деякі похибки, а вхідні сигнали мережі похибок не мають. В цьому випадку похибки вихідних сигналів мережі утворюються лише за рахунок похибок, внесених вагами синапсів. Потрібно оцінити припустимі похибки ваг синапсів. Їх оцінка корисна при реалізації ШНМ на основі нейропроцесора.

Нехай задано допустиму похибку вихідних сигналів мережі. Потрібно обчислити величини допустимих похибок вагів синапсів і сигналів такі, що похибка вихідного сигналу не перевищує задане значення.

Визначимо середньоквадратичні оцінки похибок вагів синапсів. Нехай похибки вагів синапсів є незалежними випадковими величинами. Також задана δ – допустима похибка вихідного сигналу мережі. Будемо розглядати її як величину середньоквадратичного відхилення похибки вихідного сигналу мережі σ_{out} .

Вихідний сигнал мережі одночасно є вихідним сигналом нелінійного перетворювача. Тому, знаючи величину середньоквадратичного відхилення похибки вихідного сигналу σ_{out} , ми можемо обчислити середньоквадратичне відхилення похибки вхідного сигналу нелінійного перетворювача методом зворотнього поширення точності. Середньоквадратичне відхилення похибки вхідного сигналу обчислюється за формулою: $\sigma = \frac{\sigma_{out}}{|\varphi'(A)|}$, де φ – функція активації нелінійного перетворювача, A – його точний вхідний сигнал.

Середньоквадратичне відхилення похибки вхідного сигналу нелінійного перетворювача σ , в свою чергу, є водночас середньоквадратичним відхиленням похибки вихідного сигналу суматора. Дисперсія вихідного суматора рівна σ^2 . Знаючи дисперсію вихідного сигналу суматора, ми можемо обчислювати середньоквадратичні відхилення похибок ваг синапсів і вхідних сигналів суматора.

Математичне очікування випадкових величин ε_{I_i} і ε_{α_i} рівне нулю. Випадкові величини ε_{I_i} і ε_{α_i} є незалежними, тому

$$D(\varepsilon_{I_i} \cdot \varepsilon_{\alpha_i}) = D\varepsilon_{I_i} \cdot D\varepsilon_{\alpha_i} + (M\varepsilon_{I_i})^2 \cdot D\varepsilon_{\alpha_i} + (M\varepsilon_{\alpha_i})^2 \cdot D\varepsilon_{I_i} = D\varepsilon_{I_i} \cdot D\varepsilon_{\alpha_i}.$$

При нормальному розподілі $\frac{\varepsilon}{n} \geq |x_i| \varepsilon_{\alpha_i} + |\alpha_i| \varepsilon_{I_i} + \varepsilon_{\alpha_i} \varepsilon_{I_i}$. Розглянемо дисперсію обох частин цієї нерівності:

$$\frac{\sigma^2}{n} = D(|x_i| \varepsilon_{\alpha_i} + |\alpha_i| \varepsilon_{I_i} + \varepsilon_{\alpha_i} \varepsilon_{I_i}) = x_i^2 \cdot \sigma_{\alpha_i}^2 + \alpha_i^2 \sigma_{I_i}^2 + \sigma_{\alpha_i}^2 \cdot \sigma_{I_i}^2.$$

Звідси одержуємо

$$\sigma_{I_i}^2 = \sqrt{\frac{\sigma^2 / n - x_i^2 \cdot \sigma_{\alpha_i}^2}{\alpha_i^2 + \sigma_{\alpha_i}^2}}.$$

У цій формулі дві невідомі величини: σ_{I_i} и σ_{α_i} . Щоб обчислити σ_{I_i} , необхідно надати деяке значення величині σ_{α_i} . Представимо $\sigma_{\alpha_i}^2 = k\sigma^2$. Обираючи k , ми визначаємо $\sigma_{\alpha_i}^2$ і можемо обчислити σ_{I_i} . Ми отримали формулу для пропорційного розподілу середньоквадратичних відхилень похибок.

Дисперсія вихідного сигналу суматора рівна σ^2 . Як було показано вище, похибка вихідного сигналу складається з похибок сигналів та ваг синапсів: $\sum_{i=1}^n [x_i - \varepsilon_{I_i}; x_i + \varepsilon_{I_i}] \cdot [\alpha_i - \varepsilon_{\alpha_i}; \alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}]$. Розглянемо дисперсію цієї суми:

$$\begin{aligned} & D\left(\sum_{i=1}^n [x_i - \varepsilon_{I_i}; x_i + \varepsilon_{I_i}] \cdot [\alpha_i - \varepsilon_{\alpha_i}; \alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}]\right) = \\ & = \sum_{i=1}^n D[x_i - \varepsilon_{I_i}; x_i + \varepsilon_{I_i}] \cdot [\alpha_i - \varepsilon_{\alpha_i}; \alpha_i + \varepsilon_{\alpha_i}] = \\ & = \sum_{i=1}^n D(x_i \cdot \alpha_i) + \sum_{i=1}^n D(x_i \cdot \varepsilon_{\alpha_i}) + \sum_{i=1}^n D(\alpha_i \cdot \varepsilon_{I_i}) + \sum_{i=1}^n D(\varepsilon_{\alpha_i} \cdot \varepsilon_{I_i}) = \\ & = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot D\varepsilon_{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 D\varepsilon_{I_i} + \sum_{i=1}^n D\varepsilon_{\alpha_i} \cdot D\varepsilon_{I_i} = \\ & = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sigma_{\alpha_i}^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_{I_i}^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_{\alpha_i}^2 \cdot \sigma_{I_i}^2 = \sigma^2. \end{aligned}$$

Припустимо, що дисперсії похибок вхідних сигналів суматора $\sigma_{I_i}^2$ рівні між собою і дисперсії похибок його ваг синапсів $\sigma_{\alpha_i}^2$ рівні між собою. Обчислимо середньоквадратичне відхилення похибок вхідних сигналів суматора:

$$\sigma_{I_i} = \sqrt{\frac{\sigma^2 - \sigma_{\alpha_i}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 + n \cdot \sigma_{\alpha_i}^2}}$$

У цій формулі є дві невідомі величини: σ_{I_i} і σ_{α_i} . Щоб обчислити σ_{I_i} , потрібно задати деяке значення величині σ_{α_i} так, щоб чисельник був додатною величиною. Тобто варто вибрати $0 < k < 1 / \sum_{i=1}^n x_i^2$. Обираючи таке k , ми визначаємо $\sigma_{\alpha_i}^2$ і можемо обчислити σ_{I_i} . Ми отримали формули для рівномірного розподілу середньоквадратичних відхилень похибок.

Для випадку обчислень ГПФ та використання базового елемента ШНМ в нейропроцесорі NeuroMatrix NM6403 (див. рис. 3.3) середньоквадратична похибка вихідного сигналу σ_{Z_i} на виході нелінійного перетворювача ШНМ задається на основі загальних вимог до точності вимірювань в автоматизованій системі. Тому середньоквадратичне відхилення вхідного сигналу нелінійного перетворювача і одночасно вихідного сигналу суматора

$\sigma_{Y_i} = \sigma_{Z_i} / |\varphi(Y_i)|$. За умови, що дисперсії $\sigma_{X_j}^2$ вхідних сигналів суматора є рівними між собою, дисперсії $\sigma_{W_{ij}}^2$ похибок вагових коефіцієнтів теж є рівними, отримано середньоквадратичну похибку вхідних сигналів ШНМ

$$\sigma_{X_j} = \sqrt{\frac{\sigma_{Y_i}^2 - \sigma_{W_{ij}}^2 \sum_{j=1}^N X_j^2}{\sum_{j=1}^N W_{ij}^2 + N \cdot \sigma_{W_{ij}}^2}}$$

Таким чином, отримані результати дозволяють оцінити точність обробки вимірювальної інформації та отриманих результатів вимірювань при заданій розрядності нейропроцесора. Якщо задані вимоги до точності вимірювань ГПФ, то отримані результати дозволяють обчислити необхідну розрядність цифрових даних в нейропроцесорі. Можливість роботи з цифровими даними змінної розрядності у нейропроцесорі забезпечує збільшення швидкодії та продуктивності зі зменшенням розрядності даних, що дозволяє знаходити необхідне співвідношення точності вимірювань та швидкодії автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси.

Час вимірювань однієї проби води складає 5 сек. на відміну від відомих засобів вимірювань, що потребують на цю операцію 30 хвилин. Максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктонних водоростей дорівнює ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою САМ-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань лінійних розмірів фітопланктонних водоростей $\pm 1,0$ мкм на відміну від відомих засобів вимірювань, у яких точність дорівнює 20 мкм в залежності від величини збільшення мікроскопу. Розрядність цифрових даних в нейропроцесорі NeuroMatrix NM6403 дорівнює 16 двійкових розрядів. Таким чином, використання нейропроцесора NeuroMatrix NM6403 в складі автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси дозволяє забезпечити потрібні точнісні характеристики вимірювань та швидкодію, вищу за відомі засоби вимірювань.

3.7. Висновки до розділу 3

1. Створено автоматизовану систему для вимірювань ГПФ та його маси у водоймах, яка має розширені функціональні можливості і підвищену швидкодію у порівнянні із існуючими засобами вимірювань.

2. Визначення ГПФ включає вимірювання його геометричних розмірів та площі, розрахунок морфометричних ознак та коефіцієнтів форми. Створена методика отримання вимірювальної відеоінформації про ГПФ, що полягає у наступному: відбір і підготовка проб води з фітопланктоном з контрольних точок водойми; формування цифрового відеозображення за допомогою мікроскопа та пристрою формування відеозображень; введення відеозображень в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ; алгоритмічна обробка відеозображень з метою вимірювання кількісних показників,

геометричних параметрів, об'єму і маси фітопланктону; прогноз динаміки змін геометричних параметрів і маси фітопланктону у водоймі.

3. Алгоритмічна обробка цифрової двовимірної відеоінформації включає такі етапи: видалення шумів; відновлення вимірювальної інформації на відеозображеннях; сегментацію відеозображень на об'єкти (фітопланктон) і фон за методом кольорової сегментації та на основі застосування ШНМ; видалення об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; заповнення порожнин в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення. Вибір об'єктів проводиться як в автоматичному, так і в ручному режимі, коли оператор безпосередньо на екрані монітора вказує опорні точки об'єктів на відеозображенні.

4. Для забезпечення видалення шуму необхідно застосовувати низькочастотну фільтрацію. Так як в даному випадку амплітуда шуму має нормальний розподіл, а спектр частот шуму рівномірний, то можна використовувати усереднюючий фільтр чи фільтр Гауса. Різниця між цими двома фільтрами полягає в тому, що використання усереднюючого фільтра для зменшення впливу шуму на відеозображення об'єктів призводить до розмиття зображення та погіршення його чіткості, що погано впливає на точність вимірювань, у той час як фільтр Гауса, в порівнянні з усереднюючим, значно менше розмиває зображення об'єктів. Саме тому для зменшення впливу шуму рекомендується фільтр Гауса.

5. Основною похибкою результатів вимірювань ГПФ є похибка дискретизації, пов'язана з дискретною структурою перетворювача "світло–сигнал" в цифровій відеокамері. Максимальна похибка визначення геометричних параметрів фітопланктонних водоростей дорівнює ± 2 дискретних точок (з урахуванням стиснення та алгоритмічних обчислень). При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою САМ-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань лінійних розмірів фітопланктонних водоростей $\pm 1,0$ мкм. За рахунок використання ШНМ та нейропроцесора час вимірювань однієї проби води складає 5 сек. на відміну від відомих засобів вимірювань, що потребують 30 хвилин.

6. Розроблено і обґрунтовано методику ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону на основі вимірювань його геометричних параметрів. Ця методика базується на використанні інформаційно-комп'ютерних технологій і ШНМ. В результаті визначається належність кожного екземпляра фітопланктону до одного з видів та розраховується маса фітопланктону, а також обчислюються інтегральні показники стану водойми. Отримані результати дозволяють здійснювати контроль за станом водойм господарсько-побутового призначення.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ТА ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДОЙМАХ

4.1. Розробка математичної моделі процесів розвитку фітопланктону у водоймах за результатами вимірювань та ідентифікації його екземплярів

Для побудови математичної моделі процесів розвитку фітопланктону у водоймах, потрібні такі показники, як кількісний склад фітопланктону та його біомаса. Визначення якісного та кількісного складу фітопланктону зазвичай проводиться шляхом гідробіологічного аналізу [2, 4, 44]. Основний метод аналізу полягає у концентрації фітопланктону на мембранних фільтрах і подальшому підрахунку кількості водоростей у камері Нажотта або на предметному склі, які розташовані під мікроскопом.

Біомаса фітопланктону визначається розрахунково-об'ємним методом. Необхідною умовою для цього є наявність даних по чисельності різних видів водоростей у пробах та лінійні розміри клітин водоростей.

Для вимірювань розмірів екземплярів фітопланктону їх прирівнюють до певних, найбільш подібних до даної морфологічної форми водоростей, геометричних тіл: кулі, паралелепіпеду, циліндру, конусу тощо. Далі проводять вимірювання необхідних геометричних характеристик фітопланктону: радіусу, діаметру, висоти, довжини тощо. Вимірювання розмірів водоростевих клітин виконується за допомогою окуляр-мікрометра з вимірювальною лінійкою, які входять до складу мікроскопа.

Для отримання більш точних даних необхідно провести вимірювання лінійних розмірів не менш як 30 водоростевих клітин одного виду. Отримані дані опрацьовуються статистично. Визначення об'єму клітин фітопланктону проводять по відомим геометричним формулам на основі отриманих лінійних розмірів екземплярів конкретного виду фітопланктону, подібних до певної геометричної фігури. Відносну густину екземплярів прісноводного фітопланктону (відносно води) приймають рівною 1,00-1,05. Вирахувану біомасу кожного виду множать на його чисельність і результат приводять у мг/дм³ або у г/м³.

На основі результатів вимірювань визначаються інтегральні показники стану і розвитку фітопланктону водойм. Найбільш інформативними і поширеними структурно-функціональними показниками стану фітопланктону є видове, таксономічне, екологічне, інформаційне та кількісне різноманіття, характеристика структури чисельності угруповань та біомаса [50].

Основним недоліком наведених методів є їх велика трудомісткість. Подолання цього недоліку можливе шляхом застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень з урахуванням особливостей задачі, що вирішується, особливо з урахуванням необхідності

моделювання процесів розвитку фітопланктону на основі отриманих показників.

Широке розповсюдження інформаційно-комп'ютерної техніки призвело до створення різноманітних апаратних засобів одержання цифрових відеозображень [59, 115]. Ці засоби цілком здатні забезпечити отримання відеозображень проб води, розміщених у мікроскопі. Основними з цих засобів є цифрові фотоапарати і цифрові відеокамери. Всі вони можуть бути використані для формування цифрових відеозображень проб води. Отримані таким чином відеозображення придатні до алгоритмічної обробки з метою визначення кількості і геометричних характеристик екземплярів фітопланктону. Апаратні засоби та методи алгоритмічної обробки цифрових відеозображень забезпечують такі переваги:

- забезпечується автоматизація процесу досліджень;
- розширюється функціональні можливості і підвищується оперативність засобів вимірювань геометричних характеристик фітопланктону у пробах води.

Зображення екземплярів фітопланктону, отримані після фільтрації шумів та сегментації, потрібно класифікувати, тобто визначити належність кожного екземпляру фітопланктону до одного з видів, відомих з гідробіології. Така класифікація може бути виконана на основі ознак об'єктів, які можна визначити по їх відеозображенням. Відомі декілька підходів до класифікації об'єктів по їх відеозображенням [82, 88]. Перш за все, це методи на основі геометричних ознак та структурно-синтаксичні методи. Методи на основі геометричних ознак базуються на визначенні деяких універсальних інваріант, тобто кількісних ознак, що є інваріантними до масштабування, зсуву та пороту об'єкта на різних відеозображеннях. Такі ознаки характеризують узагальнено форму об'єктів. Структурно-синтаксичні методи ґрунтуються на визначенні структурних відносин між фрагментами відеозображень об'єктів і використовують апарат дискретної математики.

Оскільки в даному випадку форма екземплярів фітопланктону є відносно простою і окремі їх екземпляри розглядаються і класифікуються незалежно один від одного, то доцільно використовувати метод геометричних ознак. Тим більше, що геометричні ознаки також потрібні для розрахунку показників стану екосистеми водойми (біомаса планктону тощо).

Обробка відеозображень включає перетворення початкового кольорового відеозображення у відеозображення в градаціях яскравості з врахуванням особливостей кольору фітопланктону і кольору фону; сегментацію по пороговому значенню яскравості; видалення шумів і виключення неоднорідностей об'єктів; видалення об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; заповнення порожнин в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення. Вибір об'єктів можна проводити як в автоматичному, так і в ручному режимі, коли оператор

безпосередньо на екрані монітора вказує опорні точки об'єктів на відеозображенні.

Розглянемо приклад дослідження фітопланктону на основі запропонованої методики.

Для досліджень використовувалися декілька зразків фітопланктону, розташованих на предметному склі мікроскопа. Відеозображення формувалися за допомогою лабораторного мікроскопа МС 200Т (виробництво Micros, Австрія) з вбудованою цифровою кольоровою відеокамерою САМ 2800. Основні технічні характеристики цього обладнання:

- збільшення мікроскопу: $40^x \dots 1000^x$;
- розмір зображення відеокамери: 640x480 дискретних точок;
- частота формування відеозображень: 12 кадрів за секунду;
- розрізняюча здатність: 360 телевізійних ліній по горизонталі;
- вихідний інтерфейс: USB.

В результаті були отримані відеозображення фітопланктону (рис. 4.1). Як бачимо, дане обладнання забезпечує достатнє збільшення і розрізняючу здатність для дослідження фітопланктону на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень.

На рис. 4.2 наведено результати цифрової обробки відеозображення фітопланктону відповідно до запропонованої методики. Після розподілу початкового відеозображення на об'єкти і фон за методом кольорової сегментації було виконано видалення шумів та об'єктів, що розташовані на межі відеозображення. Далі були заповнені порожнини в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення.

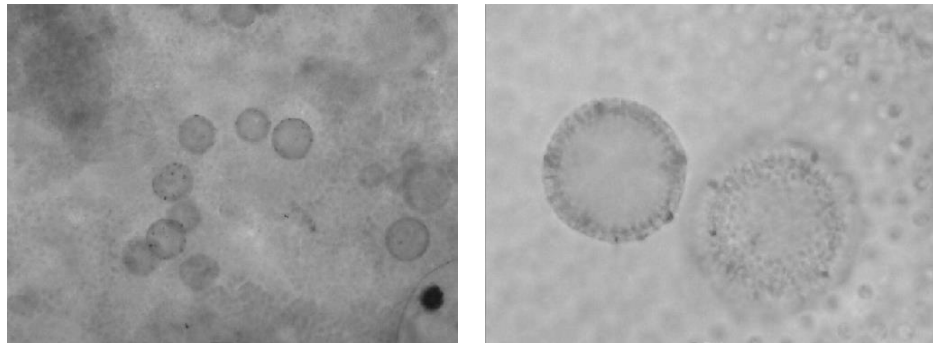
Результати вимірювань і розрахунків геометричних ознак для деяких з екземплярів фітопланктону наведено в таблиці 4.1. Координати і розміри об'єктів вимірювалися безпосередньо по відеозображенню. Морфометричні ознаки та коефіцієнти форми розраховувалися згідно формул з підрозділу 1.3.

Таблиця 4.1

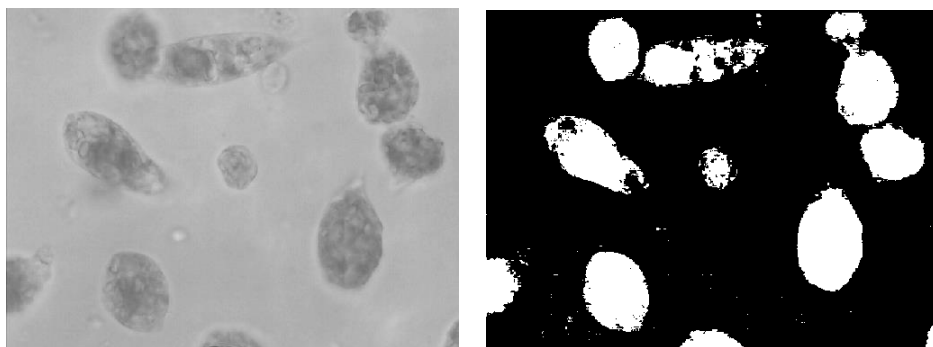
Порівняння значень ГП для різних видів фітопланктону

Коефіцієнти геометричної форми	Вид фітопланктону		
	<i>Euglena proxima</i>	<i>Volvox globator</i>	<i>Ankistrodesmus</i>
1. Коефіцієнт випуклості	0,975	0,991	0,882
2. Коефіцієнт заповнення	0,739	0,763	0,218
3. Ексцентриситет	0,793	0,234	0,987

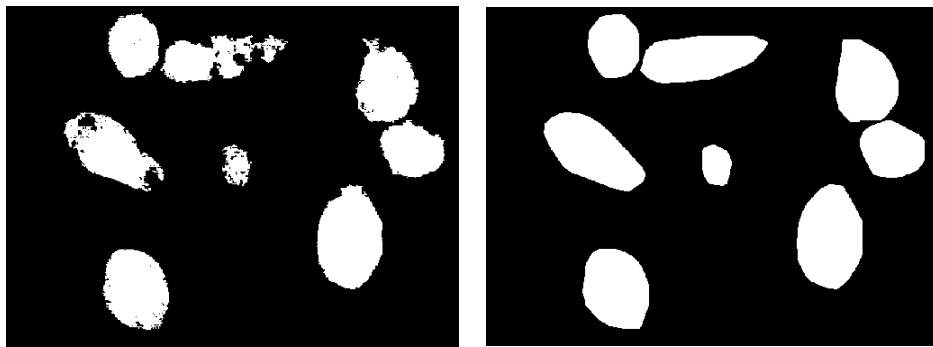
На основі даних таблиці 4.1 можна зробити висновок про те, що морфометричні ознаки і коефіцієнти форми можуть бути використані для визначення видового складу фітопланктону в пробах води. Вони подібні для трьох зразків водоростей *Euglena proxima* та відрізняються для зразка водоростей *Volvox globator*. Особливо це помітно для моментів та осей інерції і ексцентриситету.



а) б)
Рис. 4.1. Відеозображення водоростей *Volvox globator*:
а) збільшення 100^x; б) збільшення 400^x



а) б)



в) г)

Рис. 4.2. Цифрова обробка відеозображення фітопланктону *Euglena proxima*:
а) початкове кольорове відеозображення (збільшення 400^x); б) результат сегментації на об'єкти і фон; в) результат видалення завад та об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; г) результат заповнення порожнин в об'єктах

Дані про кількість та видовий склад фітопланктону у пробах води, отримані на основі цифрової обробки відеозображень, є початковими даними для розрахунку інтегральних показників розвитку фітопланктону у водоймах та для побудови математичної моделі цих процесів. Взагалі, нам необхідно побудувати математичну модель, яка дозволила б прогнозувати розвиток фітопланктону та управляти даним процесом.

Побудова математичної моделі процесів розвитку фітопланктону у водосховищах та інших водоймах складається з таких етапів:

- отримання і накопичення експериментальних даних про процеси розвитку фітопланктону протягом певного періоду;
- введення цих даних в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ;
- визначення загального вигляду функції, що описує даний процес;
- визначення чисельних значень коефіцієнтів функції;
- побудова графіків і визначення похибок моделювання.

Розглянемо приклад моделювання процесів розвитку синьозелених водоростей у водосховищі “Дениші” (рис. 4.3). Один з можливих варіантів побудови математичної моделі полягає у визначенні коефіцієнтів поліному, що апроксимує експериментальні дані.

Результати показують, що поліном 6-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку синьозелених водоростей протягом року.

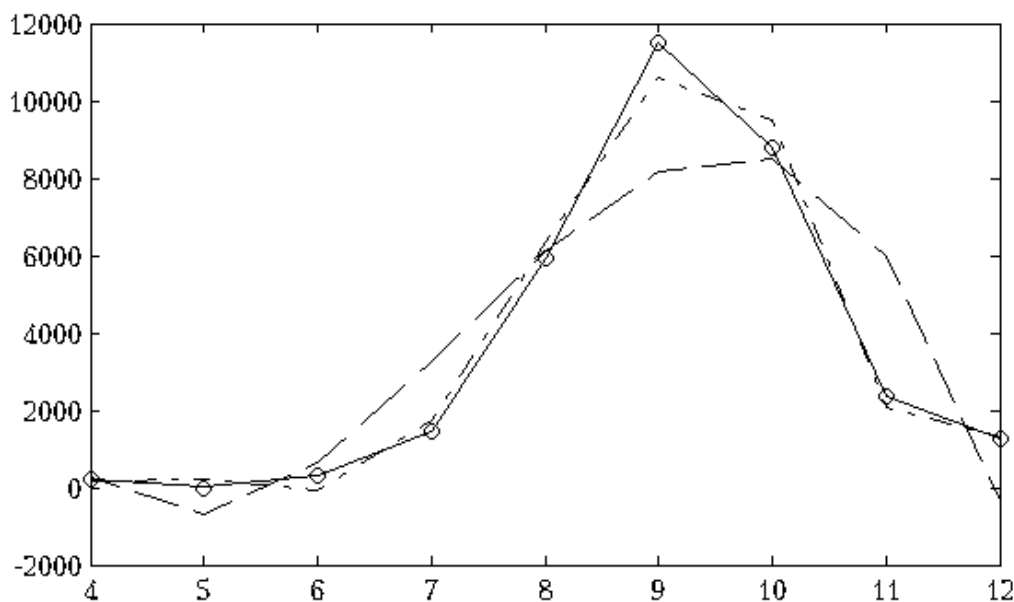


Рис. 4.3. Моделювання процесів розвитку синьозелених водоростей у водосховищі “Дениші” (по горизонтальній осі – порядковий номер місяця, по вертикальній – концентрація водоростей, кількість на см³, окремі точки – дані експериментальних досліджень, штрихова лінія – апроксимація експериментальних даних поліномом 3-го ступеня, штрихпунктирна лінія – апроксимація поліномом 6-го ступеня, суцільна лінія – апроксимація поліномом 8-го ступеня)

4.2. Фрактальне моделювання і стиснення цифрових відеозображень проб води з фітопланктоном

В даному підрозділі розглянуто можливості використання методів фрактального моделювання і стиснення кольорових відеозображень, що містять вимірювальну відеоінформацію про ГПФ. Розроблено алгоритм фрактального стиснення кольорових відеозображень, який відповідає

рекомендаціям міжнародного стандарту ІТУ-Т.81. Наведено результати експериментальних досліджень роботи алгоритму фрактального стиснення.

Стиснення цифрових відеозображень проб води та еталонних екземплярів фітопланктону для довготривалого зберігання з високим коефіцієнтом стиснення базується на методах, які передбачають втрату деякої частини інформації, що міститься у відеозображенні [68, 107]. Загальноприйнятим підходом до стиснення цифрових відеозображень є їх стиснення на основі кодування з перетворенням, наприклад на основі дискретного косинусного перетворення в методі JPEG або wavelet-перетворення [135, 136]. Однак, результати багатьох досліджень вказують на переваги методів фрактального моделювання і стиснення відеозображень у порівнянні з вказаними методами [107, 135, 137]. Ці переваги доводяться на прикладі відеозображень, що призначені для візуального сприйняття людиною. Однак, застосування стиснення відеозображень в автоматизованих вимірювальних системах потребує проведення додаткових досліджень та розробки алгоритмів стиснення, що враховують особливості цієї області обробки інформації.

Метою проведених досліджень є підвищення ступеня стиснення та точності відновлення відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ. Основою цього є подальший розвиток методів фрактального моделювання та стиснення цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про ГП об'єктів.

Сучасним методом алгоритмічної обробки цифрових відеозображень є їх перетворення, кодування та стиснення на основі теорії фракталів [135, 138, 139]. Основною задачею, що вирішується у автоматизованій вимірювальній системі на основі фрактальних методів, є підвищення точності і компактності цифрових відеозображень при їх накопиченні та зберіганні в цифровій ЕОМ. Перевагою фрактальних методів є менші похибки та значне зменшення об'єму цифрових даних відеозображень у порівнянні з існуючими методами [135, 140].

Фрактальне перетворення дозволяє знаходити базові подібні області на відеозображенні з урахуванням повороту, масштабування геометричних розмірів та амплітуди відеосигналу для цих областей. В результаті, забезпечується значне зменшення об'єму цифрових відеозображень, для яких потрібно зберігати тільки базові подібні області та набір перетворень, що дозволяють відновити ці відеозображення на основі базових областей. Фрактальні методи перетворення особливо ефективні для ОВ, що мають фрактальні властивості [135, 139, 141]. В тому числі – це екземпляри фітопланктону у пробах води з водойм.

Фрактальні властивості ОВ характеризуються його фрактальною розмірністю [139]. Фрактальна розмірність $d_{\text{фр}}$ визначається шляхом розподілу цифрового відеозображення на квадрати зі стороною $\delta_{\text{фр}}$ та

підрахунку кількості квадратів $N_{\text{кф}}(\delta_{\text{фр}})$, через які проходить контур ОВ. Далі будують графік залежності $\lg(N_{\text{кф}}(\delta_{\text{фр}}))$ від $\lg(\delta_{\text{фр}})$ та апроксимують його функцією $N_{\text{кф}}(\delta_{\text{фр}}) = L_{\text{п}} \cdot (\delta_{\text{фр}})^{-d_{\text{фр}}}$ або для логарифмічного масштабу $\lg(N_{\text{кф}}(\delta_{\text{фр}})) = \lg L_{\text{п}} - d_{\text{фр}} \lg \delta_{\text{фр}}$, де $L_{\text{п}}$ – коефіцієнт пропорційності. Наприклад, для звичайного контуру у вигляді прямої лінії з розмірністю $d_{\text{фр}} = 1$ при $\delta_{\text{фр}} \rightarrow 0$ коефіцієнт $L_{\text{п}}$ дорівнює довжині контуру. Для контуру ОВ з фрактальними властивостями його фрактальна розмірність $1 < d_{\text{фр}} < 2$, а коефіцієнт $L_{\text{п}}$ характеризує геометричні властивості базових фрагментів, що утворюють складний фрактальний контур.

Фрактальне перетворення $T_{\text{фр}}$ дозволяє на основі множини $f_{\text{т}}$ базових подібних областей за допомогою ітераційної процедури відновити початкове відеозображення f_0 [135, 138]. Для цього знаходять оцінку $\hat{T}_{\text{фр}}$ і застосовують обернене фрактальне перетворення $\hat{T}_{\text{фр}}^{-1}$ до відеозображення $f_{\hat{1}}$, що сформоване ПФВЗ і містить похибку Δ_{f_0} (рис. 4.4):

$$f_{\text{т}} = \hat{T}_{\text{фр}}^{-1}(f_{\text{н}}), \quad f_{\text{н}} = f_0^* = f_0 + \Delta_{f_0}.$$

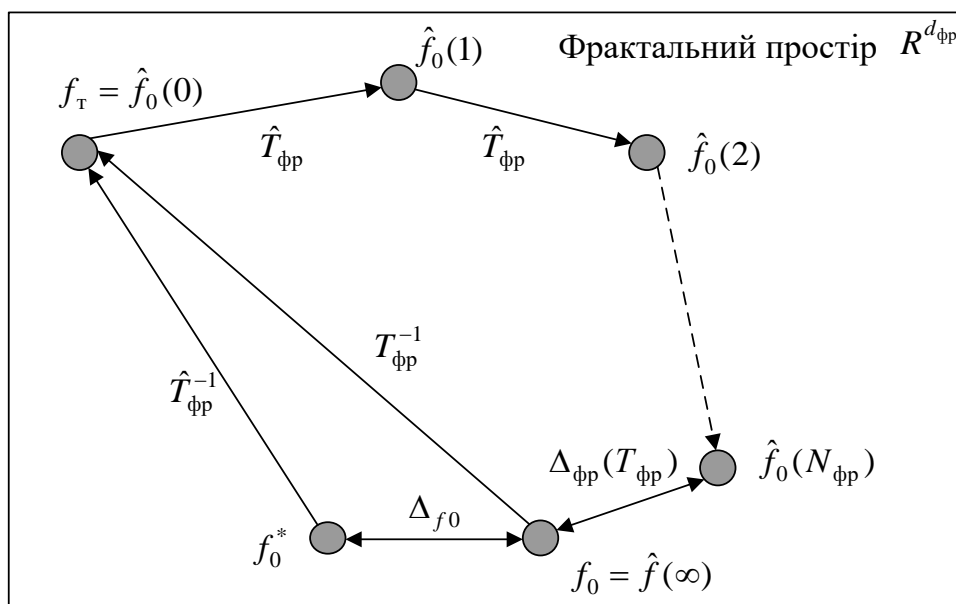


Рис. 4.4. Фрактальне перетворення відеозображень з вимірювальною інформацією про ГП

Відновлення відеозображень полягає в ітераційному застосуванні (з кількістю ітерацій $N_{\text{фр}}$) оцінки фрактального перетворення $\hat{T}_{\text{фр}}$ до $f_{\text{д}} = \hat{f}_0(0)$:

$$\hat{f}_0(i) = \hat{T}_{\text{фр}}(\hat{f}_0(i-1)) = f_0 + \Delta_{\text{фр}}(i), \quad i \in \overline{1, N_{\text{фр}}}.$$

Для отримання початкового відеозображення f_0 необхідно виконати нескінчену кількість ітерацій. За скінчену кількість ітерацій $N_{\text{фр}}$ отримуємо оцінку початкового відеозображення \hat{f}_0 з похибкою $\Delta_{\text{фр}}(N_{\text{фр}})$.

Шляхом вибору параметрів фрактального перетворення та кількості ітерацій можна суттєво зменшити похибки ГП на відеозображеннях за умови $\Delta_{\text{фр}}(N_{\text{фр}}) < \Delta_{f_0}$. У вимірювальній системі на основі фрактального перетворення забезпечено компактне зберігання відеозображень з можливістю високоточного вимірювання ГПФ.

В процесі проведених досліджень розроблено фрактальну модель відеозображень з вимірювальною інформацією, що стискаються. Прикладом таким відеозображень є еталонні екземпляри фітопланктону, що характеризуються певною геометричною формою. Практична потреба в стисненні таких відеозображень виникає при розробці автоматизованої вимірювальної системи, що зберігає еталонні зображення різних видів фітопланктону та використовує їх для задач ідентифікації екземплярів фітопланктону у пробах води за їх ГП. Вказані відеозображення характеризуються наявністю елементів з специфічними сутностями в сигналі, що є самоподібними при різних масштабних коефіцієнтах. Це є однією з умов ефективного застосування методів фрактального моделювання і стиснення відеоінформації.

Для даних задач важливими вимогами до фрактальної моделі і алгоритму стиснення відеозображень є:

- досягнення високих ступенів стиснення в процесі кодування;
- досягнення високої швидкості відновлення інформації в процесі декодування;
- можливість масштабування отриманого відеозображення зі збереженням його основних характеристик.

Проте, зважаючи на значний рівень інформаційної надмірності в таких сигналах, в багатьох випадках є можливість представлення даного сигналу за допомогою деякої моделі, що сприймається як еквівалент даного сигналу, але не є ідентичною до нього. При цьому є можливість представлення цієї моделі в більш компактному вигляді, ніж сам сигнал. Це дозволяє знизити більш ніж на порядок необхідний об'єм цифрової інформації для подання сигналу. Така модель сигналу є основою для розробки алгоритму стиснення цифрових відеозображень.

Модель \hat{x} сигналу x в даному випадку повністю описується деяким стискаючим фрактальним перетворенням T , для якого дана модель сигналу є нерухомою точкою:

$$x \rightarrow \hat{x} = T^{\circ\circ} x.$$

Процес відновлення моделі сигналу \hat{x} є процесом знаходження нерухомої точки заданого стискаючого перетворення T та може бути виконаний за ітеративним алгоритмом:

$$x_n = Tx_{n-1},$$

де x_0 – довільна початкова точка множини всіх можливих сигналів I .

Вибір положення початкової точки впливає лише на кількість ітерацій алгоритму, що необхідні для отримання нерухомої точки перетворення.

В даному випадку стискаюче фрактальне перетворення T має такі особливості:

- використовується схема сегментації відеозображення на основі квадродерева;

- клас перетворень обмежено базовим типом афінних перетворень вигляду $T(u) = s \cdot u + o \cdot 1$, де s - параметр масштабування, o - параметр зсуву;

- множина доменних блоків складається з всіх можливих доменних блоків відеозображення з кроком вибірки, що знаходиться в певному діапазоні параметру масштабування (наприклад, можна обрати крок вибірки 2 для масштабного коефіцієнту, що знаходиться в діапазоні $(1/3) \leq k \leq 4$);

- використовується схема класифікації доменних блоків;

До відеозображень екземплярів фітопланктону доцільно застосовувати методи алгоритмічної обробки на основі теорії фракталів [135, 138 – 140]. При цьому забезпечується підвищення точності та компактності вимірювальної інформації про ГПФ у порівнянні з іншими методами. Основною операцією, що реалізується фрактальними методами, є зменшення об'єму відеозображень при їх накопиченні та зберіганні у вимірювальній системі.

Необхідність цих дій обумовлена дуже великим об'ємом відеозображень з вимірювальною інформацією. Об'єм одного відеозображення у сучасних ПФВЗ досягає декількох десятків мегабайт. Все це вимагає значних затрат технічних ресурсів та ускладнює вимірювання ГП.

З іншого боку, відеозображення мають значну надлишковість по відношенню до корисної вимірювальної інформації про ГП. Звідси впливає можливість зменшення об'єму відеозображень шляхом виключення надлишкової інформації, що не має суттєвого впливу на точність результатів вимірювання ГП.

Існуючі методи зменшення об'єму цифрових відеозображень орієнтовані на досягнення їх високої візуальної якості [37, 68, 72, 140]. Але такий підхід не ефективний при вимірюванні ГП і не забезпечує мінімізації похибки автоматизованої вимірювальної системи.

Найбільш сучасним та перспективним методом є зменшення об'єму відеозображень ОВ на основі теорії фракталів [135, 139, 140]. Застосування фракталів дозволяє зменшити об'єм відеозображень у декілька сотень разів при їх високій якості. Але, на теперішній час не відомо застосувань

фрактальних методів до зменшення об'єму відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ.

Тому було розроблено метод зменшення об'єму відеозображень з вимірювальною інформацією про ГПФ. Метод оснований на теорії фракталів.

Як відомо [135], в ході фрактального перетворення знаходяться області відеозображення (рангові блоки), що є подібними до типових структурних елементів даного типу відеозображень (доменних блоків). Наявність подібних елементів на відеозображеннях дозволяє суттєво скоротити об'єм цифрових даних, необхідних для накопичення і зберігання цих відеозображень у вимірювальній системі. Особливо ефективною така процедура є для ОВ (екземплярів фітопланктону), що мають фрактальні властивості [139, 141]. Максимально допустима розбіжність між ранговими та доменними блоками при їх порівнянні визначає точність передачі вимірювальної інформації про ГП.

При фрактальному перетворенні цифрового кольорового відеозображення виконується розподіл цифрових даних для кожного з каналів відеозображення на рангові блоки, наприклад, методом квадродерева [135]. На відміну від існуючих методів [68, 72, 140], в розробленому методі забезпечується змінний розмір рангових блоків, який адаптується до локальних особливостей цифрового кольорового відеозображення еталонних екземплярів фітопланктону. Якщо на деякій ділянці цифрового кольорового відеозображення присутній контур екземпляру фітопланктону, то виконується розподіл цієї ділянки на більш дрібні рангові блоки. Це забезпечує при зменшенні об'єму більш точну передачу координат контурів. Якщо деяка ділянка цифрового кольорового відеозображення є однорідною областю без наявності контурів, то розмір рангових блоків на цій ділянці збільшується. В результаті значно зменшується загальна кількість рангових блоків, що забезпечує значне зменшення об'єму відеозображення.

Розроблений метод виконують в такій послідовності:

1. Визначають параметри фрактального перетворення, які забезпечують задану точність передачі вимірювальної інформації про ГПФ. Це мінімальний розмір рангового блоку в д.т.; кількість і розміри в д.т. доменних блоків; максимально допустима похибка, що визначає відмінності між ранговими та доменними блоками при їх порівнянні. Для цього виконують та досліджують процес фрактального перетворення набору цифрових кольорових відеозображень зразків фітопланктону, що досліджується.

2. Перетворюють цифрове кольорове відеозображення в колориметричну систему, що забезпечує окреме зберігання інформації про яскравість і колір дискретних точок. Наприклад, це система Lab (L – яскравість або освітленість, a – зелені та червоні відтінки кольору, b – жовті та сині відтінки кольору) або $YCbCr$ (Y – яскравість, Cb – кольорорізницевий сигнал каналів синього та зеленого кольору, Cr – кольорорізницевий сигнал каналів червоного та зеленого кольору) [72].

3. Виконують субдискретизацію цифрових даних для кожного з каналів цифрового кольорового відеозображення, який описує колір цього відеозображення [140]. Субдискретизація не впливає на канал яскравості, що передає основну вимірювальну інформацію про ГП, та забезпечує додаткове зменшення об'єму цифрових кольорових відеозображень.

4. Виконують фрактальне перетворення цифрових даних для кожного з каналів цифрового кольорового відеозображення. Для цього використовують параметри фрактального перетворення, визначені в п. 1 даного методу.

5. Виконують статистичне кодування цифрових даних для кожного з каналів цифрового кольорового відеозображення. Це забезпечує додаткове зменшення об'єму цифрових кольорових відеозображень за рахунок видалення інформаційної надлишковості. Для статистичного кодування можуть бути використані код Хаффмена або арифметичне кодування [135, 140].

Розроблено алгоритм фрактального стиснення відеозображень, що містять вимірювальну інформацію. Алгоритм фрактального стиснення базується на фрактальній моделі відеозображень, що містять вимірювальну інформацію. Він відповідає рекомендаціям міжнародного стандарту ІТУ-Т.81. Використання фрактального перетворення є більш ефективним для задачі стиснення, ніж використання дискретного косинусного перетворення. Отже, очікувана ступінь стиснення повинна бути вищою.

Перед початком стиснення задаються такі параметри алгоритму:

- максимальне значення похибки відновлення відеозображення Δ_{\max} ;
- мінімальний рівень розбиття квадродерева l_{\min} для забезпечення початкового розподілу відеозображення на блоки (початкової сегментації);
- максимальний рівень розбиття квадродерева l_{\max} для забезпечення ефективного розподілу відеозображення на блоки (розмір блоків 2x2 дискретні точки є мінімально допустимим);
- рівень квантування параметрів масштабу та зміщення для обраного класу афінних перетворень.

Розроблений алгоритм фрактальної обробки відеозображень наведений на рис. 4.5.

Початкове відеозображення $IRGB$, що представлено в колориметричній системі RGB , перетворюється в відеозображення I_{YUV} , що представлено в колориметричній системі YUV 4:2:0. Символ \cup на рисунку відображає той факт, що кольорове зображення складається з трьох окремих компонентів (каналів) відповідно до обраної колориметричної системи. Для кожного з каналів відеозображення I_k , $k = 1, 2, 3$, виконується окремо процедура фрактального перетворення сигналу T з отриманням його фрактальної моделі C'_k . Сукупність фрактальних моделей трьох каналів відеозображення C' підлягає процедурі ентропійного кодування $Enc(C')$. Результат C є загальною

фрактальною моделлю початкового відеозображення, яка побудована за допомогою розробленого алгоритму.

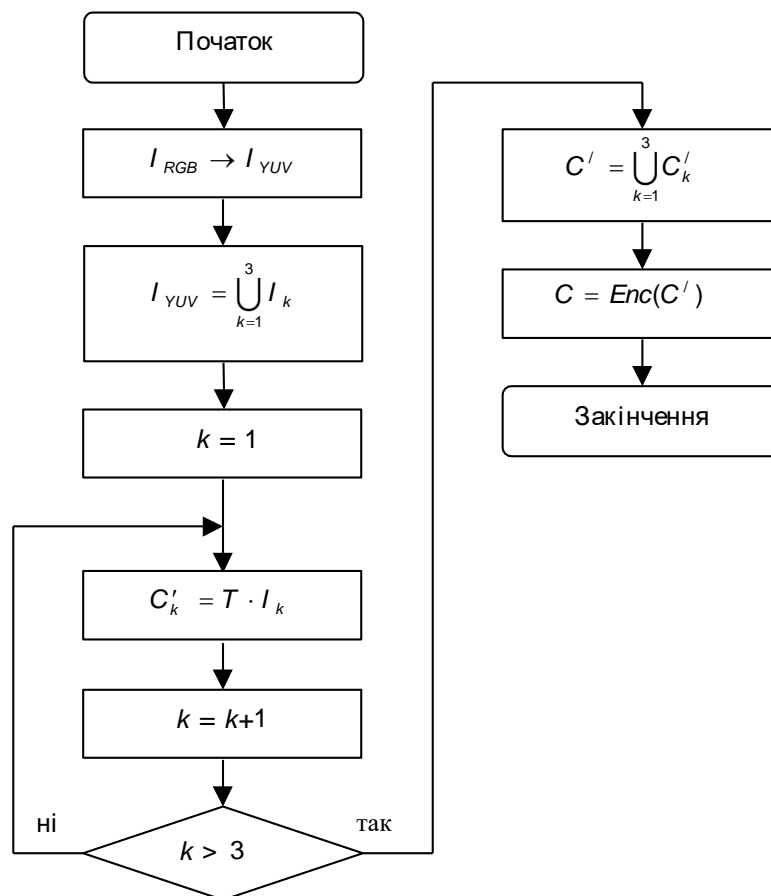


Рис. 4.5. Алгоритм фрактальної обробки цифрових відеозображень

Відновлення стиснутого відеозображення відбувається за подібною схемою, але в зворотному порядку.

Алгоритм фрактального перетворення для кожного каналу кольорового відеозображення побудований на основі методів, наведених в [135]. В алгоритмі враховані особливості відеозображень, що містять вимірювальну відеоінформацію.

На першому кроці алгоритму відбувається початковий розподіл відеозображення на блоки (початкова сегментація) для досягнення мінімального рівня глибини сегментації l_{\min} . Для кожного з отриманих рангових блоків r_i виконується його класифікація та пошук оптимального домену $d_{i,opt}$ і вектору коефіцієнтів перетворення $w_{n,i}$, які забезпечують мінімум похибки Δ . Якщо $l = l_{\max}$ або $\Delta < \Delta_{\max}$, то обчислений вектор коефіцієнтів перетворення зберігається як елемент фрактальної моделі сигналу. В іншому випадку виконується розширення множини рангових блоків шляхом квадрато-декомпозиції даного рангового блоку. Алгоритм фрактального перетворення відеосигналу наведено на рис. 4.6.

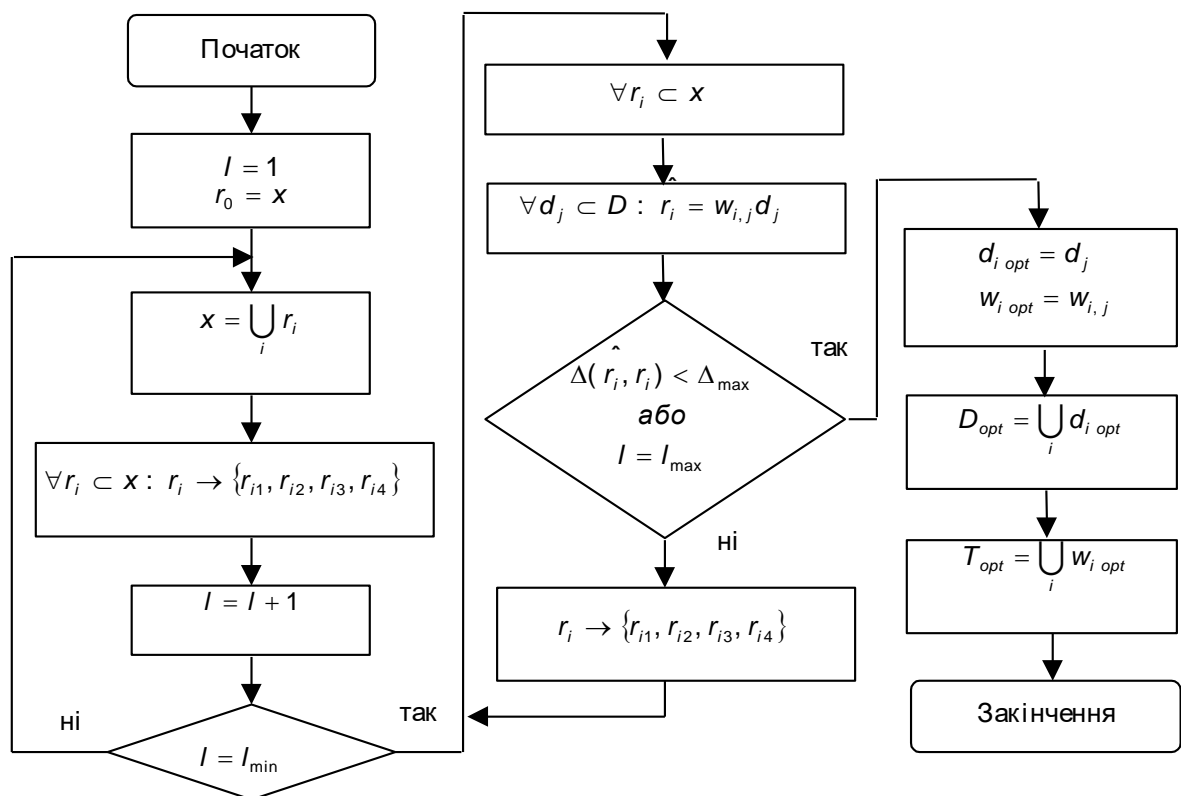


Рис. 4.6. Алгоритм перетворення відеосигналу на основі фрактального кодування

Відновлення відеозображення на основі його фрактальної моделі виконується шляхом обчислення фіксованої точки заданого перетворення $I = T^{\infty} x$, де x – деякий довільний початковий вектор. Параметром алгоритму виступає кількість ітерацій відновлення відеозображення. Іншим варіантом є використання критерію відстані між наближеннями до початкового відеозображення на попередній та наступній ітерації алгоритму відновлення $d(T^{ok} x, T^{ok-1} x) \leq \Delta$. Проте обчислювальна складність алгоритму в цьому випадку значно зростає. Тому було використано варіант алгоритму, для якого задається кількість ітерацій. Цю кількість потрібно обирати з урахуванням необхідної точності відновлення відеозображень після стиснення.

Для зменшення статистичної надмірності фрактальної моделі відеозображення, що отримана в результаті стиснення, пропонується використовувати алгоритм адаптивного арифметичного кодування.

Також було проведено експериментальні дослідження фрактального алгоритму стиснення. В ході цих досліджень оцінювалися похибки, що виникають на цифрових відеозображеннях внаслідок їх стиснення. При цьому критерії оцінки похибок повинні враховувати особливості вимірювальної інформації, що міститься на відеозображенні.

Універсальним кількісним критерієм оцінки абсолютних значень похибок на цифрових відеозображеннях є використання середньоквадратичної похибки [68, 142]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_{ij}^*)^2},$$

де u_{ij} – дискретні значення амплітуди відеосигналу для початкового відеозображення розміром $m \times n$ дискретних точок,
 u_{ij}^* – дискретні значення амплітуди відеосигналу для відеозображення, відновленого після стиснення.

Відносне значення похибок може бути оцінене на основі пікового співвідношення сигнал/шум за напругою відеосигналу:

$$\Psi_{PSNR} = 20 \lg \frac{U_{\max}}{\Delta},$$

де U_{\max} – максимальний діапазон значень амплітуди відеосигналу для множини дискретних точок початкового відеозображення.

Зауважимо, що в даному випадку шум – це викривлення початкового відеозображення, що виникли в результаті стиснення, а сигнал – це корисний відеосигнал, що містить вимірювальну інформацію про об'єкти, наявні на відеозображенні.

При вимірюванні показників кольору об'єктів доцільно безпосереднє обчислення вказаних похибок для кожного з каналів кольорового відеозображення з наступним визначенням максимального або середнього значення похибок серед каналів.

Якщо вимірюються геометричні характеристики об'єктів, що досліджуються або контролюються, то похибка геометричних вимірювань, що виникла при стисненні відеозображень, може бути оцінена таким чином [143]:

1. Розраховуються значення похибки відтворення амплітуди відеосигналу на основі відношення сигнал/шум.

2. Визначається форма перепадів відеосигналу в області контурів, що утворюють межі об'єктів на відеозображенні. Ця форма перепадів апроксимуються лінійною функцією, що має певний кут нахилу.

3. На основі лінійної форми перепадів відеосигналу виконується перерахунок похибки, визначеної в п. 1, в похибку визначення координат точок і інших геометричних характеристик об'єктів на відеозображенні.

Для досліджень використовувалися кольорові відеозображення розміром 512×512 дискретних точок, глибиною кольору 24 біти, представлені в стандартній колориметричній системі *RGB*.

Точність відновлення стиснутих відеозображень в залежності від кількості ітерацій алгоритму наведено на рис. 4.7. Точність визначалась за критерієм, побудованим на основі співвідношення сигнал/шум Ψ_{PSNR} .

Точність відновлення відеозображень росте зі збільшенням кількості ітерацій, досягає сталого значення після 6 ітерації і далі не змінюється. На основі цих результатів можна виконати вибір необхідної кількості ітерацій для алгоритму фрактального стиснення і відновлення відеозображень, що містять вимірну інформацію.

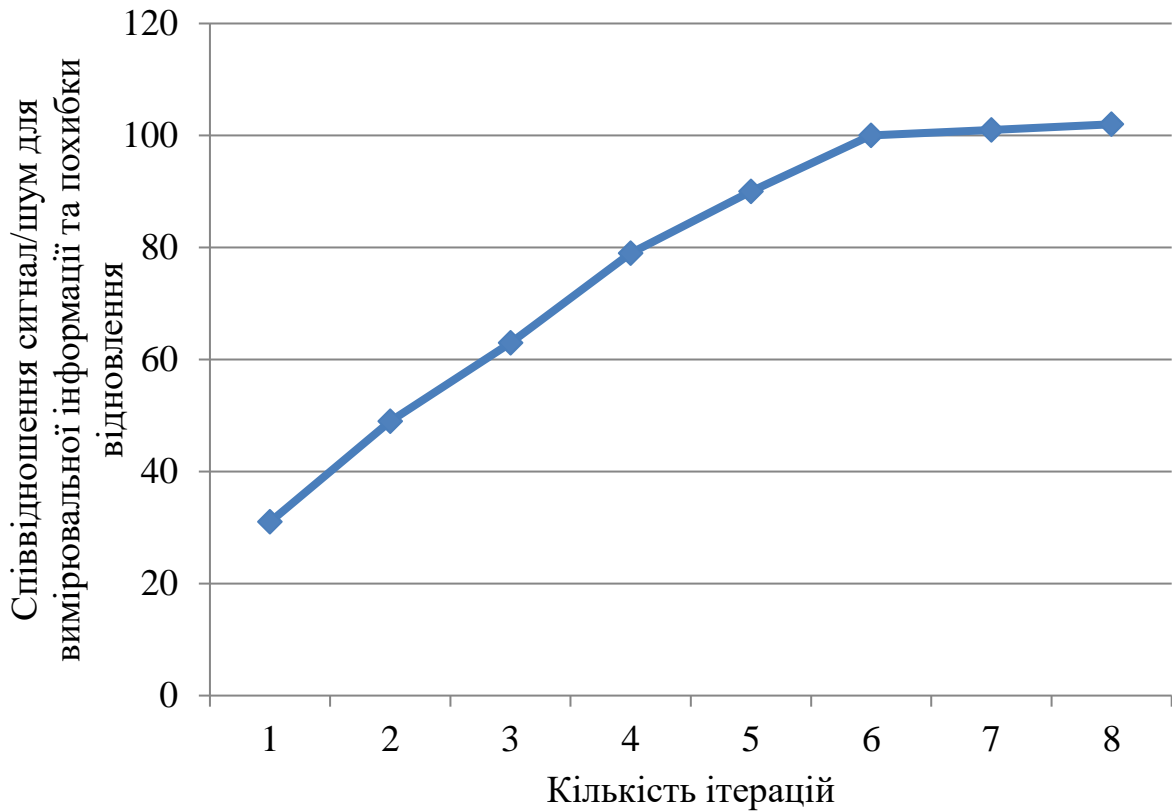


Рис. 4.7. Точність відновлення відеозображень, стиснутих за розробленим алгоритмом

В таблиці 4.2 для відеозображень 5 різних видів екземплярів фітопланктону наведено точність відновлення стиснутих відеозображень за критерієм Ψ_{PSNR} та отриману ступінь стиснення.

Таблиця 4.2

Результати стиснення відеозображень за фрактальним методом та методом JPEG на основі дискретного косинусного перетворення

Вид фітопланктону	Фрактальний метод		Метод JPEG	
	Співвідношення сигнал/шум для похибки відновлення, дБ	Стиснення відеозображення, разів	Співвідношення сигнал/шум для похибки відновлення, дБ	Стиснення відеозображення, разів
1	100,66	56,7	112,7	29,7

2	104,3	58,4	114,8	30,6
3	118,9	63,6	122,6	42,5
4	105,2	59,3	107,7	26,4
5	104,9	58,6	110,3	27,6

В ході цих досліджень формувалися цифрові кольорові відеозображення з такими характеристиками: розмір 2048x1536 д.т., глибина кольору 24 біти на д.т. Безпосередньо для дослідження методів стиснення виділявся фрагмент розміром 256x256 д.т. Для зменшення об'єму використовувався розроблений фрактальний метод та відомий метод [140] на основі дискретного косинусного перетворення.

Основною перевагою розробленого методу є досягнення значно більшої компактності вимірювальної інформації (зменшення об'єму відеозображень в 56..59 разів) при прийнятних показниках точності ГПФ (похибка визначення координат контуру 1,0 мкм) на відміну від існуючих методів, що забезпечують зменшення об'єму в 20...30 разів при подібній точності відновлення.

Відносна похибка ГПФ складає (2...5)% і є прийнятною в процедурах оцінки його ГП та ідентифікації за видовим складом. Тому розроблений фрактальний метод може бути застосовано у вимірювальній системі для довготривалого компактного зберігання відеозображень еталонних екземплярів фітопланктону і результатів контролю екологічного стану водойм господарсько-побутового призначення.

Результати досліджень свідчать про можливість використання фрактальних моделей двовимірних сигналів в алгоритмах стиснення відеозображень, що містять вимірювальну інформацію. Розроблений алгоритм фрактального стиснення забезпечує ступінь стиснення відеозображень приблизно в 2 рази кращу, ніж метод стиснення JPEG за умови приблизно однакової точності відновлення відеозображень.

Отримані результати можуть бути застосовані при розробці автоматизованих систем контролю і управління, які використовують алгоритмічні методи обробки відеозображень і вимірювальної інформації.

4.3. Визначення фрактальної розмірності цифрових відеозображень проб води з фітопланктоном

Фрактальні властивості екземплярів фітопланктону, що містяться на відеозображенні можуть бути оцінені за допомогою їх фрактальної розмірності D . Фрактальна розмірність (розмірність Хаусдорфа-Безиковича) суттєво відрізняється від топологічної розмірності D_T і для об'єктів, що мають фрактальні властивості, є дробною величиною [144, 145]. Визначення фрактальної розмірності включає поняття міри M_d , що характеризує відстань між точками деякої множини точок Ω та взаємне розташування цих точок в просторі. В даному випадку d – це розмірність міри M_d , що при виконанні

певних умов дорівнює фрактальній розмірності D об'єкта, який досліджується і який складається з множини точок Ω . Ці умови визначаються з рівняння:

$$M_d = \gamma(d)N(\delta)\delta^d \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & \text{при } d > D, \\ \infty & \text{при } d < D, \end{cases} \quad (4.1)$$

де γ – коефіцієнт, що враховує геометричну форму просторової фігури, за допомогою якої покривається множина точок Ω (для квадратів і кубів $\gamma = 1$), N – кількість квадратів або кубів, які повністю покривають множину Ω , δ – довжина ребра цих квадратів або кубів.

Для розробки обчислювальних алгоритмів фрактальної розмірності використовують той факт, що при $\delta \rightarrow 0$ з формули (4.1) випливає залежність:

$$N(\delta) \sim \frac{1}{\delta^D},$$

або в логарифмічній формі

$$\lg(N(\delta)) = aD \lg(\delta), \quad (4.2)$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Відповідно до формули (4.2) будують графік залежності $\lg(N(\delta))$ від $\lg(\delta)$ і по ньому визначають фрактальну розмірність D .

Для відеозображень, що містять вимірювальну інформацію фрактальна розмірність може визначена за двома варіантами:

– фрактальна розмірність функції яскравості точок відеозображення, що розташована в тривимірному просторі (дві координати x і y – це координати в площині відеозображення, третя координата B – яскравість) і має значення в інтервалі $2 \leq D \leq 3$;

– фрактальна розмірність контурів структурних елементів відеозображення, що розташовані в площині відеозображення, в даному випадку $1 \leq D \leq 2$.

Розглянемо приклад визначення фрактальної розмірності відеозображення, що містить вимірювальну інформацію про ГПФ.

Для таких відеозображень були побудовані графіки залежностей $\lg(N(\delta))$ від $\lg(\delta)$ (точки і крива на рис. 4.8) і по них визначалась фрактальна розмірність D функції яскравості шляхом лінійної апроксимації за методом найменших квадратів (прямі лінія на рис. 4.8). Також розглядався варіант обчислення фрактальної розмірності функції яскравості при меншому розмірі в дискретних точках цифрового відеозображення (рис. 4.9) та варіант обчислення фрактальної розмірності контурів екземплярів фітопланктону на цифровому відеозображенні (рис. 4.10).

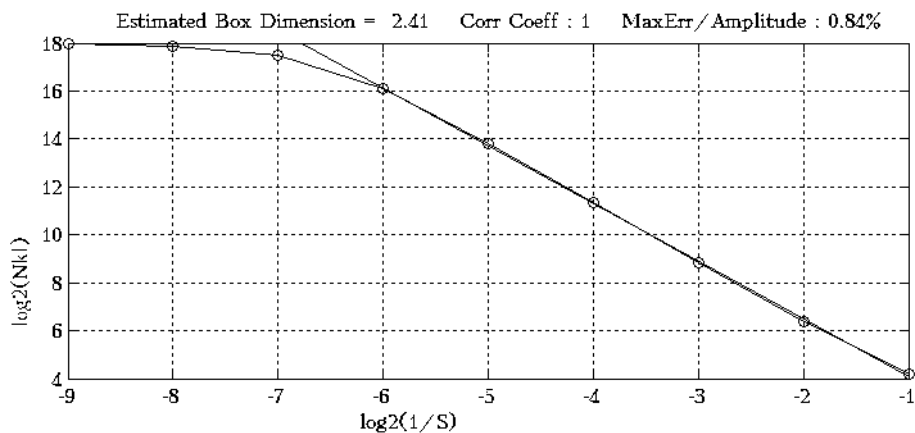
Аналіз цих результатів дозволяє відзначити певні особливості обчислення фрактальної розмірності і застосування фрактальних методів обробки і стиснення до цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про механічні величини.

На фрактальні властивості об'єктів впливає дискретний характер відеозображення, так як теоретично розмір блоку, що аналізується, наближається до нуля, а реально він не може бути меншим, ніж одна дискретна точка. Зменшувати розмір квадратів або кубів, які покривають множину Ω , до нуля можна для безперервного зображення, а для цифрового відеозображення мінімальний розмір квадратів або кубів – це є розмір дискретної точки відеозображення.

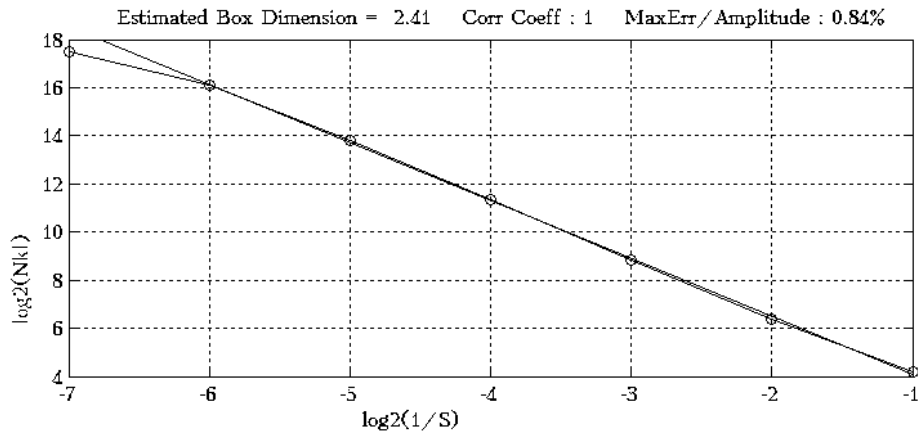
Також слід враховувати вплив низькочастотної фільтрації (інтегруючих властивостей) вимірювального каналу, неідеальність апаратних засобів формування цифрових відеозображень, наявність шумів і інших викривлень вимірювальної інформації. Тому при визначенні фрактальної розмірності відеозображення необхідно обмежити мінімальний розмір квадратів або кубів, які покривають множину Ω .

Також потрібно враховувати мінімальний розмір структурних елементів, що наявні на відеозображенні, та мають фрактальні властивості. Цей розмір є порогом прояву фрактальних властивостей, які можна спостерігати на відеозображенні. Зменшення розміру квадратів або кубів, які покривають множину Ω , далі за цей поріг не має сенсу.

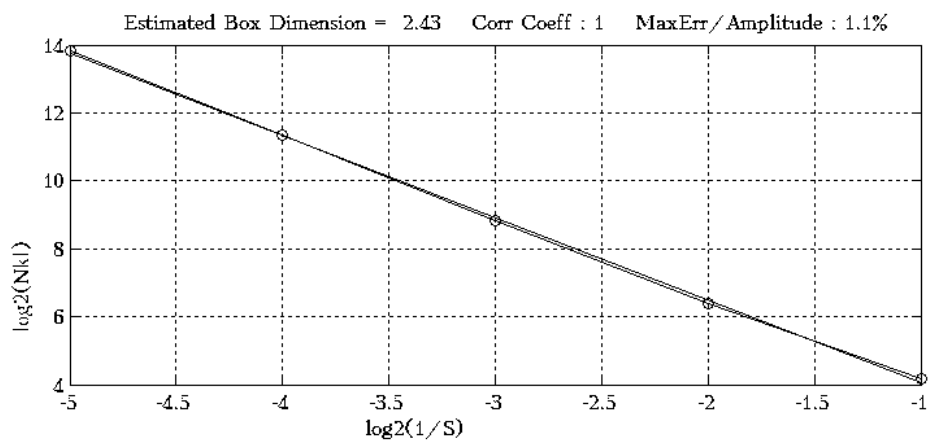
Вплив всіх наведених вище факторів приводить до того, що графік залежності $\lg(N(\delta))$ від $\lg(\delta)$ при малому розмірі блоків, що аналізуються, не відповідає фрактальній теорії (немає постійного нахилу графіка). Це і є вплив дискретності на фрактальні властивості цифрового відеозображення. Для правильного обчислення фрактальної розмірності цифрового відеозображення цю ділянку графіка потрібно виключити з розгляду. Тому мінімальний розмір рангового блока квадродерева не повинен бути меншим мінімального розміру екземпляру фітопланктону, що має фрактальні властивості, за умови правильного вибору розподільчої здатності відеозображення.



a)



б)



в)

Рис. 4.8. Розрахунок фрактальної розмірності функції яскравості (розмір цифрового відеозображення 512×512 дискретних точок, мінімальний розмір блоку, що аналізується, 1×1 дискретних точок (а), 4×4 дискретних точок (б), 16×16 дискретних точок (в))

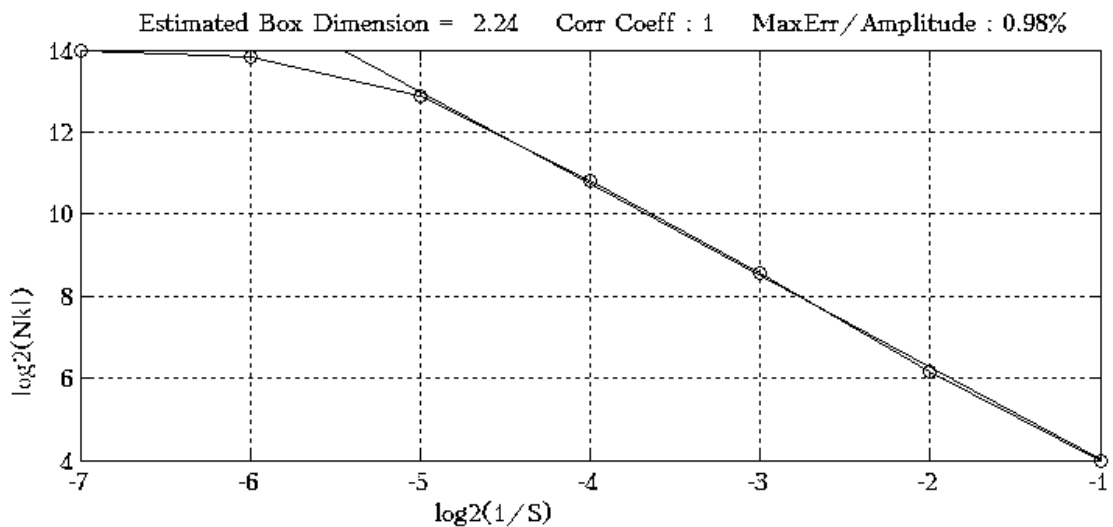


Рис. 4.9. Розрахунок фрактальної розмірності функції яскравості (розмір цифрового відеозображення 128×128 дискретних точок, мінімальний розмір блоку, що аналізується, 1×1 дискретних точок)

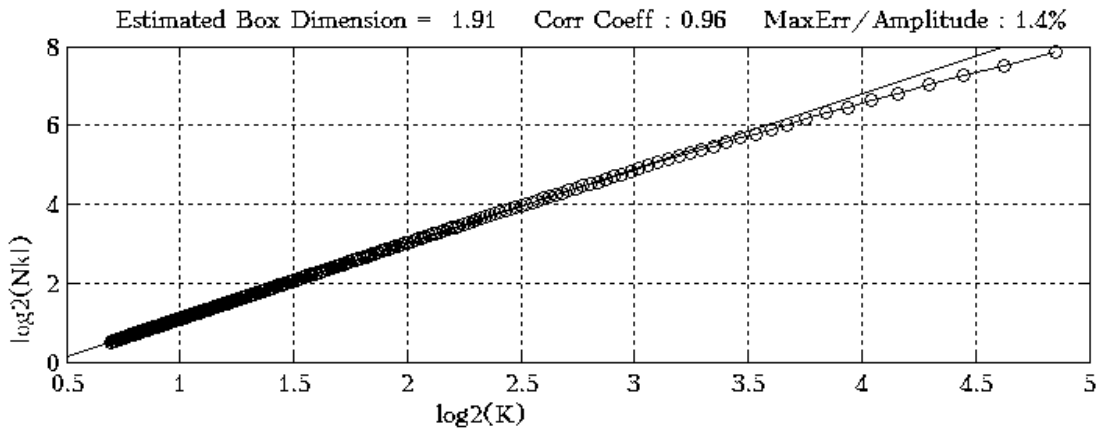


Рис. 4.10. Розрахунок фрактальної розмірності контурів структурних елементів цифрового відеозображення (розмір 512×512 дискретних точок)

4.4. Висновки до розділу 4

1. Цифрова обробка відеозображень проб води дозволяє визначати кількість і вимірювати ГПФ. На основі цих результатів можна проводити ідентифікацію водоростей за видовим складом та визначити показники, що характеризують стан екосистеми водойм. Результати прогнозу розвитку фітопланктону у водосховищах на основі математичних моделей мають практичне значення та практичне застосування. Вони можуть бути використані співробітниками водоканалу при проведенні деєвтрофікаційних заходів у водосховищах та інших водоймах господарсько-побутового призначення, а також при детоксикації води.

2. Фітопланктон водосховища «Дениші» та водозабору «Відсічне» представлений діатомовими, зеленими, синьо-зеленими, евгленофітовими, золотистими та динофітовими водоростями. В обох водоймах загалом серед них переважали синьо-зелені (56%), діатомові (26%) та зелені (16%) водорості. Протягом року відбуваються певні зміни в інтенсивності розмноження окремих фітопланктонних форм, які характеризуються активним розвитком діатомових у весняні та осінні місяці (квітень-червень і жовтень-грудень), синьо-зелених – влітку та восени (кінець липня-початок листопада) і зелених – з квітня до початку грудня.

3. Розроблено фрактальний метод моделювання цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ. Основною

перевагою розробленого методу є досягнення значно більшої компактності вимірювальної інформації (зменшення об'єму відеозображень в 56..59 разів) при прийнятних показниках точності ГП (похибка визначення координат контуру 1,0 мкм) на відміну від існуючих методів, що забезпечують зменшення об'єму в 20...30 разів при тій же точності відновлення. Відносна похибка ГП екземплярів фітопланктону складає (2...5)% і є прийнятною в процедурах оцінки його властивостей. Обчислено фрактальну розмірність цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про ГПФ. Встановлено на прикладі відеозображень конкретних відеозображень, що фрактальна розмірність відображає просторову форму та інші ГПФ, що вимірюються за допомогою цифрових відеозображень.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ

Вимірювання ГПФ у водоймах ґрунтоване на використанні нових складних методів і засобів обробки вимірювальної відеоінформації, що були розроблені та запропоновані до використання в розділах 2 і 3 даної роботи. Для перевірки працездатності цих методів і засобів необхідно виконати експериментальні дослідження шляхом вимірювань геометричних параметрів, ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону у пробах води, взятих з водойм господарсько-побутового призначення.

В даному розділі вирішено такі задачі:

- розроблено алгоритм формування та обробки вимірювальної відеоінформації про ГПФ для експериментальних досліджень;
- досліджено точнісні та часові характеристики роботи автоматизованої системи для вимірювань ГПФ у водоймах;
- підтверджено ефективність заходів по зменшенню похибок вимірювань, ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону за рахунок використання алгоритмічної обробки відеозображень та штучних нейронних мереж;
- вперше шляхом обробки вимірювальної відеоінформації виявлено ряд особливостей розвитку геометричних параметрів і маси фітопланктону, що мають вплив на стан водойм господарсько-побутового призначення;
- виконано статистичне моделювання та встановлено закономірності зміни геометричних параметрів і маси фітопланктону на основі вимірювальної інформації, отриманої в ході експериментальних досліджень та практичного використання автоматизованої системи для вимірювань ГПФ;
- на основі отриманих результатів вимірювань розроблено практичні заходи щодо контролю за процесами розвитку фітопланктону та їх впливом на якість питної води для основних джерел водопостачання м. Житомира.

5.1. Послідовність накопичення та обробки вимірювальної відеоінформації про геометричні параметри фітопланктону

На основі проведених досліджень методів і засобів вимірювань розроблена послідовність операцій та алгоритм збору і обробки відеоінформації про ГПФ (див. додаток Г), яку використано при експериментальних дослідженнях. Ця послідовність включає такі операції:

1. Відбирають та готують препарати з проб води, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ. Розташовують ці препарати на предметному склі мікроскопа з вбудованою відеокамерою.

2. Відеозображення фітопланктону за допомогою відеокамери, приєднаної до оптичної системи мікроскопа формується та вводиться в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ.

3. Шляхом цифрової обробки відеозображень, в тому числі за допомогою ШНМ виявляється кожен екземпляр фітопланктону.

4. Виконується алгоритмічна обробка відеозображення в цифровій ЕОМ за допомогою ШНМ.

5. Розраховуються для кожного екземпляра фітопланктону геометричні параметри, інваріантні до масштабування, зсуву та повороту цього екземпляра в площині відеозображення.

6. Виконується ідентифікація кожного екземпляра фітопланктону за його видовим складом на основі ШНМ.

7. Розраховується маса та кількість фітопланктону кожного виду у перерахунку на 1 дм³.

8. Результати обробки відеоінформації представляються у вигляді таблиць і графіків, які разом із відеозображеннями утворюють базу експериментальних даних із результатами проведених досліджень.

Для того, щоб виміряти ГПФ, необхідно спочатку отримати цифрове кольорове відеозображення цього фітопланктону. Тому розглянемо процес формування та обробки відеозображень фітопланктону.

Для досліджень використовувалися декілька екземплярів фітопланктону, розташованих на предметному склі мікроскопа. Відеозображення формувалися за допомогою лабораторного мікроскопа МС 200Т (виробництво Micros, Австрія) з вбудованою цифровою кольоровою відеокамерою САМ 2800 (див. розділ 3). Основні технічні характеристики цього обладнання:

- збільшення мікроскопу: 40^x ... 1000^x;
- розмір зображення відеокамери: 640x480 дискретних точок;
- частота формування відеозображень: 12 кадрів за секунду;
- розрізняюча здатність: 360 телевізійних ліній по горизонталі;
- інтерфейс для зв'язку з ЕОМ: USB.

В результаті були отримані відеозображення фітопланктону (рис. 5.1). Як бачимо, дане обладнання забезпечує достатнє збільшення і розрізняючу здатність для дослідження фітопланктону на основі інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію.

Обробка відеозображень включає фільтрацію шумів та відновлення на початковому кольоровому відеозображенні викривлень, що виникли у вимірювальному каналі системи; перетворення кольорового відеозображення у відеозображення в градаціях яскравості з врахуванням особливостей кольору водоростей і кольору фону; сегментацію по пороговому значенню яскравості; видалення шумів і виключення неоднорідностей об'єктів; видалення об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; заповнення порожнин в об'єктах,

що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення. Сегментацію можливо виконати на основі застосування ШНМ (при наявності нейропроцесора в складі ЕОМ). Тому в даному випадку для сегментації використовується безпосередньо кольорове відеозображення після фільтрації шумів та відновлення викривлень. Вибір об'єктів можна проводити як в автоматичному, так і в ручному режимі, коли оператор безпосередньо на екрані монітора вказує опорні точки об'єктів на відеозображенні.

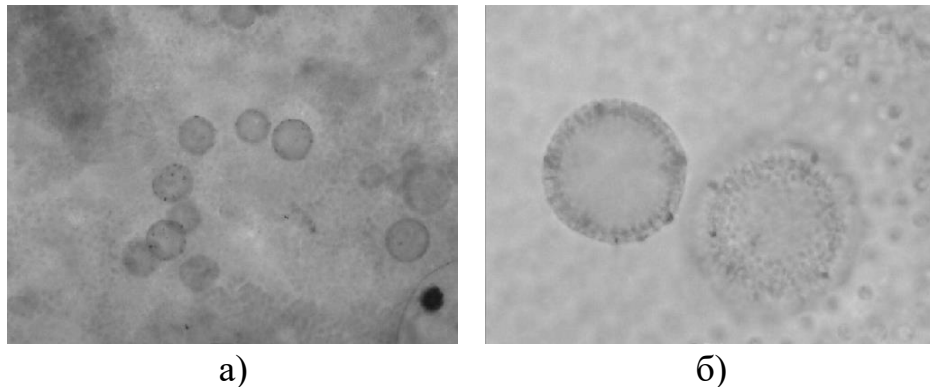


Рис. 5.1. Відеозображення фітопланктону на прикладі водоростей *Volvox globator*: а) збільшення 100^x; б) збільшення 400^x

Розглянемо приклад обробки відеозображень фітопланктону на основі запропонованого алгоритму (додаток Б і В, рис. 5.2). Після фільтрації шумів та відновлення викривлень на початковому кольоровому відеозображенні було виконано його сегментацію на об'єкти вимірювань (екземпляри фітопланктону) і фон за допомогою ШНМ. Після цього було видалено завади, що залишилися на відеозображенні та об'єкти, що розташовані на межі відеозображення. Далі були заповнені порожнини в об'єктах, що виникли в результаті дії шумів на початкове відеозображення.

На рис. 5.3 та 5.4 наведено результати, що отримані в ході експериментальних досліджень операцій по вимірюванню ГПФ. Ці операції виконано шляхом перетворення кольорового відеозображення фітопланктону в напівтонове відеозображення з наступною сегментацією за порогом яскравості.

Для сегментації за порогом яскравості необхідно визначити значення цього порогу шляхом аналізу гістограм яскравостей дискретних точок (пікселів) відеозображення, що містить вимірювальну інформацію про ГПФ. При цьому на екрані ЕОМ відображаються такі результати (рис. 5.3):

- напівтонове відеозображення екземплярів фітопланктону;
- побудова гістограми яскравостей дискретних точок відеозображення та виведення її на екран;
- побудова гістограми в логарифмічному масштабі і виведення її на екран.

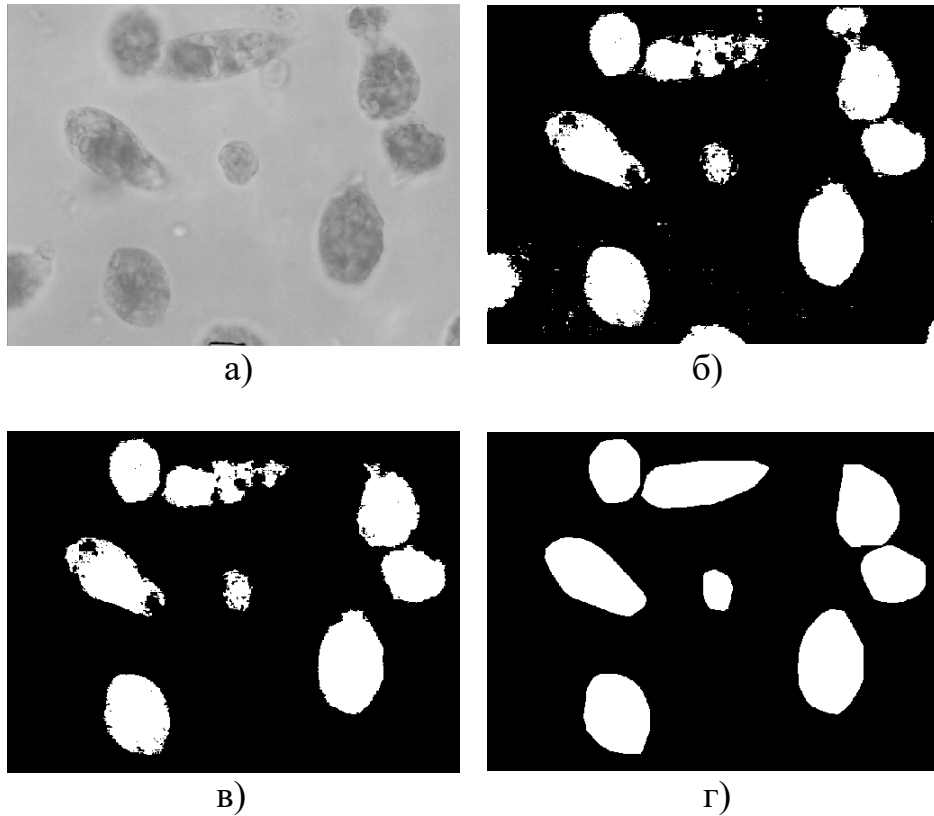
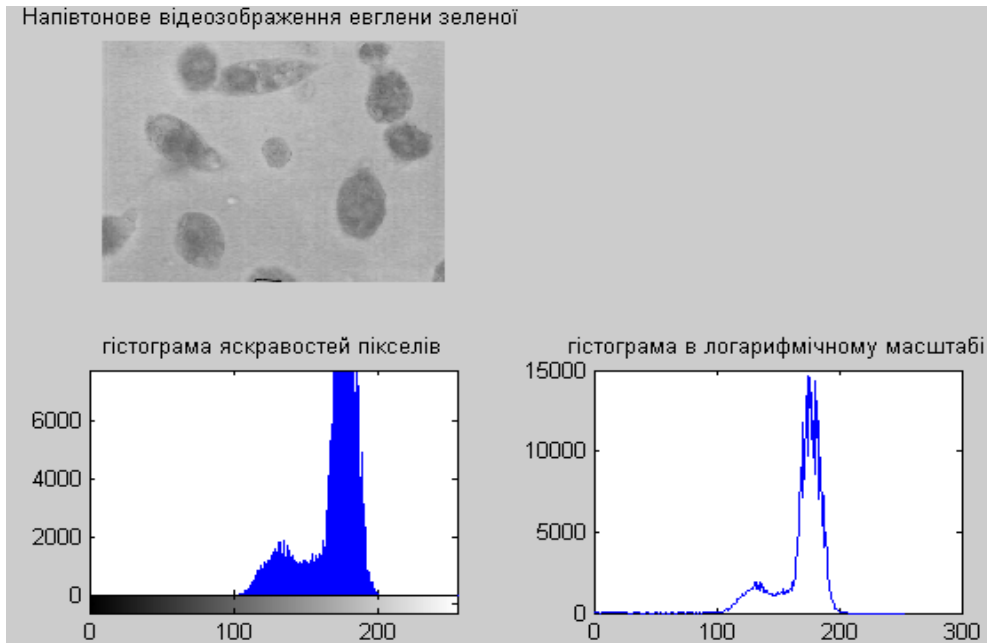


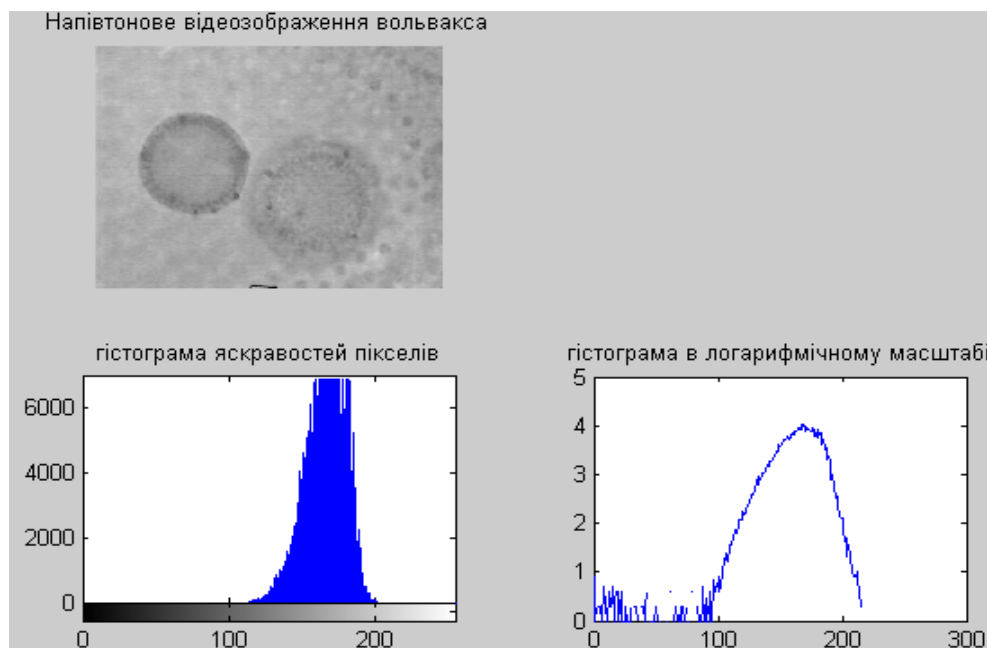
Рис. 5.2. Обробка відеозображень фітопланктону на прикладі водоростей *Euglena proxima*: а) початкове кольорове відеозображення (збільшення 400^x); б) результат сегментації на об'єкти вимірювань і фон; в) результат видалення завад та об'єктів, що розташовані на межі відеозображення; г) результат заповнення порожнин в об'єктах

При виконанні програми сегментації відеозображень фітопланктону за порогом яскравості на екрані ЕОМ відображаються такі результати (рис. 5.4):

- завантаження початкового кольорового відеозображення;
- перетворення кольорового відеозображення в напівтонове шляхом виділення синьої компоненти згідно кольорової схеми RGB;
- проведення сегментації синьої компоненти за порогом яскравості (за амплітудою цієї компоненти).



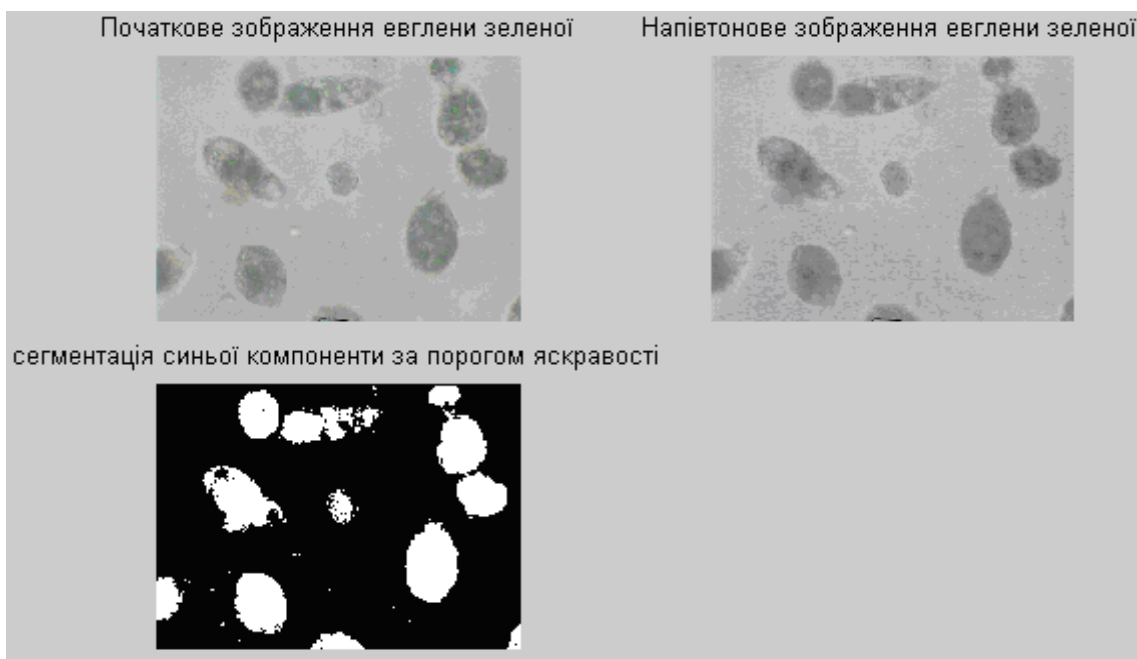
а)



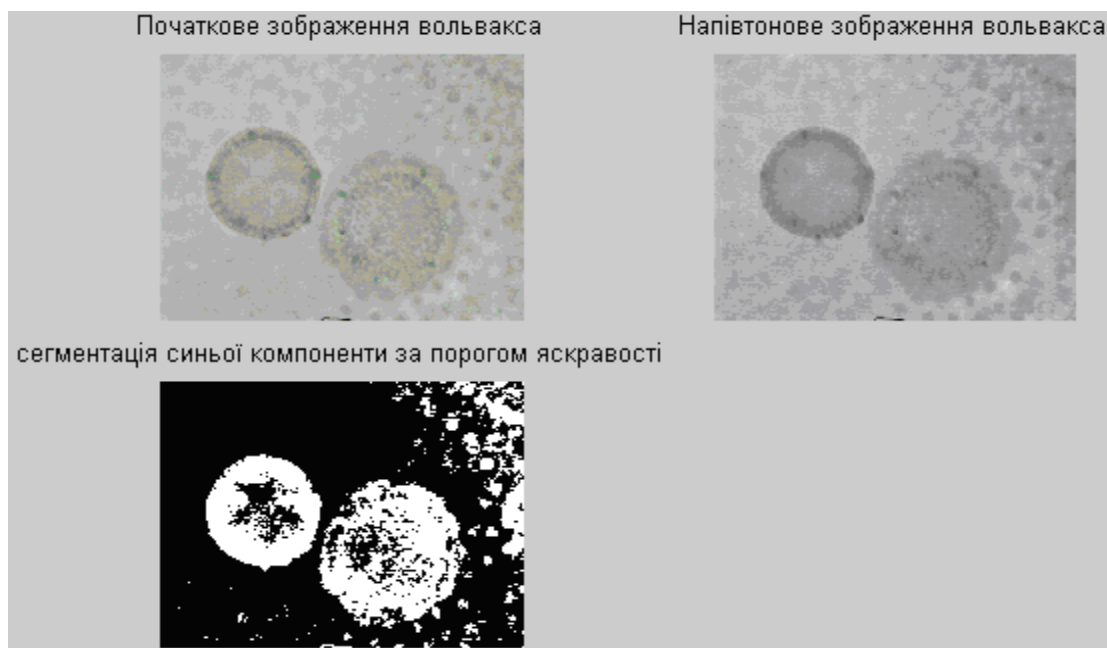
б)

Рис. 5.3. Побудова гістограми яскравостей дискретних точок відеозображення:

- а) відеозображення евглени зеленої (*euglena proxima*),
- б) відеозображення вольвакса (*volvox globator*)



а)



б)

Рис. 5.4. Сегментація кольорових відеозображень фітопланктону за порогом яскравості: а) евглена зелена (*euglena proxima*), б) вольвакса (*volvox globator*)

Порівнюючи результати обробки відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ГПФ, з використанням ШНМ (рис. 5.2) та без їх використання (рис. 5.4), можна зробити висновок, що обробка на основі ШНМ забезпечують більш якісний результат та більш точне визначення ГПФ. Таким чином експериментально підтверджено доцільність та ефективність застосування ШНМ для обробки вимірювальної відеоінформації про ГПФ.

5.2. Експериментальні дослідження похибок вимірювань ГПФ

5.2.1. Методика розрахунку точності вимірювань ГПФ

На основі теоретичних результатів, отриманих в розділах 2 і 3, пропонується методика розрахунку точності вимірювань ГПФ на відеозображеннях, що містять вимірювальну інформацію (рис. 5.5).

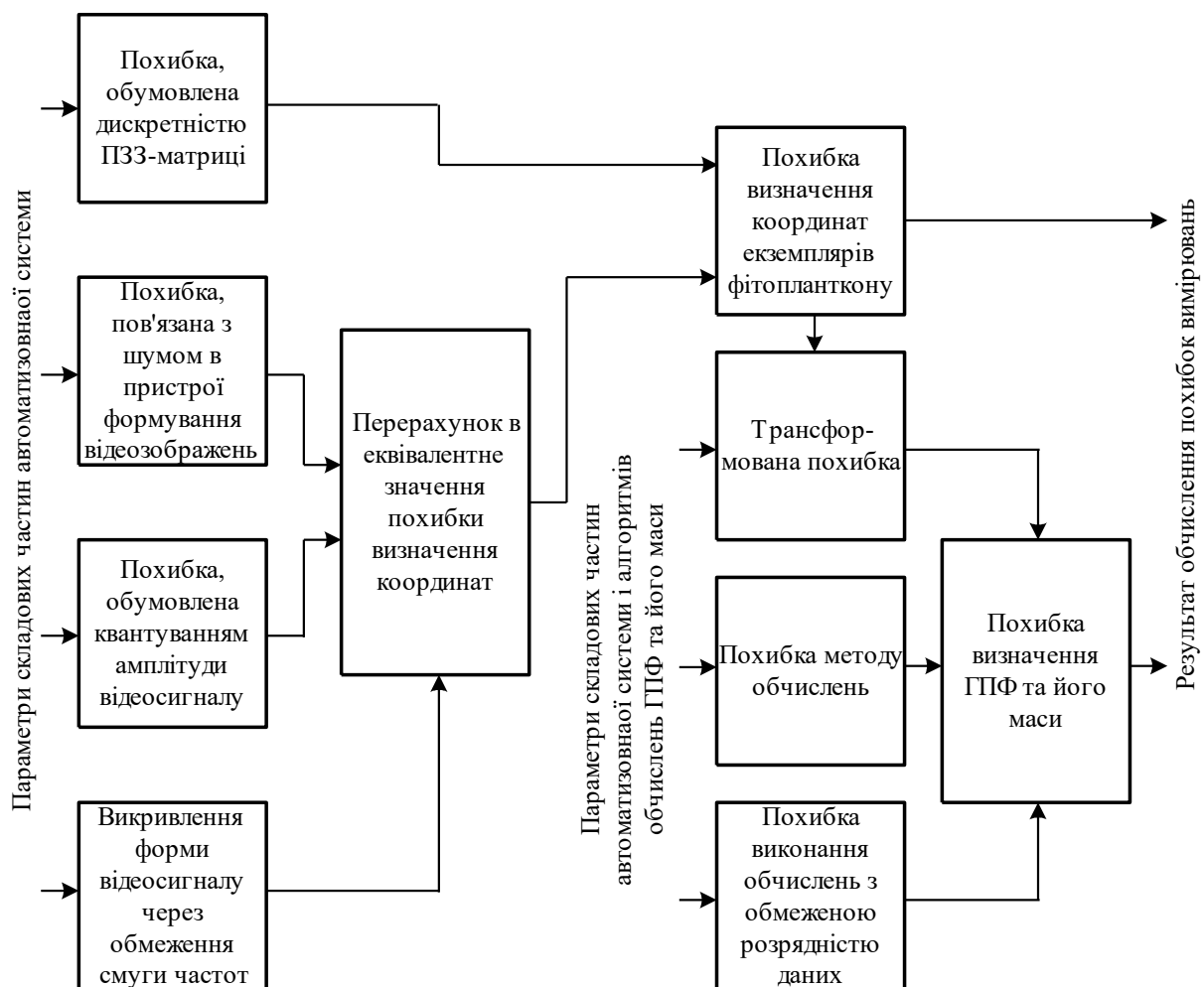


Рис. 5.5. Загальна схема розрахунку похибок вимірювань ГПФ

Основні складові частини загальної похибки визначення координат об'єктів вимірювань (екземплярів фітопланктону) на цифровому відеозображенні:

- похибка, обумовлена дискретною структурою перетворювача “світло-сигнал” (ПЗЗ-матриці) в пристрої формування відеозображень;
- похибка, обумовлена квантуванням по рівню амплітуди відеосигналу при перетворенні відеозображення в цифрову форму;
- похибки, пов’язані з шумом в пристрої формування відеозображень;
- викривлення форми відеосигналу через обмеження його смуги частот в електронних схемах.

Для визначення загальної похибки визначення координат об’єктів вимірювань необхідні такі дані про параметри складових частин автоматизованої системи:

- кількість дискретних елементів по горизонталі і вертикалі (крок дискретності) в перетворювачі “світло-сигнал” цифрової відеокамери та відповідний розмір цифрового відеозображення в дискретних точках;
- поточне збільшення оптичної системи мікроскопу;
- кількість рівнів квантування амплітуди відеосигналу при перетворенні відеозображення в цифрову форму;
- рівень шумів (співвідношення сигнал-шум Ψ) цифрової відеокамери;
- верхня межа смуги частот відеосигналу.

Перерахунок похибки, обумовленої квантуванням амплітуди відеосигналу, і похибки, обумовленої шумом в цифровій відеокамері, в еквівалентне значення похибки визначення координат виконується на основі використання лінійної апроксимації перепадів яскравості на відеозображеннях [68].

Викривлення форми перепадів яскравості, що відповідають контурам об’єктів вимірювань, виникає через обмеження смуги частот відеосигналу в електронних схем цифрової відеокамери та через обмеження, існуючі в оптичній системі.

При алгоритмічній обробці вимірювальної відеоінформації з метою визначення ГПФ та при розрахунку маси фітопланктону мають місце такі похибки:

- похибка результатів обчислень ГПФ, яка є наслідком похибки вимірювань координат об’єктів вимірювань (екземплярів фітопланктону);
- похибка методу обчислень, обумовлена використанням чисельних методів при розрахунках геометричних параметрів та маси фітопланктону;
- похибка виконання обчислень, пов’язана з обмеженою розрядністю цифрових даних в ЕОМ та нейропроцесорі.

Для розрахунку загальної похибки визначення ГПФ та його маси використано такі дані про параметри складових частин автоматизованої системи і алгоритмів обробки вимірювальної інформації:

- загальна похибка вимірювання координат точок об’єктів вимірювань;
- формули і чисельні алгоритми, що використовуються для визначення ГПФ та його маси;

– особливості реалізації обчислювальних операцій, розрядність запам'ятовуючих і арифметичних пристроїв в ЕОМ та нейропроцесорі, які виконують обробку вимірювальної інформації.

Для визначення загальних похибок вимірювань на основі перерахованих складових частин використано такі методи обробки похибок:

– метод максимуму-мінімуму для визначення максимально можливого значення похибки (виконується арифметичне додавання максимально можливих значень складових частин загальної похибки);

– теоретико-ймовірнісний метод для визначення середнього і середньоквадратичного значення загальної похибки (виконується квадратичне додавання значень складових частин загальної похибки).

При дослідженні ГПФ основою є вимірювання координат та лінійних розмірів екземплярів фітопланктону, що наявні на відеозображенні.

Результати теоретичного розрахунку похибок вимірювань ГПФ для обраного складу технічних засобів (див. розділ 3) наведено в табл. 5.1.

Розрахунок похибки визначення координат точок контуру екземплярів фітопланктону виконано за розробленою методикою. Лінійні розміри (довжина та ширина) визначаються на основі координат опорних точок з координатами (x_i, y_i) і (x_j, y_j) , що належать контуру екземпляру фітопланктону і розташовані в одному рядку (стовпці) цифрового відеозображення. Тому лінійний розмір визначається як $l = x_j - x_i$ або $l = y_j - y_i$.

Для лінійних розмірів похибка методу обчислень в даному випадку дорівнює нулю. Так як координати точок є цілі числа, то похибка виконання обчислень в ЕОМ також дорівнює нулю. Імовірнісні характеристики трансформованої похибки для лінійних розмірів визначаються на основі [95]. Систематична складова частина (середнє значення) трансформованої похибки дорівнює нулю, так як систематичні складові частини похибок визначення координат при відніманні взаємно компенсуються. Максимальне значення є сума максимальних значень похибок визначення координат. Середньоквадратичне значення розраховується шляхом квадратичного додавання середньоквадратичних значень похибок визначення координат.

Основними напрямками зменшення похибок вимірювань ГПФ є:

– використання більш досконалих технічних засобів (зменшення похибки, обумовленої дискретною структурою перетворювача “світло-сигнал” та похибки виконання обчислень в ЕОМ);

– алгоритмічна обробка вимірювальної відеоінформації, в тому числі – фільтрація шумів та відновлення відеозображень після проходження через вимірювальний канал;

– використання ШНМ як нового і ефективного засобу обробки вимірювальної інформації про ГПФ.

Таблиця 5.1

Теоретичний розрахунок похибок вимірювань ГПФ

Вид похибки	Систематична складова частина, дискретних точок	Випадкова складова частина:		
		Максимальне значення, дискретних точок	Середньоквадратичне значення, дискретних точок	Закон розподілу
Похибка, обумовлена дискретністю напівпровідникового перетворювача “світло-сигнал”	0	1,000	0,577	рівномірний
Похибка, обумовлена квантуванням амплітуди відеосигналу	0	0,008*	0,005*	рівномірний
Шум на відеозображенні ($\Psi = 55$ дБ)	0	0,022*	0,007*	нормальний
Похибка, що виникає при обробці цифрових даних в прикладній програмі	0,500	0	0	–
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону	0,500	1,030	0,583	наближається до рівномірного
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0,10 мкм	0,42 мкм	0,23 мкм	наближається до рівномірного
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону	0	2,060	0,816	наближається до трикутного
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0	0,83 мкм	0,47 мкм	наближається до трикутного

Примітки: * – результат перерахунку на основі лінійної форми перепаду яскравості. Обчислено, виходячи з того, що для квантування амплітуди відеосигналу використовується 255 дискретних рівнів, а ширина перепадів яскравості в районі контурів фітопланктону дорівнює 4 дискретним точкам відеозображення.

Таким чином, розроблено методику розрахунку точності вимірювань ГПФ та його маси. Ця методика дозволяє визначити точність результатів вимірювань в автоматизованій системі на основі параметрів технічних засобів і параметрів алгоритмів обробки вимірювальної інформації. На основі даної методики також визначається склад технічних засобів автоматизованої системи для вимірювань ГПФ, що забезпечують потрібну точність вимірювань.

Згідно розрахунку, максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктону дорівнює близько ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою CAM-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань лінійних розмірів фітопланктону близько ± 1 мкм.

5.2.2. Експериментальні дослідження похибок вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Експериментальне дослідження похибок вимірювань ГПФ було проведене з метою перевірки вірогідності математичних моделей цих похибок і підтвердження результатів розрахунку точнісних характеристик автоматизованої системи для вимірювань ГПФ.

При експериментальних дослідженнях використовувалися тестові об'єкти, що розміщені у мікроскопі, що містить світлу металеву стрічку на темному фоні. Такі тестові об'єкти мають заздалегідь відомі геометричні розміри та виготовлені з високою точністю, достатньою для експериментальних досліджень та оцінки похибок вимірювань ГПФ.

Як відомо, для вимірювання мікроскопічних об'єктів за допомогою мікроскопу застосовують окуляр-мікрометр з вимірювальною лінійкою. Ціну поділки окуляр-мікрометра визначають за допомогою об'єкта-мікрометра індивідуально для кожного мікроскопу і об'єктиву. Такий об'єкт-мікрометр представляє собою предметне скло з нанесеною на нього лінійкою, ціна поділки якої складає $10 \text{ мкм} \pm 5\%$. Цей предметне скло було використано в якості тестового об'єкту вимірювань.

Іншим тестовим об'єктом вимірювань може бути лічильна камера, що входить до набору додаткового обладнання мікроскопу і призначена для підрахунку клітин та складових елементів різних рідин, а також мікроорганізмів, в тому числі – фітопланктону. Лічильна камера представляє собою пластину з товстого скла з поглибленням $0,1 \text{ мм}$, на дні якого нанесено лічильну сітку. Поглиблення накривають шліфованим покривним склом. постійна висота лічильної камери забезпечується щільним приляганням покривного скла до пластини. Лічильна камера складається з великих та малих квадратів. Лічильна сітка наноситься на скло методом вакуумного напилення, що забезпечує максимальну контрастність зображення та високу точність дотримання геометричних розмірів сітки.

Існують лічильні камери різних типів, що відрізняються кількістю та групуванням великих та малих квадратів. Наприклад, лічильна камера Горяєва має такі технічні характеристики:

- сторона малого квадрату $0,05 \pm 0,001$ мм;
- сторона великого квадрату $0,2 \pm 0,002$ мм;
- розмір лічильної сітки $3,0 \pm 0,005$ мм;
- глибина лічильної камери $0,1 \pm 0,0008$ мм;
- площа лічильної сітки $9,0$ мм²;
- об'єм лічильної камери $0,9$ мм³.

Тестові відеозображення було отримано за допомогою вказаних тестових об'єктів вимірювань, що розташовані в полі зору цифрової відеокамери мікроскопа з відхиленням сторін лічильної сітки від вертикалі на $30 \dots 45^\circ$. Такий нахил дозволяє отримати для різних рядків відеозображення різні варіанти взаємного розташування краю об'єкта вимірювань і центрів дискретних точок відеозображення. Це, в свою чергу, дозволяє отримати похибки, обумовлені дискретністю, з всього можливого діагнозу їх значень. Таким чином, підвищується достовірність результатів експериментальних досліджень.

Порівнюючи результати теоретичного розрахунку похибок вимірювань ГПФ та характеристики тестових об'єктів вимірювань, можна зробити висновок, що точність тестового відеозображення відповідає вимогам проведення експерименту.

Для експериментальних досліджень використовувалися такі технічні засоби та методики обробки вимірювальної інформації, розроблені в розділі 3 для автоматизованої системи. Поточне збільшення мікроскопу MICROS MC-200 складало $400\times$, розмір цифрового відеозображення у відеокамері CAM-2800 – 640×480 дискретних точок.

На цих відеозображеннях вимірювалися координати точок контуру тестових об'єктів вимірювань і їх лінійні розміри. Далі виконувалася статистична обробка результатів вимірювань для послідовності відеозображень одного тестового об'єкту тривалістю 100 кадрів. На основі результатів статистичної обробки визначалися характеристики випадкової складової частини похибки вимірювань ГПФ. Для статистичної обробки використовувалися теоретичні положення, наведені в [49].

Спочатку виконувалася статистична обробка результатів вимірювання координат точок контуру тестових об'єктів. На основі всієї послідовності відеозображень для кожного рядка відеозображення розраховувалися математичне очікування і дисперсія:

$$M(x^*_{km}) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L x^*_{knm},$$

$$D(x^*_{km}) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L (x^*_{km} - E(x^*_{km}))^2,$$

де x^*_{km} – результат вимірювання горизонтальної координати контуру в m -му рядку n -го зображення;

L – кількість відеозображень у послідовності,

n – номер зображення у послідовності ($n = 1, 2, \dots, L$);

m – номер рядка зображення ($m = 0, 1, \dots, V-1$).

Далі виконувалося обчислення середніх значень дисперсії для сукупності всіх можливих значень координат, тобто для всіх рядків зображення:

$$D(x^*_k) = \frac{1}{V} \sum_{m=0}^{V-1} D(x^*_{km}), \quad \sigma(x^*_k) = \sqrt{D(x^*_k)}.$$

Середньоквадратичне відхилення $\sigma(x^*_k)$ результатів вимірювання координат точок контуру – це і є в даному випадку середньоквадратичне значення випадкової складової частини похибки вимірювання координат.

Середнє значення математичного очікування для всіх рядків не розраховувалося, так як воно не має сенсу, тому що тестовий об'єкт розташований з нахилом $30 \dots 45^\circ$ і його горизонтальна координата змінюється від рядка до рядка.

Потім виконувалося статистична обробка результатів вимірювання лінійних розмірів тестових об'єктів. На відміну від горизонтальної координати ширина тестових об'єктів повинна мати постійне значення для всіх рядків відеозображення. Тому для відстані по горизонталі параметри абсолютної похибки визначилися таким чином:

$$M(d^*) = \frac{1}{L \cdot V} \sum_{m=0}^{V-1} \sum_{n=1}^L d^*_{nm},$$

$$D(d^*) = \frac{1}{L \cdot V} \sum_{m=0}^{V-1} \sum_{n=1}^L (d^*_{nm} - E(d^*))^2,$$

$$\sigma(d^*) = \sqrt{D(d^*)},$$

де d^*_{nm} – значення відстані по горизонталі в m -му рядку n -го відеозображення (за результатами вимірювань).

Середньоквадратичне відхилення $\sigma(d^*)$ результатів вимірювання лінійних розмірів – це і є даному випадку середньоквадратичне значення випадкової складової частини похибки вимірювання лінійних розмірів. Систематична складова частина похибки дорівнює нулю, так як ці розміри визначаються як різниця координат двох контурних точок об'єкту вимірювань і систематичні складові частини похибок визначення координат цих точок взаємно компенсуються.

Для оцінки закону розподілу похибки вимірювань координат і лінійних розмірів розраховувалися коефіцієнт асиметрії β_1 і коефіцієнт ексцесу β_2 :

$$\beta_1 = \frac{\mu'_3}{(\sigma_{ГПФ})^3}, \quad \beta_2 = \frac{\mu'_4}{(\sigma_{ГПФ})^4},$$

де μ'_3, μ'_4 – третій і четвертий центральні моменти похибки вимірювань ГПФ;

$\sigma_{ГПФ}$ – середньоквадратичне значення цієї похибки.

Співвідношення значень цих коефіцієнтів за довідниками з теорії ймовірностей та математичної статистики дозволяє визначити тип закону розподілу випадкової величини.

Імовірнісні характеристики похибок вимірювань ГПФ, отримані на основі експериментальних досліджень, і їх порівняння з результатами теоретичного розрахунку (див. табл. 5.1) наведено на рис. 5.6, 5.7 і в табл. 5.2.

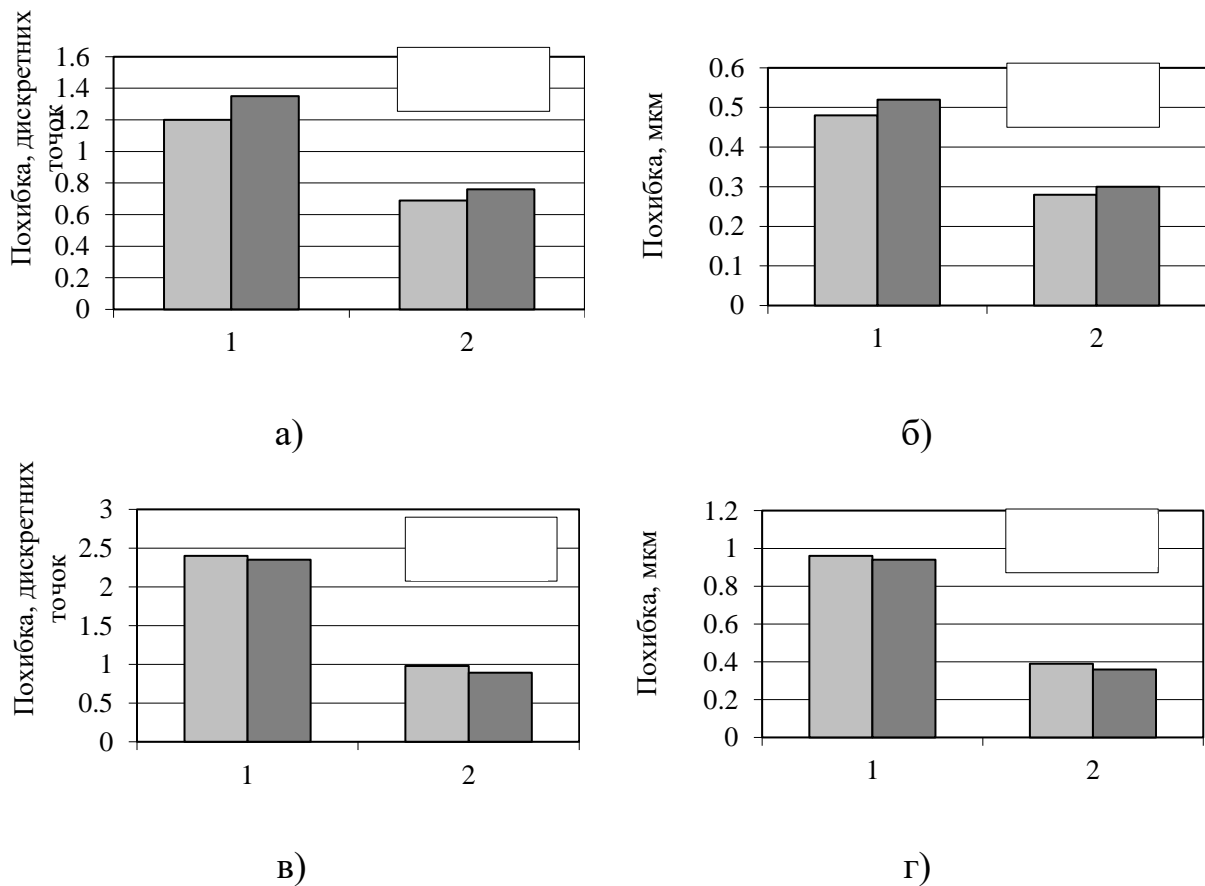


Рис. 5.7. Випадкова складова частина похибки вимірювань ГПФ (відеозображення фітопланктону, отримані за допомогою цифрової відеокамери та сегментації за порогом яскравості):

а), б) координати точок контуру; в), г) лінійні розміри; по горизонталі; 1 – максимальне значення похибки, 2 – середньоквадратичне значення;

□ – теорія; ■ – експеримент

Результатами експериментальних досліджень підтверджено вірогідність розроблених математичних моделей і методики розрахунку похибок вимірювань ГПФ. Розбіжність результатів розрахунку за розробленою методикою і результатів експериментальних досліджень складає 12 % для максимального значення і 20 % для середньоквадратичного значення похибки.

В більшості цифрових відеокамер використовується стиснення цифрових відеозображень, що формуються відеокамерою. Це забезпечує більш раціональне використання об'єму запам'ятовуючих пристроїв та підвищення швидкості введення таких відеозображень в ЕОМ. Оскільки методи стиснення, що використовуються для цього, приводять до втрати частини цифрових даних відеозображення, постає питання про вплив стиснення на точність вимірювань ГПФ.

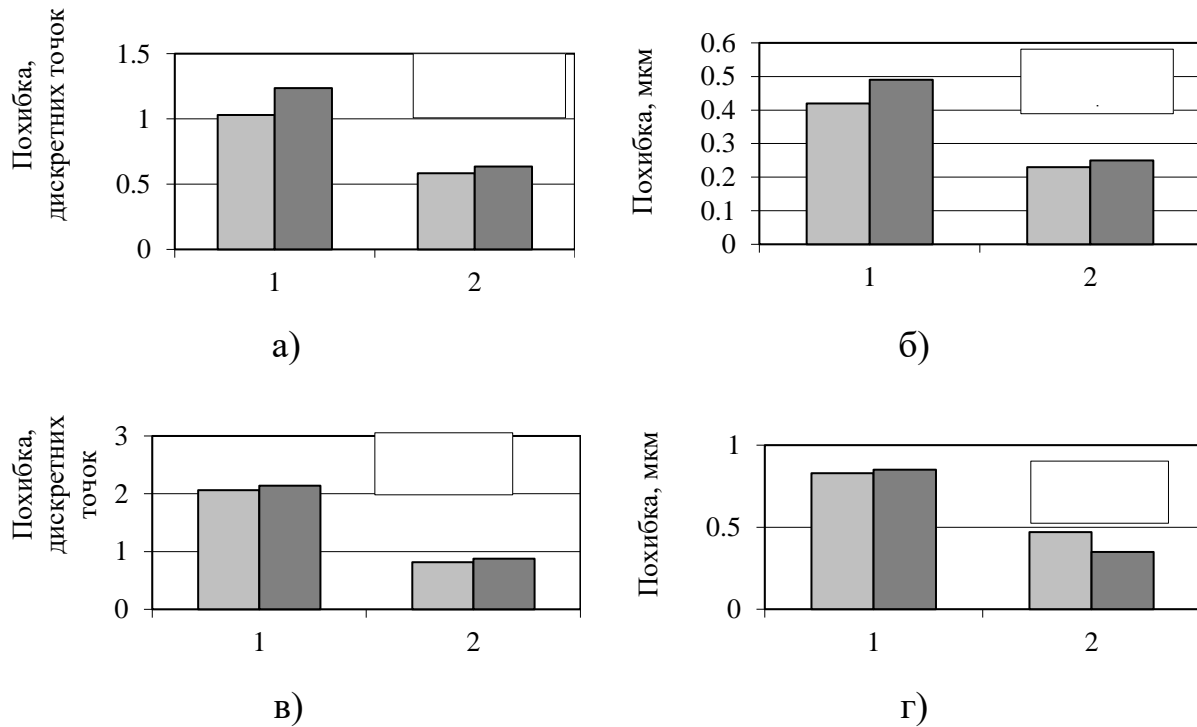
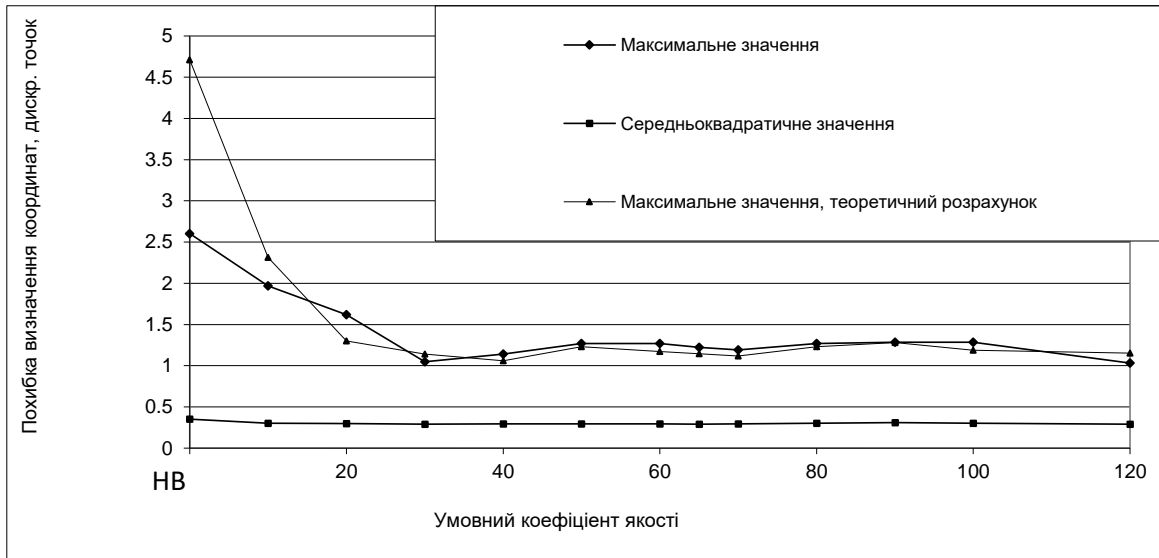


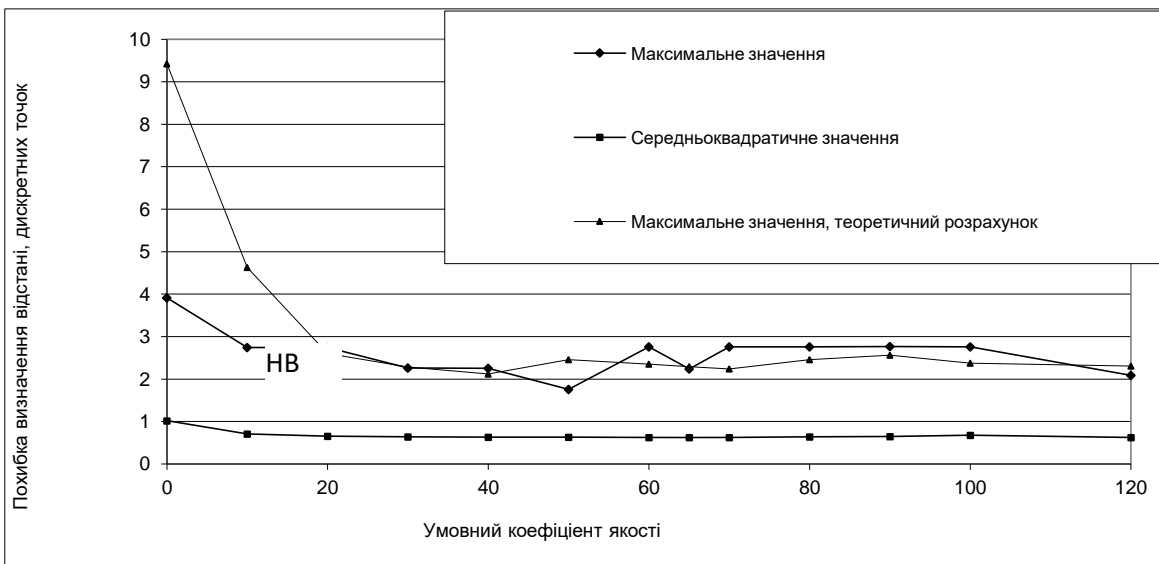
Рис. 5.8. Випадкова складова частина похибки вимірювань ГПФ (кольорові відеозображення фітопланктону, отримані за допомогою цифрової відеокамери та сегментації на основі ШНМ):

а), б) координати точок контуру; в), г) лінійні розміри; по горизонталі 1 – максимальне значення похибки, 2 – середньоквадратичне значення
 – теорія; – експеримент

Для підвищення швидкодії автоматизованої системи для вимірювань ГПФ також доцільним є стиснення відеозображень в цифровій відеокамері. Таке стиснення базується на дискретному косинусному перетворенні. Цифрові відеозображення та їх послідовності зберігаються в стиснутих форматах JPEG та MJPEG. Результати експериментальних досліджень впливу стиснення на точність вимірювань ГПФ наведено на рис. 5.9.



а) похибка визначення координат



б) похибка визначення лінійних розмірів

Рис. 5.9. Результати експериментального дослідження похибок вимірювань ГПФ: по горизонталі – умовний коефіцієнт якості стиснутого відеозображення у відсотках; НВ – нестиснуте відеозображення

Отримані результати свідчать про можливість та доцільність використання стиснутого формату відеозображень в цифровій відеокамері. Але при цьому спостерігається незначне збільшення похибки в допустимих межах відносно результатів, наведених на рис. 5.7 та 5.8 (при стисненні в 25...30 разів).

5.2.3. Оцінка та аналіз точнісних характеристик автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Аналізуючи результати експериментальних досліджень похибок вимірювань ГПФ, можна зробити такі висновки:

1. Результатами експериментальних досліджень підтверджено вірогідність розроблених математичних моделей і методики розрахунку похибок вимірювань ГПФ. Розбіжність результатів розрахунку за розробленою методикою і результатів експериментальних досліджень складає 12 % для максимального значення і 20 % для середньоквадратичного значення похибки.

2. Максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктону дорівнює ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою САМ-2800 і збільшенні $400\times$ забезпечено точність вимірювань ГПФ $\pm 1,0$ мкм.

3. Для вимірювань краще використовувати алгоритмічну обробку відеозображень за допомогою ШНМ, в тому числі сегментацію цифрових кольорових відеозображень на основі ШНМ. В цьому випадку забезпечується більш точне виділення екземплярів фітопланктону на відеозображенні і зменшується похибка вимірювань ГПФ на 15...20% у порівнянні з іншими методами алгоритмічної обробки.

4. Цифровий фотоапарат або цифрова відеокамера забезпечують якість відеозображень фітопланктону, цілком достатню для вимірювань ГПФ та його маси. Отримані результати свідчать про можливість та доцільність використання стиснутого формату відеозображень в цифровій відеокамері (при стисненні в 25...30 разів).

5. Значення похибок, отриманих в результаті теоретичного розрахунку, можна використовувати для оцінювання точності вимірювань ГПФ і для визначення вимог до технічних засобів вимірювань з метою забезпечення потрібної точності вимірювань.

Таблиця 5.2

Порівняння результатів теоретичного розрахунку і експериментальних досліджень похибок вимірювань ГПФ

Вид вимірювань	Імовірнісні характеристики випадкової складової частини похибки					
	Максимальне значення M , дискретних точок	Середньоквадратичне значення σ , дискретних точок	M/σ	Коефіцієнт асиметрії β_1	Коефіцієнт ексцесу β_2	Закон розподілу
Цифрова відеокамера (теоретичний розрахунок)						
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону	1,030	0,583	—	—	—	наближається до рівномірного
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0,42 мкм	0,23 мкм	—	—	—	наближається до рівномірного
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону	2,060	0,816	2,45**	0**	2,40**	наближається до трикутного
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0,83 мкм	0,47 мкм	2,45**	0**	2,40**	наближається до трикутного

Продовження таблиці 5.2

Цифрова відеокамера (експериментальне дослідження, кольорові зображення та ШНМ)						
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону	1,235	0,634	1,94	–	–	–
Похибка визначення координат екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0,49 мкм	0,25 мкм	1,96	–	–	–
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону	2,137	0,875	2,44	0,37	2,88	наближається до трикутного
Похибка визначення лінійних розмірів екземплярів фітопланктону для збільшення мікроскопу 400 ^x	0,85 мкм	0,35 мкм	2,42	0,37	2,88	наближається до трикутного

Примітки:

** – значення для трикутного закону розподілу.

5.3. Практичне використання автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

5.3.1. Загальна характеристика практичного використання автоматизованої системи для вимірювань геометричних параметрів фітопланктону

Отримані результати використовуються для контролю за станом водосховищ господарсько-побутового призначення, прогнозування змін цього стану та розробки заходів по покращенню якості водопостачання м. Житомира. Діючий макет автоматизованої системи є основою для виконання контролю за станом водосховищ “Дениші” та “Відсічне”, що призначені для водопостачання м. Житомира. Забір води для потреб міста Житомира проводяться з водосховища “Відсічне” на р. Тетерів, яке простягається від с. Побитівка до с. Дениші, Житомирського району на 16 км.

На ріці Тетерев для водопостачання м. Житомира діють два створи:

- 1 – у районі с. Дениші, де функціонує водоймище;
- 2 – водосховище «Відсічне», звідки у даний час здійснюється забір води для господарсько-питного водопостачання.

Гідровузол у районі с. Дениші складається з:

- водозливної бетонної плити, призначеної для створення у руслі достатніх глибин при витратах стічного стоку;
- водосховища, призначеного для сезонного регулювання стоку води.

Повний об’єм водоймища 12,925 млн. м³. Мертвий об’єм складає 2,0 млн. м³. Вода змінюється у водосховищі 12 разів на рік; площа дзеркала – 255,3 га; водозливна гребля збірної-монолітної конструкції – з залізобетонних блоків. Відмітка гребеня греблі – 205,2 м. Висота греблі – 22,0 м. Ширина греблі в основі – 21,8 м. Довжина греблі – 101,6 м.

Характеристика водосховища “Відсічне”:

- площа водозабору – 1780 км²;
- максимальні витрати весняної повені при тиску 1 % – 420 м³/с;
- площа водного дзеркала при НПГ – 320 га;
- повний об’єм водосховища при НПГ дорівнює 10,2 млн. м³;
- корисний об’єм водосховища – 7,5 млн. м³;
- максимальна глибина – 11 м;
- середня глибина – 3,2 м.

Водозабір і станція першого підйому розташовані на березі водосховища “Відсічне” на відстані 7 км на південний захід від міста Житомира.

Технічний ефект від практичного використання результатів даного дослідження проявляється у підвищенні точності і зменшенні часу визначення геометричних параметрів, маси та показників розвитку фітопланктону у водосховищах господарсько-побутового призначення, покращенні якості водопостачання.

5.3.2. *Результати вимірювань геометричних параметрів фітопланктону та його ідентифікації*

В таблицях 5.3 - 5.5 наведено результати вимірювань ГПФ на основі розроблених методик обробки вимірювальної відеоінформації та технічних засобів автоматизованої системи. Ці результати отримані з використанням ШНМ. Результати вимірювань ГПФ (табл. 5.3, 5.4), а саме морфометричні ознаки та коефіцієнти форми, можуть бути використані для ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону в пробах води з водойм (по даним таблицям добре видно різницю між зразками водоростей *Euglena proxima* та *Volvox globator*, особливо це помітно для площ, моментів та осей інерції і ексцентриситету.

Таблиця 5.3

Результати визначення ГПФ по його відеозображенням

ГПФ	Водорості <i>Euglena proxima</i>			Водорості <i>Volvox globator</i>
	Об'єкт №1	Об'єкт №2	Об'єкт №3	Об'єкт №4
1. Координати і розміри (в дискретних точках відеозображення):				
1.1. Координати лівого верхнього кута прямокутника, що обмежує об'єкт	(82, 149)	(218, 41)	(438, 251)	(273, 176)
1.2. Ширина та висота	143, 111	179, 68	93, 148	268, 269
1.3. Площа	9428	8967	10604	54531
1.4. Випукла площа (площа випуклого багатокутника, в який вписано об'єкт)	9629	9139	10759	54956
2. Морфометричні ознаки: (в дискретних точках)				
2.1. Центр мас	(150, 204)	(301, 72)	(484, 326)	(409, 313)
2.2. Еквівалентний діаметр	110	107	116	264
2.3. Довжина максимальної осі інерції	160	181	146	272
2.4. Довжина мінімальної осі інерції	76	64	93	256
3. Коефіцієнти форми:				
3.1. Коефіцієнт випуклості	0,979	0,981	0,986	0,992
3.2. Коефіцієнт заповнення	0,594	0,737	0,770	0,756
3.3. Ексцентриситет	0,879	0,936	0,769	0,338

Таблиця 5.4

Результати визначення геометричних параметрів водоростей *Euglena proxima* по їх відеозображенням

Геометричні ознаки	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4	Зразок №5
1. Геометричні розміри (в дискретних точках відеозображення):					
– ширина та висота	179, 68	42, 58	93, 148	143, 111	88, 117
– площа	8967	2022	10604	9428	8315
– еквівалентний діаметр	107	50	116	110	102
2. Коефіцієнти форми:					
– коефіцієнт випуклості	0,981	0,970	0,986	0,979	0,978
– коефіцієнт заповнення	0,737	0,805	0,770	0,594	0,791
– ексцентриситет	0,936	0,706	0,769	0,879	0,676

Таблиця 5.5

Порівняння значень геометричних параметрів для різних видів фітопланктону

Коефіцієнти форми	Вид фітопланктону		
	<i>Euglena proxima</i>	<i>Volvox globator</i>	<i>Ankistrodesmus</i>
1. Коефіцієнт випуклості	0,975	0,991	0,882
2. Коефіцієнт заповнення	0,739	0,763	0,218
3. Ексцентриситет	0,793	0,234	0,987

Обчислення маси фітопланктону проводять методом додавання мас його окремих видів. Для цього визначають середню масу екземплярів фітопланктону, наявних в пробі води. Для обчислення маси вимірюють не менш 30 екземплярів фітопланктону кожного виду в кожній пробі з визначенням середніх значень для кожного виду. Визначені для кожного екземпляру об'єми в μm^3 додають, помножують на їх густину, перераховують ці значення на об'єм проби води в 1 dm^3 і отримують значення маси в mg/dm^3 .

Дані про ГПФ, його кількість, видовий склад та масу, отримані на основі використання автоматизованої системи для вимірювань ГПФ, є початковими даними для розрахунку інтегральних показників розвитку фітопланктону у водоймах та для контролю за станом цих водойм.

Результати ідентифікації фітопланктону на основі його геометричних параметрів для водосховищ, що досліджувалися, наведено на рис. 5.10 - 5.11.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що фітопланктон Денишівського водосховища та водозабору “Відсічне” представлений діатомовими, зеленими, синьо-зеленими, евгленофітовими, золотистими та

динофітовими водоростями. В обох водоймах загалом серед фітопланктону переважали синьо-зелені (56 %), діатомові (26 %) та зелені (16%) водорості.

Дані за 2005-2007 роки (див. рис. 5.10-5.11) отримані з допомогою методики ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону на основі штучних нейронних мереж. Детально ці результати наведено в додатках Г і Д.

Інші гідрологічні показники, такі, наприклад, як менша площа водного дзеркала (500 га у “Денисах” і 320 га – у “Відсічному”), більша затіненість водойми, особливості літоралі, свідчать про те, що у “Відсічному” склалися набагато кращі умови для інтенсивного розвитку синьозелених, ніж для водоростей інших відділів.

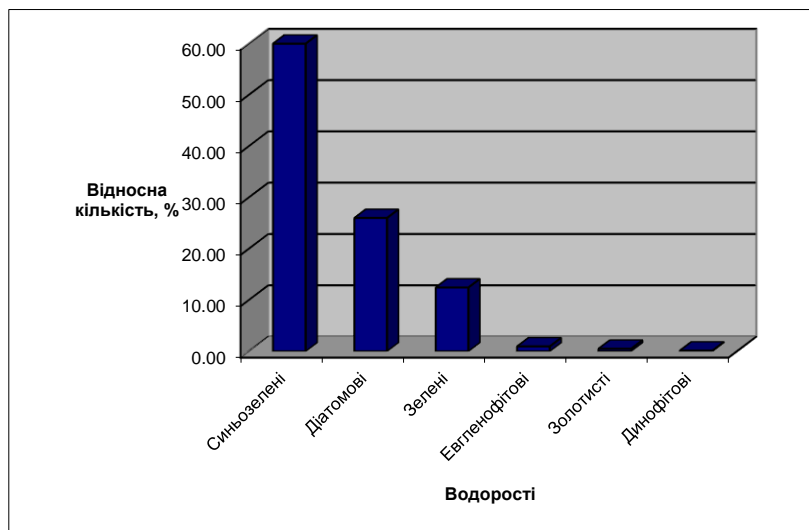


Рис. 5.10. Структура фітопланктону водосховища “Дениші”

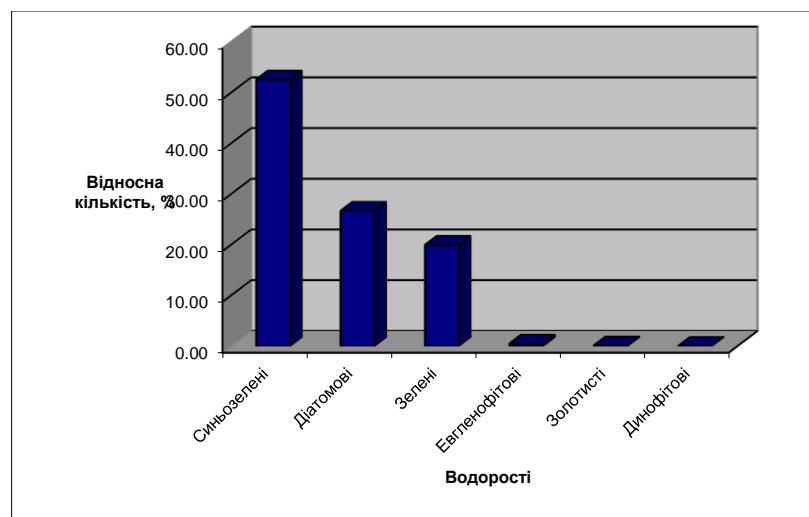


Рис. 5.11. Структура фітопланктону водозабору “Відсічне”

5.3.3. Встановлення закономірностей зміни геометричних параметрів фітопланктону та його маси

На особливу увагу заслуговує питання моделювання розвитку ГПФ фітопланктону та стану водойм господарсько-побутового призначення на основі отриманих експериментальних даних. Моделювання процесів, що характеризують інтенсивність розвитку фітопланктону, встановлення закономірностей зміни його геометричних параметрів та маси дозволяє не тільки зробити прогнози щодо подальшого розвитку фітопланктону та його впливу на загальну токсичність води у водосховищах, але й дає можливість своєчасно впроваджувати заходи по покращенню якості питної води.

В нашому випадку має місце статистичне моделювання процесів розвитку ГПФ і маси фітопланктону. Для того, щоб побудувати модель необхідно використати дані, які б характеризували процеси змін ГПФ, що відбуваються у водосховищах. Такими показниками є зміни ГПФ, його кількісного складу та маси протягом року.

Отримані експериментальні дані та виявлені їх особливості узагальнені у вигляді лінійних та нелінійних статистичних математичних моделей процесів змін ГПФ та його маси [51, 57]. Ці моделі є базою для прогнозування процесів евтрофікації, розробки та практичної реалізації заходів по покращанню стану джерел водопостачання м. Житомира.

В роботі розглянуто два шляхи статистичного моделювання процесів розвитку синьозелених водоростей у водосховищі “Дениші” та водозаборі “Відсічне” по середнім значення за три роки для двох водосховищ. Побудова статистичної математичної моделі першим шляхом полягає у визначенні коефіцієнтів поліному (Таблиця 5.5-5.7), що апроксимує експериментальні дані. Результати показують, що поліном 5-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку маси діатомових, синьозелених та зелених водоростей протягом року. На рис. 5.12 показано апроксимацію розвитку фітопланктону.

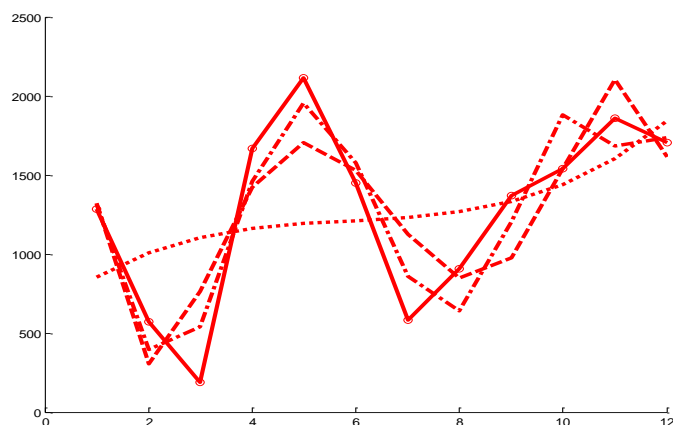


Рис. 5.12, а). Апроксимація процесів розвитку діатомових водоростей (середнє значення для двох водосховищ): по горизонтальній вісі – порядковий номер місяця, по вертикальній – маса водоростей, мгм/дм³, ○ – дані експериментальних досліджень, окремі точки – апроксимація експериментальних даних поліномом 3-го ступеня, штрих-пунктирна лінія – апроксимація поліномом 5-го ступеня, крапка і штрихова лінія – апроксимація поліномом 7-го ступеня, суцільна лінія – апроксимація поліномом 11-го ступеня

$$K_1 = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i N_m^i,$$

де K_1 - маса діатомових водоростей, a_i - коефіцієнти поліному для діатомових водоростей, k - ступінь поліному, N_m - номер місяця

Таблиця 5.5

Коефіцієнти поліному 5-ого ступеня

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
5957,4	-7419,1	3365,8	-633,1	52,4	-1,6

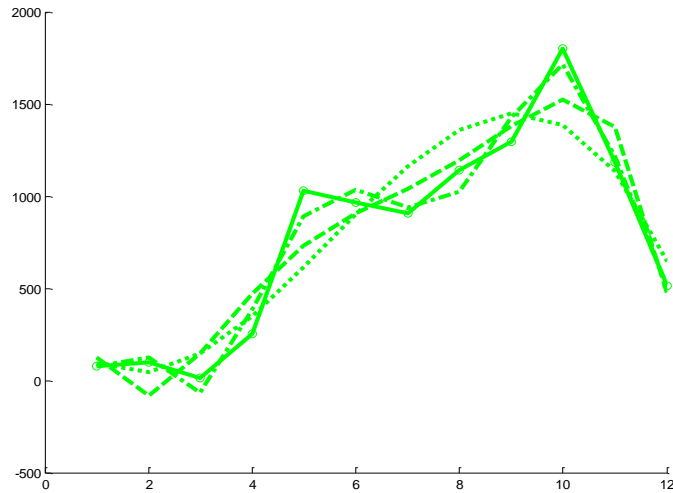


Рис. 5.13, б) Апроксимація процесів розвитку зелених водоростей (середнє значення для двох водосховищ): по горизонтальній вісі – порядковий номер місяця, по вертикальній – маса водоростей, мг/дм³, ○ – дані експериментальних досліджень, окремі точки – апроксимація експериментальних даних поліномом 3-го ступеня, штрих-пунктирна лінія – апроксимація поліномом 5-го ступеня, крапка і штрихова лінія – апроксимація поліномом 7-го ступеня, суцільна лінія – апроксимація поліномом 11-го ступеня

$$K_3 = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i N_m^i$$

де K_3 - маса зелених водоростей, c_i - коефіцієнти поліному для зелених водоростей, k - ступінь поліному, N_m - номер місяця

Таблиця 5.6

Коефіцієнти поліному 5-ого ступеня

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
-4579,5	7663,5	-3154,3	0479,5	-25,5	0,3

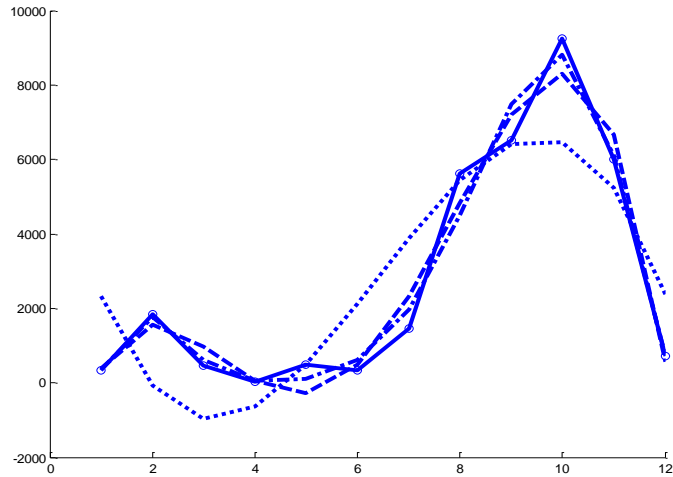


Рис. 5.14, в). Апроксимація процесів розвитку фітопланктону (середнє значення для двох водосховищ): по горизонтальній вісі – порядковий номер місяця, по вертикальній – маса водоростей, мгм/дм³,
 ○ – дані експериментальних досліджень, окремі точки – апроксимація експериментальних даних поліномом 3-го ступеня, штрих-пунктирна лінія – апроксимація поліномом 5-го ступеня, крапка і штрихова лінія – апроксимація поліномом 7-го ступеня, суцільна лінія – апроксимація поліномом 11-го ступеня

$$K_2 = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i N_m^i,$$

де K_2 - маса синьозелених водоростей, b_i - коефіцієнти поліному для синьозелених водоростей, k - ступінь поліному, N_m - номер місяця

Таблиця 5.7

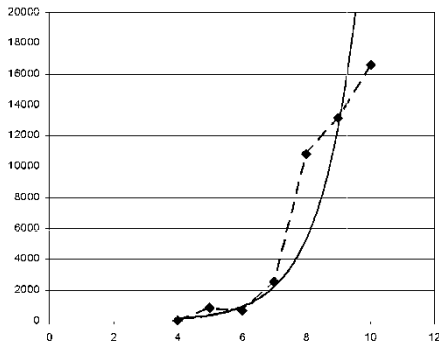
Коефіцієнти поліному 5-ого ступеня

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1361,0	-2014,8	942,7	-176,1	15,0	-0,5

Результати показують, що поліном 5-го ступеня досить добре відображає динаміку розвитку діатомових, синьозелених та зелених водоростей протягом року.

Другий метод статистичного моделювання полягав у виборі типу апроксимуючої кривої і розрахунку коефіцієнтів кривої (a_i, b_i, c_i) таким чином, щоб апроксимуюча крива найбільш відповідала багаторічним експериментальним даним. Для дослідження процесів розвитку синьозелених водоростей виконана апроксимація експонентою (рис. 5.15, а). Ця

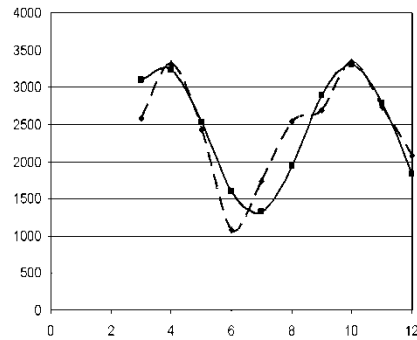
апроксимація має чіткий біологічний зміст та підтверджується даними теорії. Для діатомових водоростей виконана апроксимація синусоїдою (рис. 5.15, б), яка також досить добре відображає циклічність водоростей даного відділу. Для зелених водоростей апроксимацію виконано лінійною кривою (рис. 5.15 в). Усі апроксимації досить добре відображають тенденцію розвитку водоростей даних відділів.



$$m_f = 5,2542e^{0,866N_m}$$

$$R^2 = 0,9033$$

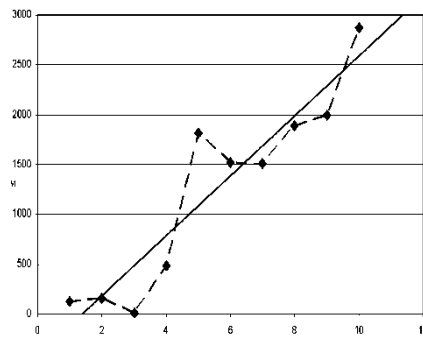
а) синьозелені водорості



$$m_f = 1000\sin(N_m + 3,2) + 2300$$

$$R^2 = 0,75$$

б) діатомові водорості



$$m_f = 300,96N_m - 416,78$$

$$R^2 = 0,869$$

в) зелені водорості

Рис. 5.15. Апроксимація процесів змін маси фітопланктону, середнє значення для двох водосховищ: по горизонталі – порядковий номер місяця; по вертикалі – маса фітопланктону, мгм/дм³; пунктирна лінія – дані експериментальних досліджень; суцільна лінія – апроксимуюча крива; R – коефіцієнт кореляції між двома графіками

5.4. Висновки до розділу 5

1. Експериментально перевірено працездатність методів вимірювань ГПФ шляхом дослідження проб води, взятих з водойм господарсько-побутового призначення. Обґрунтовано практичну цінність методики ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону за його геометричними

параметрами на основі використання інформаційно-комп'ютерних технологій і штучних нейронних мереж.

2. Експериментально перевірено та обґрунтовано склад і характеристики технічних засобів, на основі яких можна забезпечити потрібні функціональні можливості і точнісні характеристики вимірювань геометричних параметрів і маси для задачі дослідження фітопланктону у водоймах господарсько-побутового призначення.

3. Результати експериментальних досліджень похибок вимірювань геометричних параметрів підтверджують вірогідність математичних моделей даних похибок. Розбіжність результатів розрахунку на основі математичних моделей і результатів експериментальних досліджень складає 12 % для максимального значення похибки і 20 % для середньоквадратичного значення. Підтверджено ефективність заходів по зменшенню похибок вимірювань та ідентифікації фітопланктону за рахунок використання алгоритмічної обробки вимірювальної інформації і штучних нейронних мереж;

4. Розроблено діючий макет автоматизованої системи для вимірювань ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення, що має розширені функціональні можливості і підвищену швидкодію вимірювань у порівнянні із існуючими засобами дослідження стану фітопланктону. Система забезпечує реєстрацію і зберігання вимірювальної інформації про стан і зміни геометричних параметрів і маси фітопланктону. Максимальна похибка визначення геометричних параметрів фітопланктонних водоростей дорівнює ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою CAM-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань геометричних параметрів фітопланктонних водоростей $\pm 1,0$ мкм. Дані, отримані в результаті вимірювань, використовуються для ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону і визначення показників, що характеризують стан водойми.

5. Фітопланктон Денишівського водосховища та водозабору "Відсічне" представлений діатомовими, зеленими, синьо-зеленими, евгленофітовими, золотистими та динофітовими водоростями. В обох водоймах загалом серед них переважали синьо-зелені (56%), діатомові (26%) та зелені (16%). Протягом року відбуваються певні зміни в інтенсивності розмноження окремих фітопланктонних форм, які характеризуються активним розвитком діатомових у весняні та осінні місяці (квітень-червень і жовтень-грудень), синьо-зелених – влітку та восени (кінець липня-початок листопада) і зелених – з квітня до початку грудня.

6. На основі отриманих результатів вимірювань розроблено комплекс практичних заходів щодо контролю за процесами розвитку фітопланктону та їх впливом на якість питної води для основних джерел водопостачання м. Житомира.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Важливою науково-технічною проблемою приладобудування є підвищення точності та швидкодії вимірювання ГП ОВ. Результати цих вимірювань використовуються для контролю за об'єктами екологічних досліджень. Існуючі засоби вимірювань ГП, що використовуються у цих задачах, мають недостатню точність та швидкодію, обмежені функціональні можливості. Тому науковою проблемою, що вирішується, є підвищення точності та швидкодії, розширення функціональних можливостей вимірювальної системи для вимірювання ГПФ (у порівнянні з існуючими засобами вимірювань) шляхом формування та комп'ютеризованої обробки їх відеозображень.

2. На основі відеозображень можуть бути визначені ГП ОВ, а також інші механічні величини, що залежать від цих параметрів. На цифровому відеозображенні безпосередньо вимірюються координати точок, що належать ОВ. ГП об'єктів визначаються шляхом комп'ютеризованої обробки результатів вимірювань координат цих точок. Інші механічні величини, що характеризують ОВ, визначаються шляхом комп'ютеризованої визначених ГП.

3. Основним принципом побудови вимірювальної системи є використання сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій і методів візуалізації ОВ з формуванням і комп'ютеризованої обробкою їх відеозображень. В тому числі – це методи на основі теорії штучних нейронних мереж. Сформовані відеозображення містять вимірювальну інформацію про ГП ОВ. Підвищення точності та швидкодії вимірювальної системи забезпечується розробкою нових і удосконаленням існуючих комп'ютеризованої методів обробки відеозображень. На кожному відеозображенні разом міститься вимірювальна інформація про стан ОВ на багатьох ділянках. Метою комп'ютеризованої обробки відеозображень є компенсація похибок вимірювальної інформації, що виникли в процесі формування і передачі відеозображень в цифрову ЕОМ. Розширення функціональних можливостей вимірювальної системи забезпечується використанням сучасних методів реєстрації, аналізу та зберігання відеозображень та результатів вимірювання ГП.

4. Встановлено, що дослідження і контроль за станом водойм господарсько-побутового призначення потребує вимірювань ГПФ у пробах води з цих водойм. Результати вимірювань використано для ідентифікації і розрахунку маси фітопланктону, для оцінки якості питної води.

5. Створено новий метод вимірювань ГПФ у водоймах на основі ШНМ. Цей метод базується на використанні технічних засобів формування цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про стан фітопланктону, та на алгоритмічній обробці таких відеозображень.

6. Визначено, що перетворення відеоінформації в процесі вимірювань супроводжується виникненням похибок, які суттєво впливають на точність

вимірювань ГПФ. Основною похибкою є похибка, пов'язана із дискретністю цифрового відеозображення. Вона дорівнює половині відстані між сусідніми дискретними точками цифрового відеозображення. Ця похибка визначає максимально можливу точність вимірювань.

7. Показано, що визначення ГПФ включає вимірювання його геометричних розмірів та площі, розрахунок морфометричних ознак та коефіцієнтів форми. Створено методику отримання виміральної відеоінформації про ГПФ, що полягає у наступному: відбір і підготовка проб води з фітопланктоном з контрольних точок водойми; формування цифрового відеозображення за допомогою мікроскопа та пристрою формування відеозображень; введення відеозображень в обчислювальне середовище цифрової ЕОМ; алгоритмічна обробка відеозображень з метою вимірювання геометричних параметрів, об'єму і маси фітопланктону; прогноз динаміки розвитку фітопланктону у водоймі.

8. Вперше запропоновано використання математичного апарату ШНМ для обробки виміральної інформації про ГПФ, вимірювання цих параметрів та контролю за станом фітопланктону у водоймах. Розроблено методику ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону на основі вимірювань його геометричних параметрів. В результаті визначається належність кожного екземпляра фітопланктону до одного з видів і розраховуються маса та інші показники стану водойми. Отримані результати дозволяють здійснювати контроль за станом водойм.

9. Створено автоматизовану систему для вимірювань ГПФ у водоймах господарсько-побутового призначення. Ця система має розширені функціональні можливості і підвищену швидкодію вимірювань у порівнянні із іншими відомими засобами вимірювань. Час вимірювань однієї проби води складає 5 сек. на відміну від відомих засобів вимірювань, що потребують на цю операцію 30 хвилин. Максимальна похибка визначення лінійних розмірів фітопланктонних водоростей дорівнює ± 2 дискретні точки. При використанні мікроскопа MICROS MC-200 з вбудованою цифровою відеокамерою CAM-2800 і збільшенні $400\times$ це забезпечує точність вимірювань лінійних розмірів фітопланктонних водоростей $\pm 1,0$ мкм на відміну від відомих засобів вимірювань, у яких точність дорівнює 20 мкм в залежності від величини збільшення мікроскопу. Дані, отримані в результаті вимірювань, використано для ідентифікації та розрахунку маси фітопланктону і визначення показників, що характеризують стан водойми.

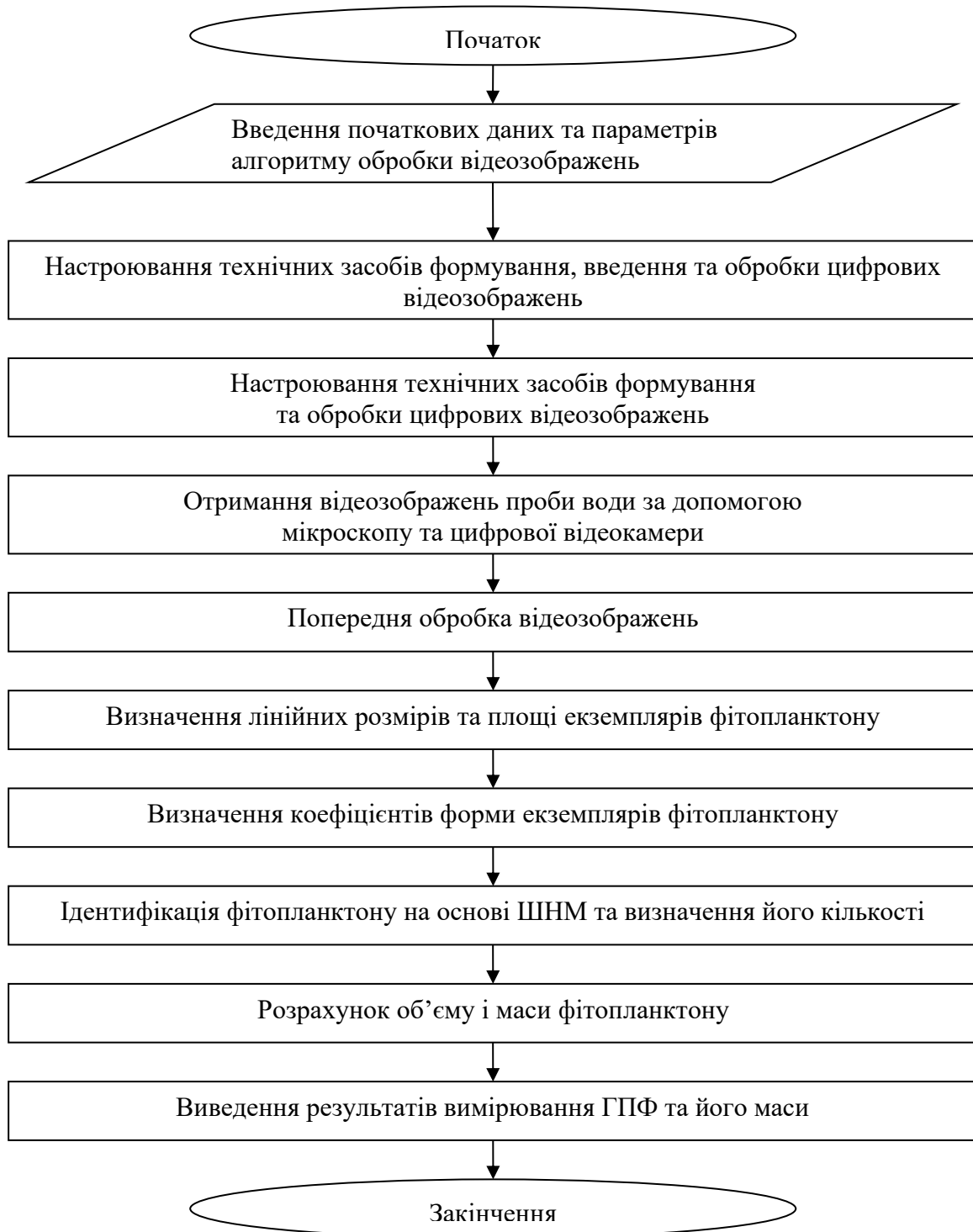
10. За допомогою розробленої автоматизованої системи вперше виявлено ряд особливостей процесів зміни геометричних параметрів і маси фітопланктону, характерних для водосховищ річки Тетерів. На основі отриманих результатів вимірювань розроблено комплекс практичних заходів по покращенню якості питної води для основних джерел водопостачання м. Житомира.

ДОДАТОК А

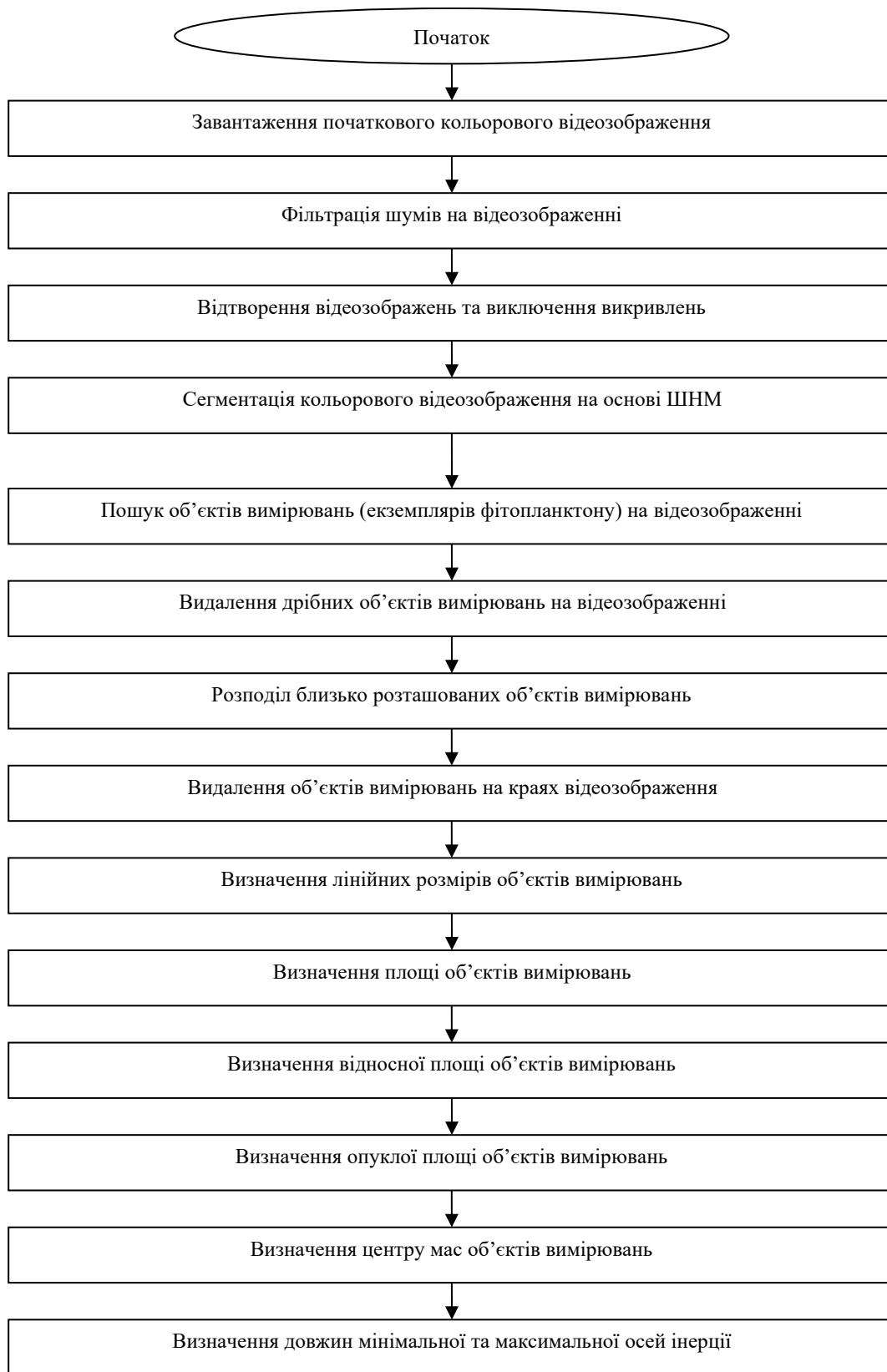
Обробка вимірювальної інформації про геометричні параметри фітопланктону на основі штучних нейронних мереж

```
% Автоматичне виявлення (в режимі навчання без вчителя) центрів  
кластерів  
% входів для двовимірного випадку з використанням шару нейронів  
Кохонена  
X=[0 1;0 1]; % Задання діапазонів можливого положення центрів  
кластерів  
% Задання параметрів для моделювання вхідних даних,  
% що належать 6 класам (кластерам)  
clusters=6;  
points=10;  
std_dev=0.05;  
P=nnngenc(X,clusters,points,std_dev); % Моделювання вхідних даних  
h=newc([0 1;0 1],6,.1); % Створення шару Кохонена  
h.trainParam.epochs=500; % Задання кількості циклів навчання  
h=init(h); % Ініціалізація мережі  
h=train(h,P); % Навчання мережі  
w=h.IW{1};  
% Вивід графіка вхідних даних і виявлення центрів кластерів  
plot(P(1,:),P(2,:),'+r');  
hold on; plot(w(:,1),w(:,2),'ob');  
xlabel('p(1)');  
ylabel('p(2)');  
p=[0;0.2]; % Задання нового вхідного вектора  
y=sim(h,p) % Опитування мережі  
y=(3,1)
```

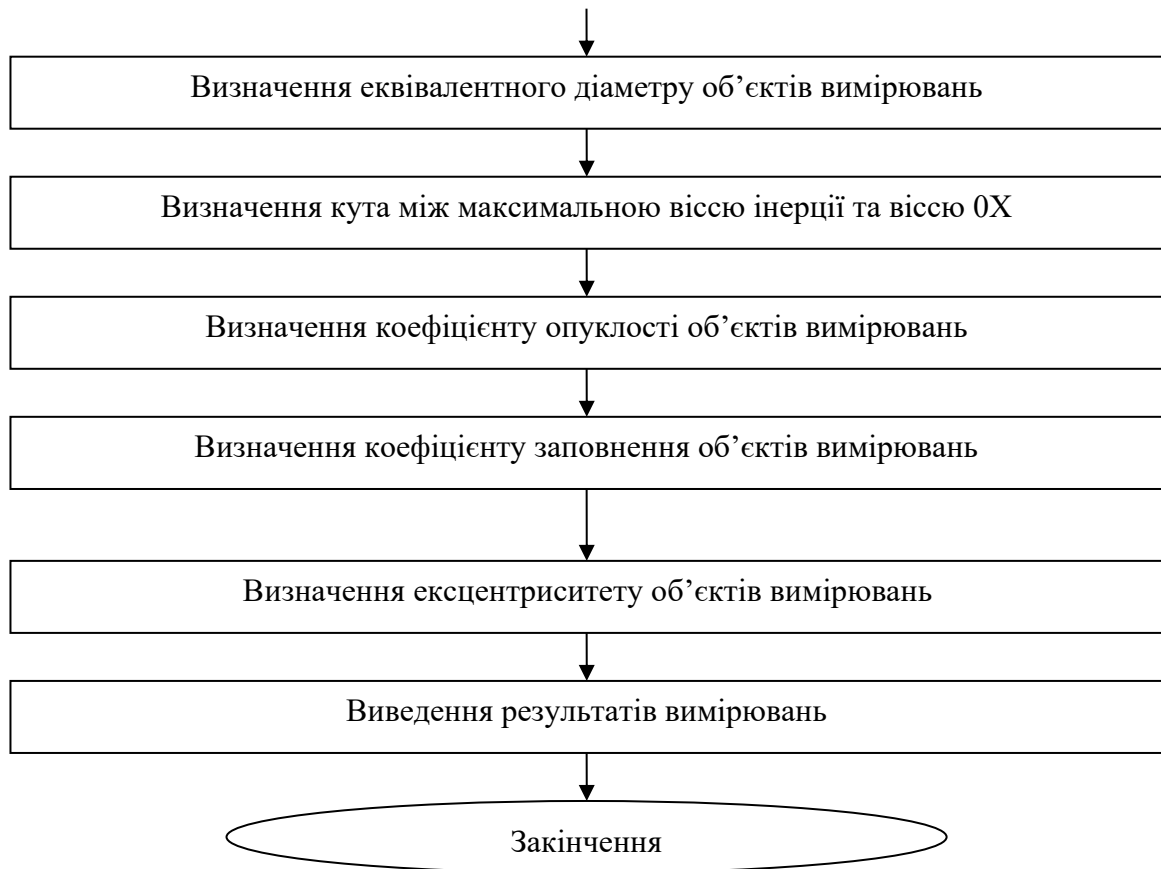
Алгоритм роботи автоматизованої системи для вимірювань ГПФ та його маси



Алгоритм попередньої обробки відеозображень та визначення геометричних параметрів фітопланктону



Продовження ДОДАТКУ В

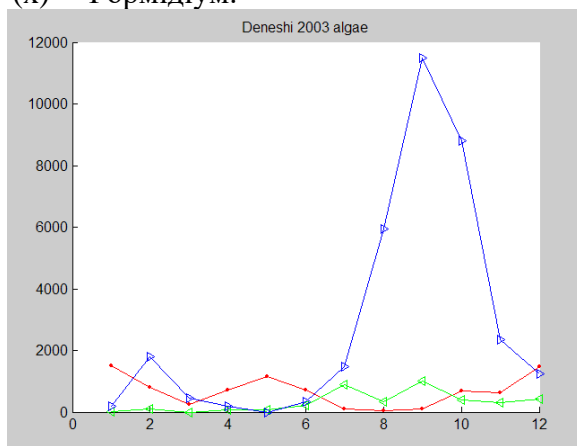


ДОДАТОК Г

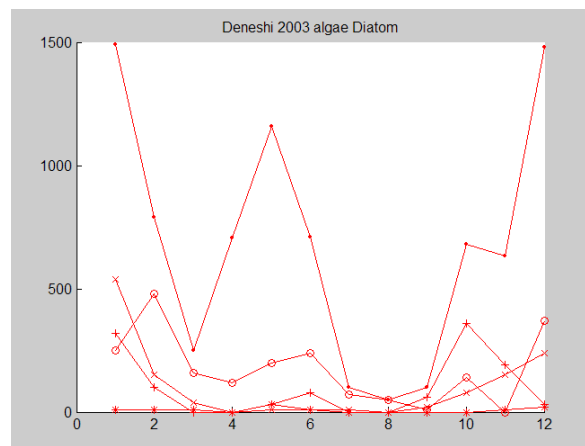
РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І МАСИ ФІТОПЛАНКТОНУ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Позначення на графіках:

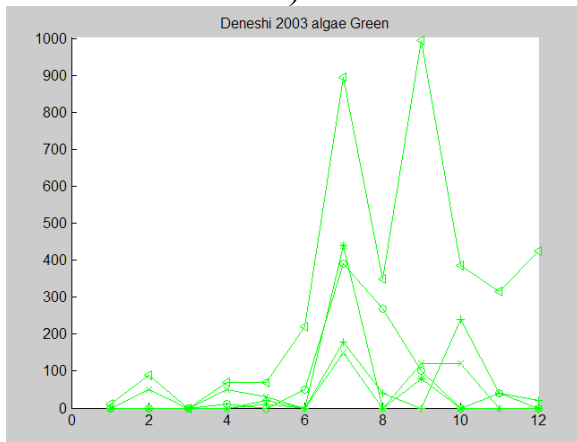
1. По горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³).
2. Водосховище «Дениші» – суцільна лінія, водосховище «Відсічне» – пунктир, наведені результати вимірювань за 2003, 2004, 2005 роки.
3. Окремі відділи і роди фітопланктону на графіках позначені:
 - діатомові водорості: (o) – Стефанодискус, (+) – Мелозіра, (*) – Навікула, (x) – Ніцшія;
 - зелені водорості: (o) – Хламідомонас, (+) – Сценедесмус, (*) – Тетраструм, (x) – Целяструм;
 - синьозелені водорості: (o) – Афанізоменон, (+) – Циліндроспермум, (*) – Мікроцистіс, (x) – Формідіум.



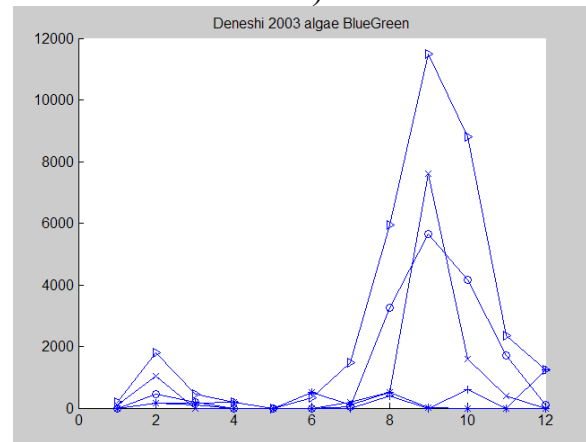
а)



б)

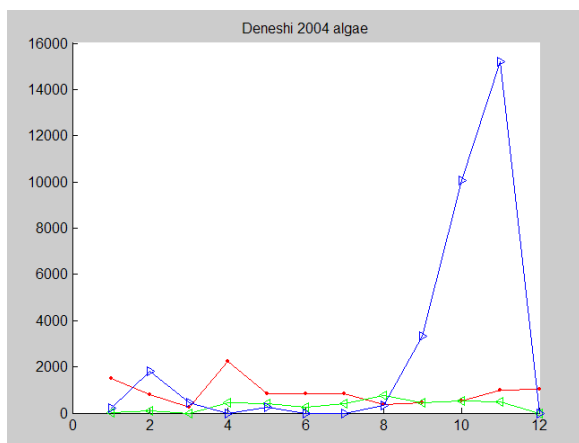


в)

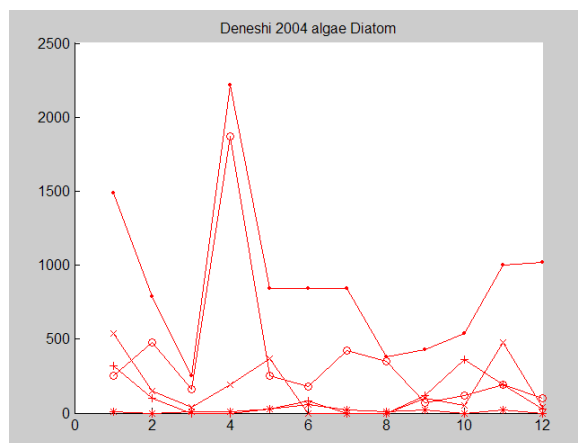


г)

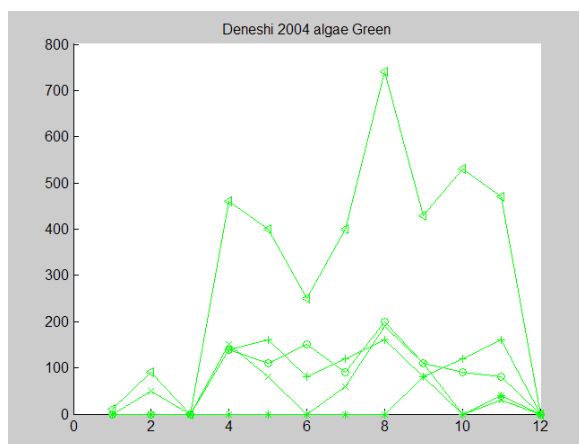
Рис. Г.1. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Дениші" за 2003 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



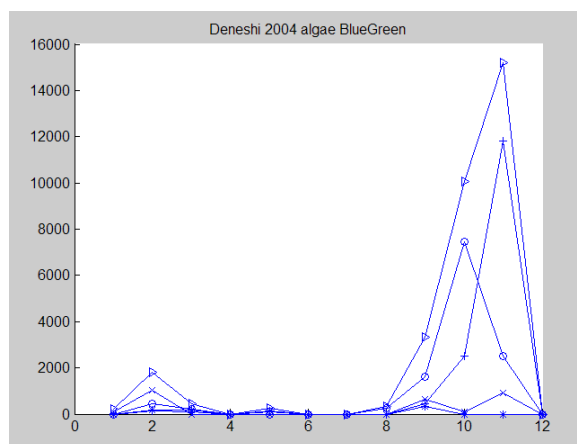
а)



б)

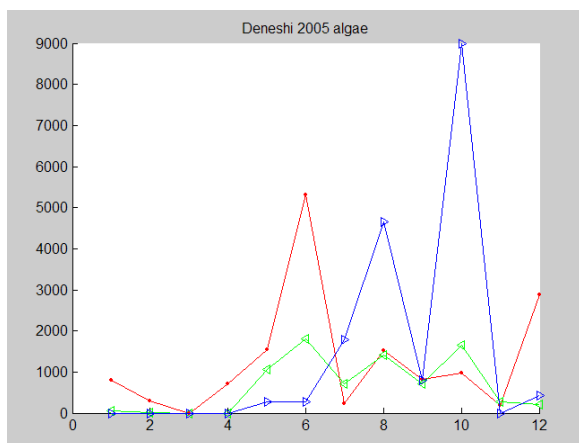


в)

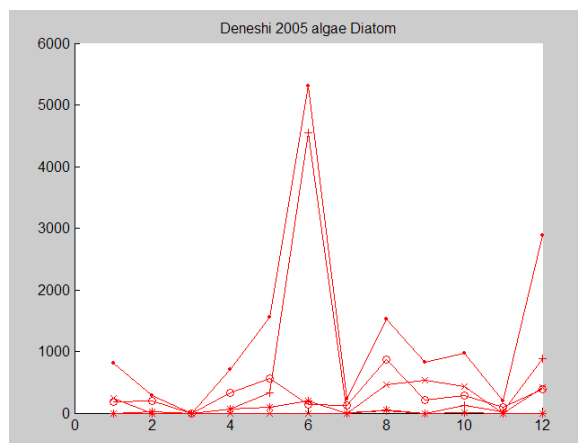


г)

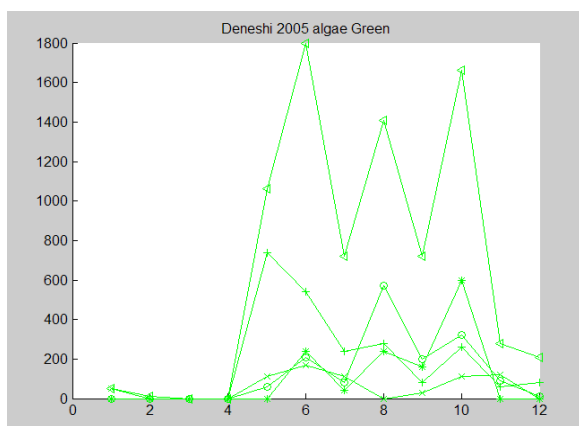
Рис. Г.2. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Дениши" за 2004 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



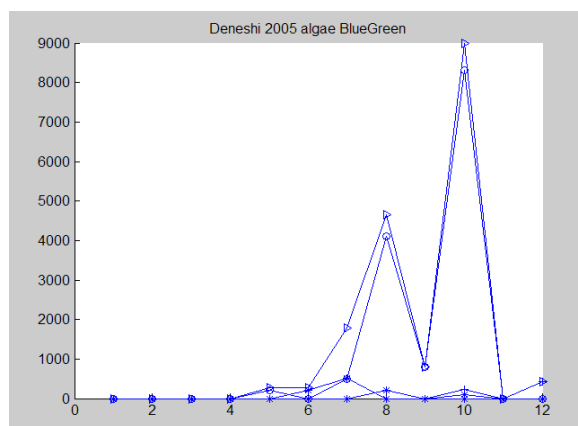
а)



б)

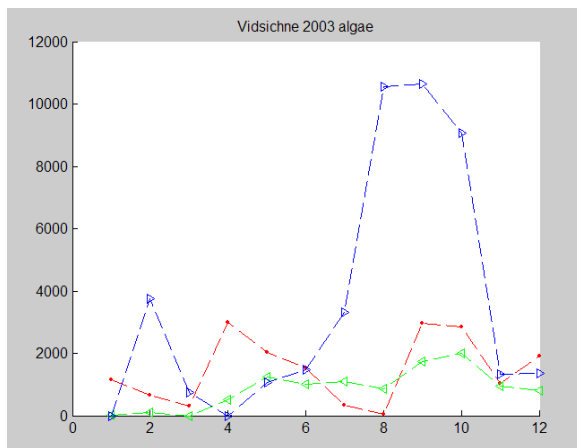


в)

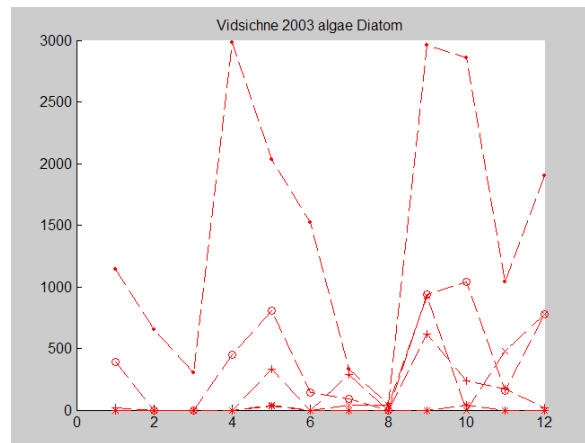


г)

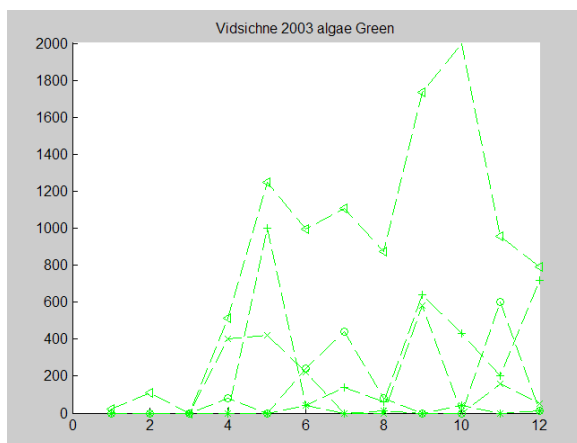
Рис. Г.3. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Дениши" за 2005 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



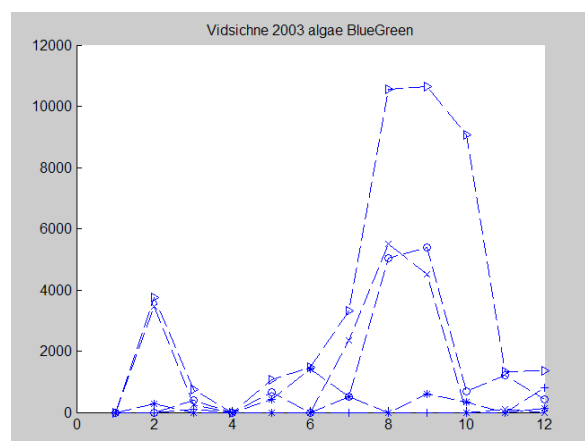
а)



б)

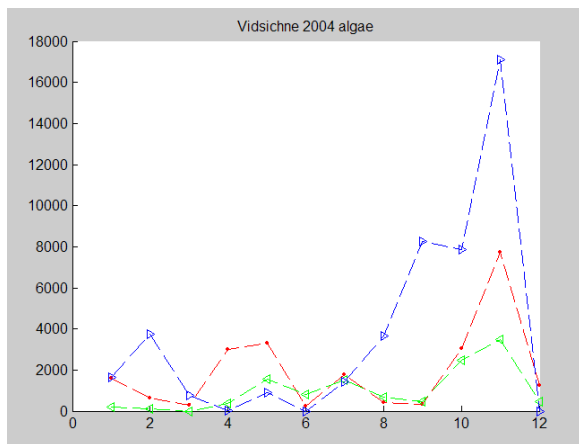


в)

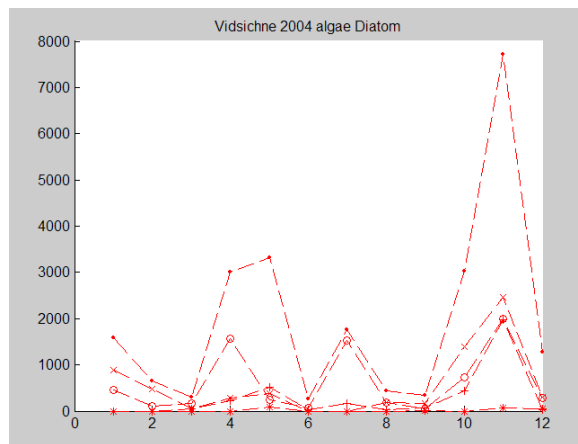


г)

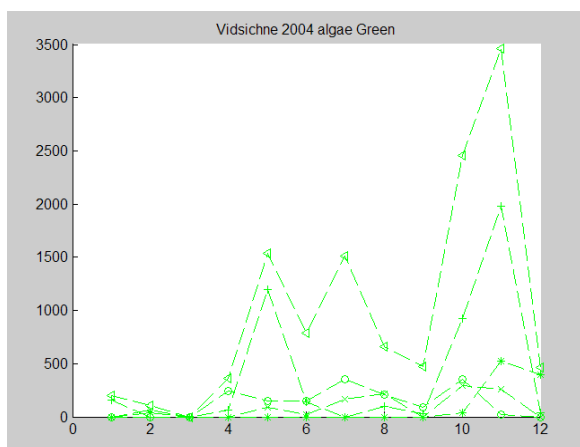
Рис. Г.4. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Відсічне" за 2003 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



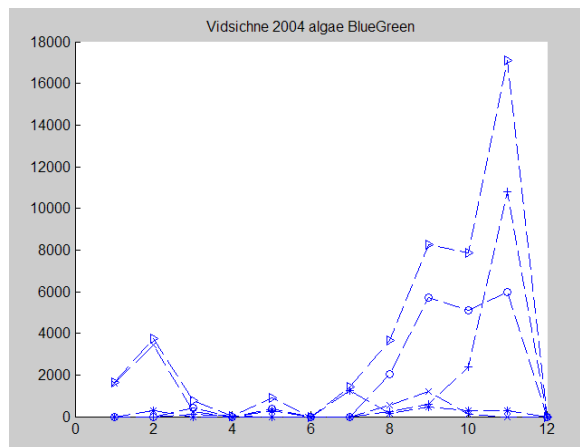
а)



б)

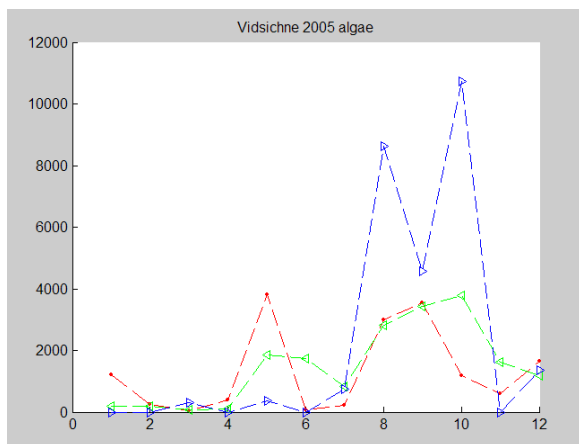


в)

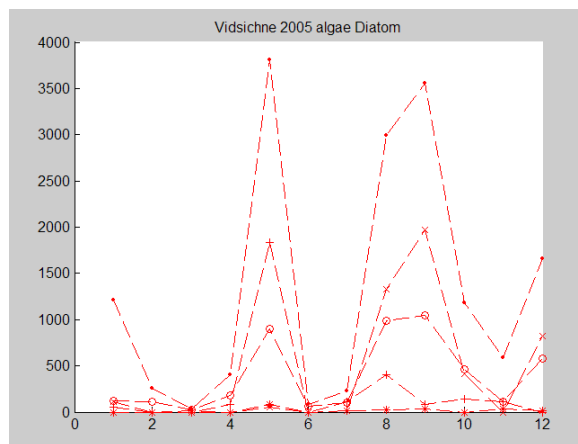


г)

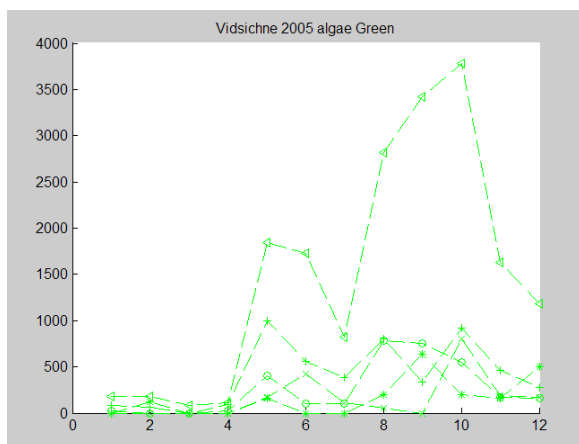
Рис. Г.5. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Відсічне" за 2004 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



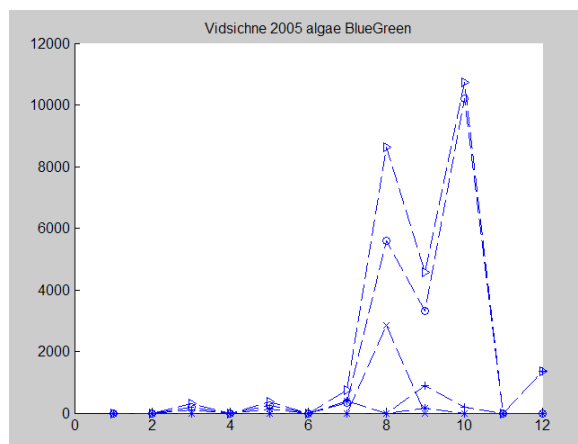
а)



б)

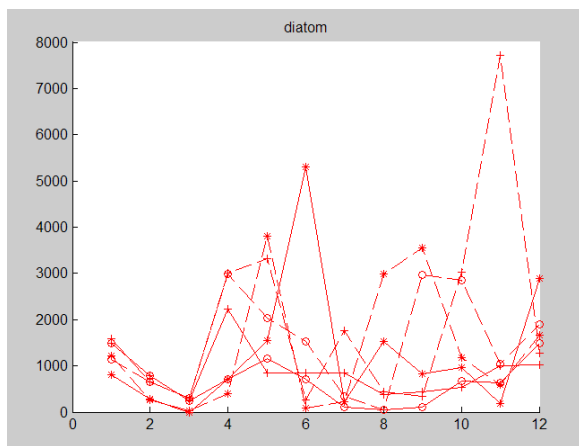


в)

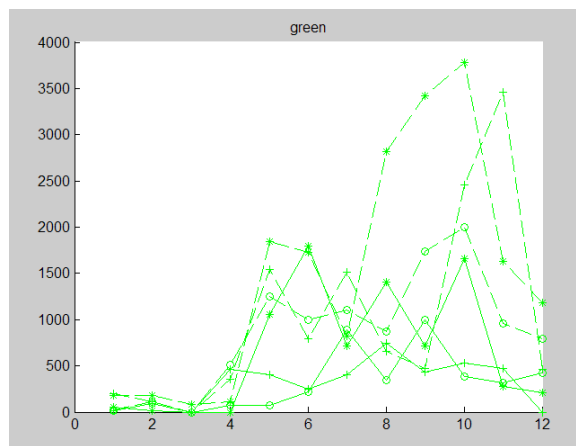


г)

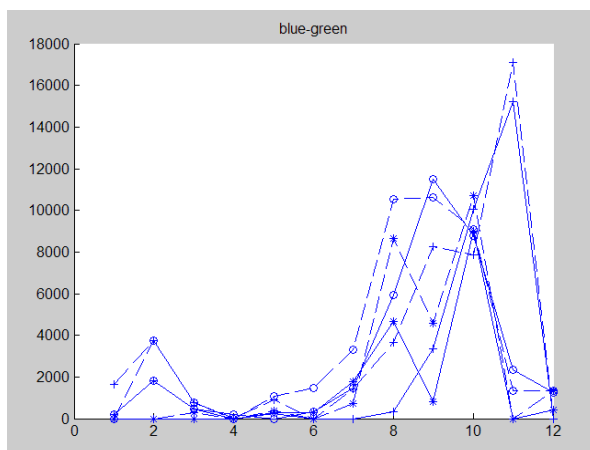
Рис. Г.6. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховища "Відсічне" за 2005 рік (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих відділів фітопланктону; б) для окремих родів діатомових водоростей; в) для окремих родів зелених водоростей; г) для окремих родів синьозелених водоростей;



а)



б)



в)

Рис. Г.7. Результати вимірювань маси фітопланктону для водосховищ "Дениші" (суцільна лінія) та "Відсічне" (пунктирна лінія), середні значення за 3 роки (по горизонталі – порядковий номер місяця, по вертикалі – маса фітопланктону у мгм/дм³): а) для окремих родів діатомових водоростей; б) для окремих родів зелених водоростей; в) для окремих родів синьозелених водоростей;

ДОДАТОК Д

Кореляційний аналіз результатів вимірювань геометричних ознак та маси фітопланктону, що отримані в автоматизованій вимірювальній системі

Таблиця Д.1

Коефіцієнти кореляції (r) між масою фітопланктону, що визначена автоматизованою вимірювальною системою, та показниками стану водойми (середні значення за три роки для двох водосховищ – "Дениші" та "Відсічне")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{нов}$	$t_{води}$			
$t_{нов}$	1,0000	0,9194	0,2423	0,6554	0,1801
$t_{води}$	0,9194	1,0000	0,0595	0,7913	0,4601
Кількість діатомових водоростей	0,2913	0,1061	0,5926	0,4203	0,1289
Кількість зелених водоростей	0,6554	0,7913	0,2679	1,0000	0,7890
Кількість синьо-зелених водоростей	0,1801	0,4601	0,1747	0,7890	1,0000

Таблиця Д.2

Рівні значимості кореляційного зв'язку (p) між масою фітопланктону, що визначена автоматизованою вимірювальною системою, та показниками стану водойми (середні значення за три роки для двох водосховищ – "Дениші" та "Відсічне")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{нов}$	$t_{води}$			
$t_{нов}$	1,0000	0,0000	0,3583	0,0207	0,5753
$t_{води}$	0,0000	1,0000	0,7429	0,0022	0,1323
Кількість діатомових водоростей	0,3583	0,7429	1,0000	0,1737	0,6896
Кількість зелених водоростей	0,0207	0,0022	0,1737	1,0000	0,0023
Кількість синьо-зелених водоростей	0,5753	0,1323	0,6896	0,0023	1,0000

Примітки:

1. r – коефіцієнт кореляції.
2. p – рівні значимості кореляційного зв'язку, якщо $p \leq 0,05$, то кореляція має місце.

Таблиця Д.3

Коефіцієнти кореляції (r) між масою фітопланктону,
що визначена автоматизованою вимірювальною системою,
та показниками стану водойми
(середні значення за три роки для водосховища "Дениші")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{нов}$	$t_{води}$			
$t_{нов}$	1,0000	0,9154	0,2155	0,8534	0,1092
$t_{води}$	0,9154	1,0000	-0,0175	0,9511	0,4036
Кількість діатомових водоростей	0,2155	-0,0175	1,0000	0,0289	-0,3893
Кількість зелених водоростей	0,8534	0,9511	0,0289	1,0000	0,5508
Кількість синьо-зелених водоростей	0,1092	0,4036	-0,3893	0,5508	1,0000

Таблиця Д.4

Рівні значимості кореляційного зв'язку (p) між масою фітопланктону,
що визначена автоматизованою вимірювальною системою,
та показниками стану водойми
(середні значення за три роки для водосховища "Дениші")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{нов}$	$t_{води}$			
$t_{нов}$	1,0000	0,0000	0,5012	0,0004	0,7355
$t_{води}$	0,0000	1,0000	0,9570	0,0000	0,1932
Кількість діатомових водоростей	0,5012	0,9570	1,0000	0,9289	0,2110
Кількість зелених водоростей	0,0004	0,0000	0,9289	1,0000	0,0635
Кількість синьо-зелених водоростей	0,7355	0,1932	0,2110	0,0635	1,0000

Примітки:

1. r – коефіцієнт кореляції.
2. p – рівні значимості кореляційного зв'язку, якщо $p \leq 0,05$, то кореляція має місце.

Таблиця Д.5

Коефіцієнти кореляції (r) між масою фітопланктону,
що визначена автоматизованою вимірювальною системою,
та показниками стану водойми
(середні значення за три роки для водосховища "Відсічне")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{пов}$	$t_{води}$			
$t_{пов}$	1,0000	0,9161	0,2108	0,5443	0,2370
$t_{води}$	0,9161	1,0000	0,1054	0,6578	0,4937
Кількість діатомових водоростей	0,2108	0,1054	1,0000	0,6349	0,3722
Кількість зелених водоростей	0,5443	0,6578	0,6349	1,0000	0,7828
Кількість синьо-зелених водоростей	0,2370	0,4937	0,3722	0,7828	1,0000

Таблиця Д.6

Рівні значимості кореляційного зв'язку (p) між масою фітопланктону,
що визначена автоматизованою вимірювальною системою,
та показниками стану водойми
(середні значення за три роки для водосховища "Відсічне")

Ряди даних	Температура		Кількість діатомових водоростей	Кількість зелених водоростей	Кількість синьо-зелених водоростей
	$t_{пов}$	$t_{води}$			
$t_{пов}$	1,0000	0,0000	0,5108	0,0673	0,4583
$t_{води}$	0,0000	1,0000	0,7445	0,0201	0,1028
Кількість діатомових водоростей	0,5108	0,7445	1,0000	0,0265	0,2335
Кількість зелених водоростей	0,0673	0,0201	0,0265	1,0000	0,0026
Кількість синьо-зелених водоростей	0,4583	0,1028	0,2335	0,0026	1,0000

Примітки:

1. r – коефіцієнт кореляції.
2. p – рівні значимості кореляційного зв'язку, якщо $p \leq 0,05$, то кореляція має місце.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов А. С. Общая гидробиология. – 3-е изд., перераб. и доп. / А. С. Константинов. – М. : Высшая школа, 1979. – 480 с.
2. Андреев А. Д. Интегральная количественная оценка состояния фитопланктонного сообщества по структурным показателям / А. Д. Андреев, В. И. Щербак // Гидробиологический журнал. – 1994. – Т. 30, № 2. – С. 3-7.
3. Теличенко М. М. Самоочищение и биоиндикация загрязненных вод / М. М. Теличенко. – М. : Наука. – 1979. – С. 22–45.
4. Топачевский А. В. Пресноводные водоросли Украинской ССР / А. В. Топачевский, Н. П. Масюк. – К. : Высшая школа. Головное изд-во, 1984. – 336 с.
5. Застрогин Ю. Ф. Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера / Ю. Ф. Застрогин. - М. : Машиностроение, 1986.-272с.
6. Координатные измерительные машины и их применение / А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов, З. А. Раманаускас, Н. А. Серков, В. А. Чудов. - М. : Машиностроение, 1988. -328 с.
7. Макаров И. М. Управляющие системы промышленных роботов / И. М. Макаров. - М. : Машиностроение, - 1984.- 287 с.
8. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский.- М. : Наука 1986.-288 с.
9. Павленко І. І. Синтез структури промислових роботів та аналіз їх механічних систем для верстатів з ЧПУ / І. І. Павленко.- 1996. - 230 с.
10. Растрингин Л. А. Системы очувствления промышленных роботов в ГПС / Л. А. Растрингин. - М. : Наука, 1989. - 286 с.
11. Ратмиров В. А. Системы ЧПУ КИМ и коррекция погрешностей обработки деталей / В. А. Ратмиров, Т. С. Хрящева. - М. : Изд-во НИИ МАШ, 1980. - 48 с.
12. Соболев В. И. Информационно-статистическая теория измерения / В. И. Соболев. - М. : Наука, 1985. – 268 с.
13. Соболев В. И. Основы измерений в многомерных системах / В. И. Соболев. - М. : Энергия, 1975. – 127 с.
14. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. – К. : Символ Т, 1998. – 28 с.
15. Методичний посібник з визначення якості води / Під ред. В. І. Назаренка. – К., 2002. – 51 с.
16. Методы исследования качества воды водоемов. – М. : Медицина, 1990. – С. 3–11.
17. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений : учеб. пособие для вузов / С. А. Спектор. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

18. Воронцов Л. Н. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении : учебное пособие для вузов / Л. Н. Воронцов, С. Ф. Корндорф. – М. : Машиностроение, 1988. – 280 с.
19. Измерения в промышленности : справочное издание / под ред. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1980. – 648 с.
20. Данилов А. А. Сенсорные устройства автоматов контроля и сборки / А. А. Данилов. - Л. : Машиностроение, 1984. - 162 с.
21. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / За редакцією Е. С. Поліщука. – Львів : Бескид Біт, 2003. – 544 с.
22. Засоби і методи вимірювань неелектричних величин : підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. Й. Стадник та ін. ; за ред. Є. С. Поліщука. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 618 с.
23. Безвесільна О. М. Перетворюючі пристрої приладів. Технологічні вимірювання та прилади : підручник / О. М. Безвесільна, В. Ю. Ларін, Н. І. Чичикало, С. С. Федоров, О. О. Добржанський. – Житомир. : ЖДТУ, 2011. – 542 с.
24. Квасніков В. П. Принципи побудови інформаційно-вимірювальних систем механічних величин об'єктів із складною просторовою поверхнею з використанням евристичних систем спостереження / В. П. Квасніков, С. В. Голуб. - Черкаси : Вид-во ЧНУ, 2003. - 219 с.
25. Безвесільна О. М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів : монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 258 с.
26. Handbook of Measurement in Science and Engineering, Volume 2. Myer Kutz (Editor). - John Wiley & Sons, 2013. - 1072 p.
27. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен ; пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. - Москва : Постмаркет, 2002. - 350 с.
28. Next Generation Sensors and Systems (Smart Sensors, Measurement, and Instrumentation). Mukhopadhyay Subhas C. (Editor). - Springer, 2016 – 330 p.
29. Бакка М. Т. Дослідження динаміки процесів евтрофікації у водоймах господарсько-побутового призначення на основі комп'ютеризованих технологій обробки вимірювальної інформації / М. Т. Бакка, Е. О. Аристархова, Т. О. Єльнікова, Ю. О. Подчашинський // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2006. – С. 20-24.
30. Пат. 88673 С2 Україна, МПК (2009) С 02 F 3/00, С 02 F 3/12, С 12 Q 1/04, G 01 N 15/14. Спосіб ідентифікації фітопланктонних водоростей у пробах води з водних об'єктів / Аристархова Е. О., Єльнікова Т. О., Подчашинський Ю. О. ; заявник і власник патенту ЖДТУ. – № а2007 09275 ; заявл. 14.08.07 ; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.
31. Єльнікова Т. О. Моделювання евтрофних процесів у водосховищах річки Тетерів Житомирської області на основі відеозображень проб води /

Т. О. Єльнікова, Ю. О. Подчашинський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2015. – №3 (74). – С.54 - 60.

32. Конструирование приборов. Кн.1 / Под ред. В. Краузе. – М. : Машиностроение, 1987. – 384 с.

33. Мирский Г. Я. Микропроцессоры в измерительных приборах / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.

34. Мелик-Шахназаров А. М. Измерительные приборы со встроенными микропроцессорами / А. М. Мелик-Шахназаров, М. Г. Маркатун, В. А. Дмитриев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.

35. Кончаловский В. Ю. Цифровые измерительные устройства : учеб. пособие для вузов / В. Ю. Кончаловский. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

36. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : Бинум, 2006. – 752 с.

37. Jeahne V. Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications / V. Jeahne. – 2nd ed. – CRC Press LLC, 2004. – 571 p.

38. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.

39. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.

40. Руденко О. Г. Штучні нейронні мережі : навчальний посібник / О. Г. Руденко, Є. В. Бодяньський. – Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.

41. Ямпольський Л. С. Нейротехнології та нейросистеми : монографія / Л. С. Ямпольський. – К. : Дорадо-Друк, 2015. – 508 с.

42. Система контроля качества измерений химического состава и свойств вод и осадков. – Харьков : УкркомунНИИпрогресс, 1996. – С. 50–55.

43. Штабський Б. М., Гжегоцький М. Р. Ксенобіотики, гомеостаз і хімічна безпека людини / Б. М. Штабський, М. Р. Гжегоцький. – Львів : Видавничий дім “Наутилус”, 1999. – 308 с.

44. Щербак В. І. Методи досліджень фітопланктону / В. І. Щербак // Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем. – К., 2002. – С. 41-47.

45. Щербак В. І. Гідробіологічний моніторинг водних екосистем / В. І. Щербак, Н. В. Майстрова, Л. А. Ковальчук // Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем. – К., 2002. – С. 32-40.

46. Padden T. J., Gloyna E. F. Simulation of steam process in model river / T. J. Padden, E. F. Gloyna. - Rep, Neme-70-23. CRWR-72 Univ. of Texas. Austin (Tex.), 1971. - 36p.

47. Polikarpov G. G. Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment / G. G. Polikarpov // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – Vol. 75, № 1-4. – P. 181-185.

48. Арменский Е. В. Современное состояние оптико-электронных преобразователей информации / Е. В. Арменский, В. С. Титов, А. Ф. Каперко, Т. А. Шибакина // Приборы и системы управления. – 1998. – № 5. – С. 28 – 31.

49. Бакка М. Т. Методи математичної статистики в гірництві / М. Т. Бакка, В. С. Редчиць та ін.. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 264 с.

50. Гриб Й. В. Відновна гідроекологія порушених річкових та озерних систем (гідрохімія, гідробіологія, гідрологія, управління) / Й. В. Гриб, М. О. Клименко та ін.. – Т. П. – Рівне, 1999. – 198 с.

51. Математические модели контроля загрязнения воды / Под ред. А. Джеймса. – М. : Мир, 1981. – 271 с.

52. Топачевський О. В. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. XI. Діатомові водорості – BACILLARIOPHYTA (DIATOMEAЕ) / О. В. Топачевський, О. П. Оксіюк. – К. : Видавництво академії наук Української РСР, 1960. – С. 135–141.

53. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.

54. Научные основы контроля качества вод по гидробиологическим показателям. – Л., 1981. – 207 с.

55. Романенко В. Д. Основы гидроэкологии : учебник для вузов / В. Д. Романенко. – К. : Генеза, 2004. – 664 с.

56. ГОСТ 27384-87. Вода. Нормы погрешности измерений состава и свойств.

57. Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. А. Бисваса. – М.: Наука, 1985. – 392 с.

58. Обзор цифровых фотоаппаратов // CHIP Foto Video digital. - 2004. - №11. - С. 46-63.

59. Шарыгин М. Е. Сканеры и цифровые камеры / М. Е. Шарыгин. – СПб. : ВHV – Санкт-Петербург, 2000. – 384 с.

60. Алиев Т. М. Измерительная техника: Учебное пособие для технических вузов / Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. – М. : Высшая школа, 1991. – 384 с.

61. Катус Г. П. Системы машинного зрения: анализ состояния и перспективы развития / Г. П. Катус, П. Г. Катус // Приборы и системы управления. – 1999. – № 9. – С. 57 – 67.

62. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / Под ред. А. Н. Писаревского, А. Ф. Чернявского. – Л. : Машиностроение, 1988. – 424 с.

63. Системы технического зрения НТЦ "Модуль" // PC Week. - 2004. - № 10. - С. 42-43.

64. Абламейко С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С. В. Абламейко, Д. М. Лагуновский. – Минск : Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.

65. Анисимов Б. В. Распознавание и цифровая обработка изображений : учебное пособие для вузов / Б. В. Анисимов, В. Д. Курганов, В. К. Злобин. – М. : Высшая школа, 1983. – 295 с.

66. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учебное пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых и др. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.

67. Даджион Д. Цифровая обработка многомерных сигналов : пер. с англ. / Д. Даджион, Р. Мерсеро. – М. : Мир, 1988. – 488 с.

68. Прэтт У. Цифровая обработка изображений : пер. с англ / У. Прэтт. – М. : Мир, 1982. – 480 с.

69. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику / Л. П. Ярославский. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.

70. Линейные и матричные датчики изображений / Голуб В. // Электронные компоненты и системы. - 2000. - № 4(32). - С. 4-5.

71. Горелик С. Л. Телевизионные измерительные системы / С. Л. Горелик, Б. М. Кац, В. И. Киврин. – М. : Связь, 1980. – 168 с.

72. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

73. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

74. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков ; под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.

75. Taylor G. Visual Perception and Robotic Manipulation. 3D Object Recognition, Tracking and Hand-Eye Coordination / G. Taylor, L. Kleeman. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – 230 p.

76. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер Ком, 1999. – 816 с.

77. Горелик С. Л. Телевизионные измерительные системы / С. Л. Горелик, Б. М. Кац, В. И. Кирвин. – М. : Связь, 1980. – 168 с.

78. Интегральные микросхемы: Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа. Выпуск 1. – М. : ДОДЭКА, 1996. – 384 с.

79. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью / Ф. П. Пресс. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.

80. Дьяконов В. П. Matlab. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. – СПб. : Питер, 2002.

81. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

82. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М. : Мир, 1976. – 560 с.
83. Данилин Н. С. Неразрушающий контроль качества продукции радиоэлектроники / Н. С. Данилин. - М. : Издательство стандартов, 1976. - 240 с.
84. Основи проектування інтелектуальних систем / Ю. П. Зайченко. – К. : Видавничий Дім "Слово", 2004. – 352 с.
85. Nelles O. Neuronale Netze zur Identifikation nichtlinearer, dynamischer Systeme: Ein Überblick / O. Nelles, S. Ernst, R. Isermann // Automatisierungstechnik. – 1997. – 45. - № 6. – S. 251-262.
86. Руденко О. Г. Штучні нейронні мережі / О. Г. Руденко, Є. В. Бодянський. – Харків : ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 404 с.
87. Линейный регрессионный анализ : пер. с англ / Дж. Себер. – М. : Мир, 1980.
88. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы / В. В. Яншин. – М. : Машиностроение, 1995. – 112 с.
89. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : Физматлит, 2001. - 224 с.
90. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
91. Нейронные сети: основные модели / Под ред И. В. Заенцева. – Воронеж, 1999. – 76 с.
92. Руденко О. Г. Проекционные алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей / О. Г. Руденко // Доп. НАН України. – 2003. - № 7. – С. 69-73.
93. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. – М. : Мир, 1992. – 127 с.
94. Рабинович З. Л. Типовые операции в вычислительных машинах / З. Л. Рабинович, В. А. Раманаускас. – К. : Техніка, 1980. – 264 с.
95. Соренков Э. И. Точность вычислительных устройств и алгоритмов / Э. И. Соренков, А. И. Телига, А. С. Шаталов. – М. : Машиностроение, 1976. – 200 с.
96. Справочник по устройствам цифровой обработки информации / Н. А. Виноградов, В. Н. Яковлев, В. В. Воскресенский и др. – К.: Техніка, 1988. – 415 с.
97. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы : учебное пособие для вузов / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Наука, 1987. – 600 с.
98. Иванов В. В. Методы вычислений на ЭВМ : справочное пособие / В. В. Иванов. – К. : Наукова думка, 1986. – 582 с.
99. Лоусон Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М. : Наука, 1986. – 230 с.

100. Калабеков Б. А. Микропроцессоры и их применение в системах передачи и обработки сигналов : учебное пособие для вузов / Б. А. Калабеков. – М. : Радио и связь, 1988. – 368 с.

101. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.

102. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных схемах : пер. с англ / Г. Отт. – М. : Мир, 1979. – 320 с.

103. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Зайтов, Ш. Д. Курмашев ; под ред. В. И. Стафеева. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

104. Техника цветного телевидения / Под ред. С. В. Новаковского. – М. : Связь, 1976. – 496 с.

105. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики / Д. Роджерс. – М. : Мир, 1989.

106. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. Серия «Библиотека профессионала» / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. - М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. - 456 с.

107. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений / Г. Ю. Шлихт. – М. : Издательство ЭКОМ, 1997. – 336 с.

108. www.micros.at, www.micros-at.ru.

109. Лабораторные оптические приборы: Учебное пособие для вузов / под ред. Л. А. Новицкого. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. - 448 с.

110. Оптико-механические приборы. - М. : Машиностроение, 1975. - 400 с.

111. Сакин И. Л. Инженерная оптика / И. Л. Сакин. - Л. : Машиностроение, 1976. - 288 с.

112. Безвесільна О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем : підручник / О. М. Безвесільна, Ю. О. Подчашинський. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – 560 с.

113. Коротаев В. В. Телевизионные измерительные системы : учебное пособие / В. В. Коротаев, А. В. Краснящих. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с.

114. Грязин Г. Н. Системы прикладного телевидения : учебное пособие для вузов / Г. Н. Грязин. – СПб.: Политехника, 2000. – 277 с.

115. Wu Q. Microscope Image Processing / Q. Wu, F. A. Merchant, K. R. Castleman. – Elsevier Inc., 2008. – 582 p.

116. Pauli J. Learning-Based Robot Vision. Principles and Applications / J. Pauli. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. – 288 p.

117. Vision Systems Applications / Edited by G. Obinata and A. Dutta. – I-Tech Education and Publishing, 2007. – 616 p.

118. Яцук В. О. Методи підвищення точності вимірювань : підручник / В. О. Яцук, П. С. Малачівський. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 368 с.

119. Яворских Е. А. Видео на персональном компьютере. Самоучитель / Е. А. Яворских. – СПб. : Питер, 2005. – 142 с.

120. Оптическая обработка информации : пер. с англ. / под ред. Д. Кейсесента. – М. : Мир, 1980. – 342 с.

121. Acharya T. Image Processing : Principles And Applications / T. Acharya, A. K. Ray. – John Wiley & Sons, Inc, 2005. – 448 p.

122. Цифровое преобразование изображений : учеб. пособие для вузов / Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцветов ; под ред. Р. Е. Быкова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 228 с.

123. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации : пер. с польского / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

124. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем : навчальний посібник / Ю. П. Зайченко. – К. : Видавничий дім «Слово», 2004. – 352 с.

125. Борисов Ю. Нейросетевые методы обработки информации и средства их программно-аппаратной поддержки / Ю. Борисов, В. Кашкаров, С. Сорокин // Открытые системы. - 1997. - № 4. - С. 32-42.

126. Виксне П. Е. Однокристалльный цифровой нейропроцессор с переменной разрядностью операндов / П. Е. Виксне, Д. В. Фомин, /В. М. Черников // Приборостроение. Тематический выпуск. Аппаратно-программные комплексы поддержки нейровычислений. - 1996. - № 7.

127. Комарцова Л. Г. Нейрокомпьютеры : учеб. пособие для вузов / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 400 с. – (Информатика в техническом университете).

128. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А. И. Галушкина. – М. : ИПРЖР, 2000. – 528 с. – (Нейрокомпьютеры и их применение ; кн. 3).

129. Нейрокомпьютеры в системах обработки сигналов / под ред. Гуляева Ю. В. – М. : ИПРЖР, 2003. – 224 с. – (Нейрокомпьютеры и их применение).

130. Шахнович И. Отечественный процессор цифровой обработки сигналов NM6403 / И. Шахнович // Электроника: наука, технология, бизнес. - 1999. - №2. - С. 30-35.

131. Кумсаре А. Я. Расчет биомассы фитопланктона по сумарному объему клеток / А. Я. Кумсаре // Рыб. хоз-во Латвийской ССР. – Рига : Зинатие. – 1963. – Вып. 7. – С. 67–73

132. Волосников А. С. Линейная нейросетевая динамическая измерительная система с последовательным восстановлением и фильтрацией

входного сигнала датчика / А. С. Волосников // Известия Челябинского научного центра. – 2006. – вып. 1 (31). – С. 90-95.

133. Specht D. F. Probabilistic Neural Network for Classification, Mapping or Associative Memory / D. F. Specht // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks. SanDiego, 1988. – Vol. 1. – P. 525-532.

134. Summary Report and Recommendation of the project: transboundary Water Quality Monitoring and Assessment (1997 Tacis CBC Programme: Bug and Latorica / Uzh). – Kyiv, March 2001. – 168 p.

135. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии / С. Уэлстид. – М. : Триумф, 2003. – 320 с.

136. Wallace G. K. The JPEG Still Picture Compression Standard / Wallace G. K. // Communication of the ACM, 1991. – Vol. 34. – № 4. – P. 31 – 44.

137. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника / М. Птачек. – М. : Радио и связь, 1990. – 528 с.

138. Fractal Image Encoding and Analysis / Edited by Y. Fisher. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 368 p.

139. Федер Е. Фракталы : пер. с англ. / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

140. Мюррей Д. Энциклопедия форматов графических файлов : пер. с англ. / Д. Мюррей, У. Ван Райпер. – К.: ВНУ, 1997. – 672 с.

141. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

142. Fractal Image Compression: Theory and Application / Y. Fisher (editor). – New York: Springer-Verlag, 1995. – 354 с.

143. Подчашинський Ю. О. Метод розрахунку похибок геометричних вимірювань при стисненні цифрових зображень / Ю. О. Подчашинський // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2000. – № 15. – С. 125 – 132.

144. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов / А. Д. Морозов. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.

145. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. – М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 528 с.

Наукове видання

ЄЛЬНІКОВА Тетяна Олександрівна
ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ
ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДОЙМАХ**

Монографія

Підписано до друку 30.10.2019. Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк, аркушів 10,46.
Наклад 300 прим. Зам. № 386.

Редакційно-видавничий сектор бібліотеки
Державного університету «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єкта видавничої справи
Серія ЖТ № 08 від 26.03.2004