

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

БАЛОВСЯК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 004.932; 621.391

**БАГАТОРІВНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ
ЕЛЕКТРОННО-ДИФРАКЦІЙНИХ ТА Х-ПРОМЕНЕВИХ СИГНАЛІВ
У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ
СИСТЕМАХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана на кафедрі комп'ютерних систем та мереж у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича МОН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,
Фодчук Ігор Михайлович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
декан факультету архітектури, будівництва та
декоративно-прикладного мистецтва

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Березький Олег Миколайович,
Тернопільський національний економічний
університет,
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

доктор технічних наук, професор,
Романюк Олександр Никифорович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри програмного забезпечення

доктор технічних наук, професор
Русин Богдан Павлович,
Фізико-механічний інститут
імені Г. В. Карпенка НАН України,
завідувач відділу методів і систем
дистанційного зондування

Захист відбудеться "07" червня 2019 року о 10:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «03» травня 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Роль цифрового оброблення сигналів у сучасному світі стрімко зростає, при цьому оброблення зображень виділяється в окремий напрямок вимірювальної техніки – «відеовимірювання». Цифрове оброблення сигналів знаходить широке використання в промисловості, наукових дослідженнях, медицині та побуті. Особливо важливу роль відіграє оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах (КІВС). Електронно-дифракційні сигнали, наприклад, зображення смуг Кікучі, несуть цінну інформацію про структурні характеристики досліджуваних кристалів. X-променеві сигнали, наприклад криві повного зовнішнього відбивання, описують параметри шорсткості поверхні зразків. Однак на даний час ще не вирішена задача отримання максимально повної інформації про досліджувані зразки на основі експериментальних сигналів. Це пояснюється значними рівнями шумів і спотворень на таких сигналах, а також складністю отримання корисної інформації про досліджуваний об'єкт. Тому для отримання корисної складової сигналів використовуються різноманітні методи цифрового оброблення, а саме: методи фільтрації шуму, методи апроксимації сигналів та аналізу їх профілів, методи орієнтованої і вейвлет-фільтрації сигналів. До перспективних напрямів оброблення сигналів належить використання засобів штучного інтелекту, а саме штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів.

Перспективними методами оброблення сигналів у КІВС є багаторівневі, в яких, крім початкового сигналу, створюється множина додаткових рівнів, наприклад, додатковими рівнями може бути сигнал у зменшених масштабах. На такому багатомасштабному обробленні засновані вейвлет-перетворення сигналів. Як додаткові рівні сигналів також використовуються їх різні частотні діапазони, обвідні мінімумів і максимумів сигналу тощо. Багаторівневі методи, порівняно з однорівневими, мають більші можливості, але вони є складнішими в реалізації, а для багатьох прикладних задач цифрового оброблення сигналів багаторівневі методи знаходяться на стадії розроблення.

Багаторівневе оброблення сигналів реалізується комплексом взаємодоповнюючих методів, кожен з яких виконує певний етап оброблення сигналів: фільтрацію шумів, апроксимацію сигналів, аналіз їх спектрів і профілів та ін. Як перший етап цифрового оброблення сигналів звичайно використовується обчислення рівня шуму та його видалення. На даний час застосовуються такі методи оцінювання рівня шуму: засновані на фільтрації, блокові методи, метод головних компонент, статистичні методи, методи з використанням вейвлет-перетворень та Фур'є-спектрів зображень. Основним недоліком вищевказаних методів є їх значна похибка у випадку присутності на зображеннях текстур або кількох типів шуму, тому існує потреба у розробленні високоточного методу обчислення рівня шуму.

Існуючі методи фільтрації сигналів поділяються на лінійні та нелінійні. Головним недоліком поширеного лінійного фільтра Гауса є розмиття контурів зображень. Нелінійні фільтри, наприклад медіанні та білатеральні фільтри, менше згладжують контури зображень, однак для них вибір оптимальних параметрів фільтрації є складнішим. Тому експериментальні сигнали доцільно обробляти багаторівневими методами з використанням як нелінійних, та і лінійних фільтрів.

З метою збільшення роздільної здатності експериментальних сигналів виконується їх апроксимація. Методи лінійної апроксимації часто обмежують екстремуми сигналів, а складніші методи, зокрема з використанням кубічних сплайнів, навпаки, спричиняють появу паразитних осциляцій на апроксимованому сигналі. Перспективними є багаторівневі методи апроксимації сигналів, в яких на основі початкового апроксимованого сигналу обчислюється коректований, наприклад, шляхом згладжування.

Для більшості електронно-дифракційних та X-променевих зображень є характерними смугоподібні об'єкти, наприклад, для зображень смуг Кікучі та X-променевих муарових зображень, тому для таких зображень доцільно проводити орієнтовану локальну фільтрацію. Проте, існуючі однорівневі методи оброблення електронно-дифракційних сигналів дозволяють обчислювати структурні характеристики досліджуваних кристалів із відносно похибкою $\sim 10^{-4}$, а для вирішення практичних завдань потрібна на порядок вища точність.

Експериментальні сигнали, наприклад, X-променеві медичні зображення, часто є просторово-неоднорідними, тому методи оптимізації локального контрасту є ефективними для підвищення інформативності таких сигналів. Відомі однорівневі методи підвищення локального контрасту X-променевих зображень характеризуються значним часом оброблення, який може складати десятки хвилин для HD зображень, тому актуальним завданням є підвищення швидкодії таких методів.

Підсумовуючи вищенаведене, прикладна науково-технічна проблема формулюється так: існуючі однорівневі методи цифрового оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у більшості випадків не забезпечують потрібної точності та швидкодії. Тому для вирішення цієї актуальної проблеми існує необхідність у розробленні багаторівневих методів і засобів аналізу, оброблення та синтезу електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

У роботі використано досягнення вітчизняних та закордонних вчених, прізвища яких наведено в дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі комп'ютерних систем та мереж й на кафедрі фізики твердого тіла Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича згідно з планом держбюджетних науково-дослідних тем, зокрема:

- «Базовий модуль цифрової обробки інформації комп'ютеризованої системи екологічного моніторингу параметрів довкілля» (2013-2014 рр., № держреєстрації 0113U003238);

- «Апаратно-програмні засоби підвищення ефективності та надійності обробки даних і захисту інформації в розподілених комп'ютерних системах і мережах» (2011-2015 рр., № держреєстрації 0111u004784);
- «Мультифункціональний адаптивно реконфігуровний модуль цифрової обробки інформації для задач медико-екологічного і технологічного профілю» (2015-2016 рр., № держреєстрації 0115U003239);
- «Структурні та електрофізичні характеристики напівізолюючих кристалів матеріалів A^2B^6 ($CdTe$, $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x}Zn_xTe$) після впливу зовнішніх чинників» (2016-2018 рр., № держреєстрації 0116U001451);
- «Високопродуктивні комп'ютерні засоби і системи багатомасштабної і багатопараметричної ідентифікації та обробки інформації в режимі реального часу» (2016-2020 рр., № держреєстрації 0116u007043);
- «Х-променево-оптична томографія полікристалічних мереж біологічних шарів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U001149).

У вищевказаних темах дисертант брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні точності та швидкодії оброблення електронно-дифракційних та Х-променевих сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах за рахунок використання багаторівневих методів.

Досягнення мети передбачало виконання нижчевказаних **завдань**:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів оброблення електронно-дифракційних та Х-променевих сигналів у КІВС для визначення основних напрямів підвищення їх точності та швидкодії.
2. Розробити теоретичні основи багаторівневого оброблення сигналів, що забезпечують реалізацію ефективних методів фільтрації, апроксимації, локального оброблення і аналізу сигналів та зображень.
3. Розробити структуру, апаратне і програмне забезпечення для КІВС на базі Х-променевих дифрактометрів та електронних мікроскопів.
4. Розробити високоточний метод обчислення усереднених профілів зображень шляхом їх декомпозиції і синтезу; дослідити існуючі методи апроксимації сигналів, розробити високоточні методи їх багаторівневої апроксимації.
5. Дослідити існуючі методи підвищення візуальної якості зображень, розробити швидкодійний метод підвищення локального контрасту та видалення неоднорідного фону зображень і сигналів.
6. Розробити високоточні методи оброблення сигналів, які призначені для суміщення зображень за допомогою генетичних алгоритмів та аналізу параметрів сигналів за допомогою штучних нейронних мереж.
7. Розробити високоточний багатомасштабний метод аналізу спектрів експериментальних зображень.
8. Підвищити стійкість до шумів методу Хафа при детектуванні просторового положення об'єктів на зображеннях, удосконалити існуючі методи фільтрації зображень з метою зменшення розмиття контурів.
9. Розробити високоточні методи розв'язання оберненої задачі при обчисленні параметрів досліджуваних зразків на основі експериментальних сигналів, виконати програмну реалізацію й апробацію розроблених методів.

Об'єктом дослідження є процес оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

Предметом дослідження є багаторівневі методи і засоби аналізу, оброблення та синтезу електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: теорія числових методів; теорія алгоритмів; теорія інтерполювання функцій; теорія ймовірностей; методи аналітичної геометрії і лінійної алгебри, диференціального й інтегрального числення; методи фільтрації сигналів у просторовій і частотній областях, метод обчислення рівня шумів на зображеннях; штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає в розробленні теоретичних основ і методів багаторівневого аналізу сигналів, що забезпечує вирішення актуальної проблеми підвищення точності та швидкодії оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

1. Вперше запропоновано концепцію багаторівневого оброблення сигналів у КІВС, яка полягає в обчисленні та аналізі додаткових рівнів сигналів, комплексному та поетапному обробленні сигналів множиною взаємопов'язаних методів, що забезпечує підвищення їх швидкодії або точності на порядок.

2. На основі запропонованої концепції вперше розроблено теоретичні основи аналізу та синтезу профілів розподілу інтенсивності експериментальних зображень, що містять новий метод. Характерною особливістю розробленого методу є використання конічних перерізів як обвідних серії профілів і селекція профілів на основі їх форми, що забезпечує підвищення точності визначення параметрів усереднених профілів на порядок.

3. Вперше запропоновано високоточні методи багаторівневої інтерполяції, в яких інтерпольовані одновимірні та двовимірні сигнали складаються з коректованої та узгоджувальної функцій, а коректована функція обчислюється з використанням згортки кускових поліноміальних функцій (сплайнів), що дозволяє в середньому на 16% зменшити похибку інтерполяції при підвищенні роздільної здатності експериментальних сигналів.

4. Вперше розроблено швидкодійний метод підвищення локального контрасту та видалення неоднорідного фону зображень, особливістю якого є використання коректованих обвідних мінімумів і максимумів сигналів, що забезпечує підвищення локального контрасту відновлених електронно-дифракційних і X-променевих зображень до 8 разів.

5. Розроблено нові методи орієнтованої фільтрації зображень у просторовій і частотній областях, характерною особливістю яких є визначення напрямку фільтрації в межах локальних вікон на основі контурів зображення, що дозволяє видаляти на зображеннях шум при незначному розмитті контурів і до 7 разів підвищувати точність обчислення геометричних параметрів профілів смуг.

6. Вперше розроблено метод суміщення зображень об'єктів із використанням генетичного алгоритму, який враховує різницю між зображеннями за яскравістю, контрастом, масштабом, зсувом і поворотом, забезпечує підвищену точність ($\approx 0.01\%$ за масштабом) та швидкодію суміщення зображень.

7. Вперше запропоновано метод багаторівневого аналізу енергетичних спектрів зображень, зокрема, X-променевих муарових зображень, особливістю якого є використання багатомасштабного оброблення енергетичних спектрів, що забезпечує до 2 разів вищу точність вирішення оберненої задачі при обчисленні параметрів досліджуваних зразків.

8. Подальшого розвитку отримали:

- метод детектування просторового положення об'єктів на зображеннях за допомогою перетворення Хафа, а саме, положення відрізків прямих, кіл та еліпсів, який відрізняється від відомих низькочастотною фільтрацією зображення та акумулятора методу Хафа, що дозволяє отримати субпіксельну точність визначення координат об'єктів;
- високоточний метод автоматичного визначення рівня гаусового шуму, який відрізняється від відомих виділенням ділянки інтересу з врахуванням контурів зображення, що забезпечує на $\approx 0.1\%$ меншу похибку обчислення рівня шуму порівняно з методами-аналогами;
- метод автоматичної фільтрації гаусового шуму на зображеннях із використанням фільтра Гауса, який відрізняється від відомих локальним обробленням зображень у ділянках, обмежених контурами, що забезпечує квазіоптимальний результат фільтрації та, в середньому, в 2 рази вищу швидкодію, порівняно з нелінійними методами-аналогами;
- високоточний метод вейвлет-фільтрації з використанням сімейства біортогональних вейвлетів, який відрізняється від відомого поетапною фільтрацією шуму та видаленням неоднорідного фону, що до 2 разів підвищує точність визначення структурних параметрів досліджуваних кристалів;
- швидкодійний метод використання ШНМ для визначення структурних параметрів зразків на основі експериментальних X-променевих сигналів, який відрізняється від відомих навчань ШНМ для різних масштабів вхідних сигналів, що забезпечує, в середньому, в 2 рази менший час навчання;
- високоточний метод деконволюції зображень, який відрізняється від відомого використанням як функції розсіяння точки орієнтованого двовимірного розподілу Гауса, що дозволяє до 1.5 рази підвищити просторове розділення смуг.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних положень та методів розроблено:

- апаратне і програмне забезпечення КІВС на базі X-променевих дифрактометрів ДРОН-3М та ДРОН-4, завдяки чому комп'ютеризовано процес отримання експериментальних X-променевих сигналів;
- програмний комплекс для оброблення електронно-дифракційних зображень в КІВС на базі електронного мікроскопу, який забезпечує квазіоптимальне видалення шумів, багаторівневу інтерполяцію та усереднення профілів зображень, визначення положення і параметрів смуг Кікучі, що дозволяє на порядок підвищити точність обчислення параметрів досліджуваних кристалів, наприклад, значень локальних деформацій; отримані параметри кристалів, зокрема, кристалів штучного алмазу, кремнію, германію і сплавів нікелю, є важливими для вдосконалення технологій їх синтезу;

- програмний комплекс для оброблення X-променевих сигналів у КІВС на базі X-променевих дифрактометрів, який виконує видалення неоднорідного фону, багаторівневу інтерполяцію та вейвлет-фільтрацію сигналів, що дозволяє підвищити швидкодію та (або) точність обчислення параметрів шорсткості поверхні та структурних параметрів для досліджуваних зразків;
- програмний комплекс для оброблення X-променевих муарових зображень, який виконує видалення шумів, підвищення локального контрасту і аналіз енергетичних спектрів зображень, що забезпечує підвищення швидкодії та (або) точності обчислення деформацій для досліджуваних кристалів.

Розроблені програмні комплекси застосовано в системах підтримки прийняття рішення для КІВС на базі електронних мікроскопів та X-променевих дифрактометрів. Достовірність результатів теоретичних досліджень та їх практичну цінність підтверджено трьома патентами на корисну модель [31]-[33].

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Центрі колективного користування приладами НАН України; Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ); Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ); Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ).

Теоретичні та практичні результати роботи використані при викладанні дисциплін «Пристрої зв'язку з об'єктом» та «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» (ЧНУ), а також при виконанні держбюджетних тем на кафедрі комп'ютерних систем та мереж й на кафедрі фізики твердого тіла ЧНУ.

Особистий внесок здобувача

За час підготовки дисертаційної роботи здобувач брав участь у розробленні теоретичних основ та програмній реалізації методів оброблення сигналів. Усі основні результати дисертаційної роботи, яка винесена на захист, отримані здобувачем самостійно. У роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачу належить: [1] – опис схем експерименту для X-променевих методів; [30] – метод обчислення рівня гаусового шуму на зображенні з врахуванням його контурів; [29], [47], [50] – алгоритм видалення гаусового шуму на зображенні з врахуванням його контурів; [22], [23], [25] – створення апаратно-програмного комплексу для автоматизації експерименту на X-променевих дифрактометрах ДРОН-3М, ДРОН-4; [24], [31], [32], [34] – метод багаторівневої апроксимації електронно-дифракційних та X-променевих сигналів, сигналів багатопараметричних сенсорів; [27], [35], [43], [44], [46] – розроблення та програмна реалізація методу підвищення локального контрасту сигналів; [4], [41], [49] – метод суміщення зображень шляхом геометричних перетворень та перетворень яскравості; [3], [10], [12], [13], [15], [17], [19]-[21], [26], [38], [39] – розроблення та програмна реалізація методів обчислення й аналізу профілів зображень; [6], [7], [9], [11], [16], [33], [40] – метод обчислення й аналізу радіальних розподілів енергетичного та Фур'є-спектрів зображень; [28], [45] – розроблення та програмна реалізація методів орієнтованої фільтрації зображень; [8], [36], [37] – програмна реалізація вейвлет-фільтрації X-променевих сигналів; [2], [5], [18], [48] – аналіз параметрів X-променевих сигналів, аналіз та розпізнавання сигналів за допомогою ШНМ; [14], [42] – розроблення та програмна реалізація методу суміщення зображень за допомогою генетичного алгоритму.

Апробація матеріалів дисертації

Результати досліджень, що становлять основу дисертації, доповідались і обговорювались на 27 конференціях, тези доповідей опубліковані у збірниках праць відповідних конференцій:

1. II, III, IV, V Міжнародні науково-практичні конференції «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» «ПІКТ – 2012», «ПІКТ – 2014», «ПІКТ – 2015», «ПІКТ – 2016» (Чернівці, 2012, 2014, 2015, 2016).

2. II, V, VI, VII Українські наукові конференції з фізики напівпровідників «УНКФН-2», «УНКФН-5», «УНКФН-6», «УНКФН-7» (Чернівці - Вижниця, 2004; Ужгород, 2011; Чернівці, 2013; Дніпро, 2016).

3. X, XI, XII, XIII, XV, XVI міжнародні конференції з фізики і технології тонких плівок та наносистем (Івано-Франківськ, 2005, 2007, 2009, 2011, 2015, 2017).

4. 11th, 12th, 13th, 14th Biennial Conferences on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging “X-Top 2012”, “X-Top 2014”, “X-Top 2016”, “X-Top 2018” (St. Petersburg, Russia, 2012; Villard de Lans, France, 2014; Brno, Czech Republic, 2016; Bari, Italy, 2018).

5. V, VII, VIII Национальные конференции «Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования материалов» «РСНЭ НАНО-2005» (Москва, Россия, 2005, 2009, 2011).

6. 16 Міжнародна конференція з автоматичного управління „АВТОМАТИКА-2009” (Чернівці, 2009).

7. Международная конференция „Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании” (Одесса, 2007).

8. IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology «ELNANO-2015» (Kyiv, Ukraine, 2015).

9. Міжнародна науково-практична конференція «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях» (Чернівці, 2017).

10. II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017 (Дніпро, 2017).

11. The First International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2018), (Kiev, Ukraine, 2018).

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 68 наукових робіт, із них 29 статей у фахових виданнях, 30 доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, 5 доповідей у матеріалах всеукраїнських конференцій, 3 патенти на корисну модель, 12 робіт у міжнародних виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 452 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (314 найменувань) і 5 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 309 сторінок друкованого тексту. Робота містить 241 рисунок і 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми досліджень, сформульовані мета й основні завдання досліджень, вказані наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведені дані про апробацію та структуру роботи, особистий внесок автора та публікації.

У **першому розділі** розглянуто принципи отримання електронно-дифракційних сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах (КІВС) на основі електронного мікроскопу (рис. 1), а також принципи отримання X-променеви́х сигналів і зображень у КІВС на основі X-променевого дифрактометра (рис. 2). У розглянутих КІВС програмне оброблення експериментальних цифрових зображень f_n розміром $M \times N$ пікселів передбачає їх запис в матрицю $f_n = (f_n(i, k))$, де $i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N$.

Проведено аналіз існуючих методів і засобів оброблення електронно-дифракційних та X-променеви́х сигналів для визначення основних напрямів підвищення їх точності та швидкодії з врахуванням шумів, контрасту та інших особливостей експериментальних сигналів.

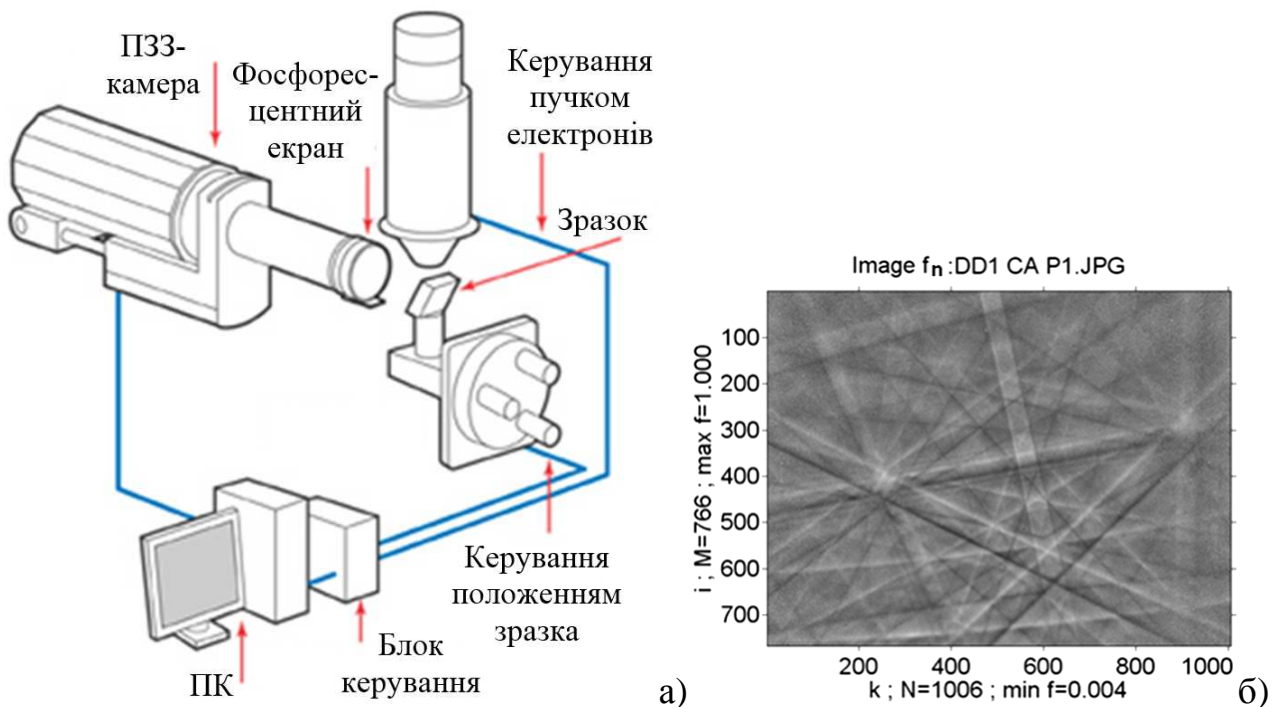


Рисунок 1 – Схема КІВС на базі електронного мікроскопу «Zeiss EVO 50» (а), призначеної для отримання електронно-дифракційних зображень (б)

Встановлено, що на експериментальних електронно-дифракційних зображеннях (зображеннях смуг Кікучі) та X-променеви́х сигналах присутні значні рівні імпульсного і гаусового шумів, що знижує точність обчислення параметрів для досліджуваних зразків. Аналіз існуючих методів оброблення сигналів показав, що імпульсний шум доцільно видаляти медіанним фільтром, а гаусовий шум – фільтром Гауса; для ефективно́ї фільтрації шуму потрібно попередньо максимально точно обчислити його рівень.

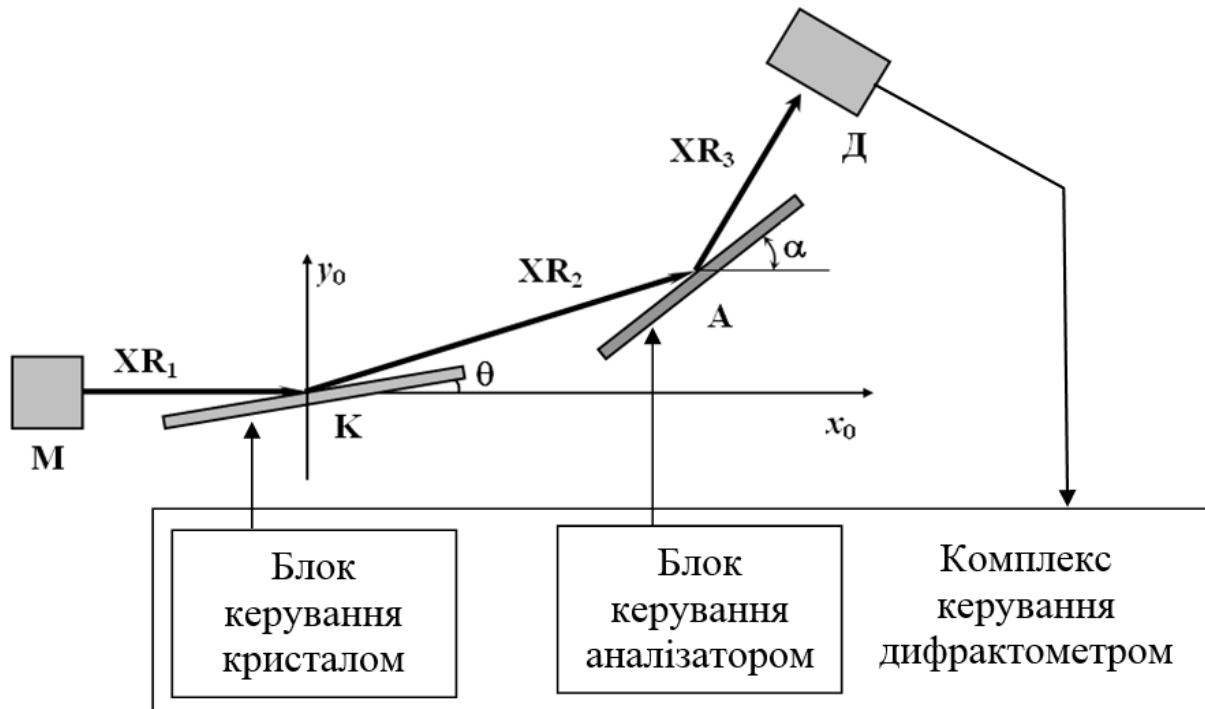


Рисунок 2 – Схема КІВС отримання сигналів на базі X-променевого дифрактометра ДРОН-3М: М – джерело X-променів, К – досліджуваний кристал, А – кристал-аналізатор, Д – детектор X-променів

Розглянуто принцип роботи методів оцінювання рівня шуму на зображенні, зокрема метод-аналог HLROI, який використовує високочастотну фільтрацію зображень при обчисленні шумової складової і виділення ділянки інтересу ROI (Region Of Interest), в якій переважає шумова складова. Показано, що точність методу знижується при обробленні сигналів із чіткими контурами.

Проаналізовано переваги та недоліки лінійних і нелінійних методів фільтрації шуму. Розглянуто метод-аналог фільтрації зображень, який використовує низькочастотний фільтр Гауса і виконує обчислення параметрів ядра фільтра Гауса на основі енергетичного спектра зображення, а саме метод LGFPS (Low-pass Gaussian Filter & Power Spectrum). Показано, що основним недоліком методу-аналогу є розмиття контурів у процесі фільтрації.

Проведено огляд основних методів інтерполяції сигналів, зокрема, за допомогою кубічних сплайнів. Встановлено, що недоліком поширеного методу інтерполяції за допомогою кубічних сплайнів є паразитні осциляції інтерпольованого сигналу.

Показано, що для підвищення візуальної якості X-променевих зображень доцільно застосовувати методи оптимізації локального контрасту і виділення неоднорідного фону, проте існуючі методи-аналоги мають низьку швидкодію.

Розглянуто метод фільтрації зображень з використанням орієнтованого фільтра Гауса. Показано, що найскладнішим завданням даного методу є коректний вибір напрямку фільтрації для кожної локальної ділянки зображення.

Проаналізовано способи детектування відрізків прямих, кіл і еліпсів на зображеннях за методом Хафа. Зроблено висновок, що недоліком методу Хафа є значна залежність його результатів від рівня шуму на зображенні.

Розглянуто принципи роботи багатомасштабних методів оброблення сигналів, зокрема, методу вейвлет-перетворень. Показано, що перспективним напрямом підвищення точності та швидкодії оброблення сигналів є застосування багаторівневого підходу.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи та методи багаторівневого оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

Вперше запропоновано концепцію багаторівневого підходу до оброблення експериментальних сигналів у КІВС. Згідно із запропонованою концепцією вибирається задача цифрового оброблення сигналів, із врахуванням якої уточнюються експериментальні умови отримання початкових сигналів. На основі аналізу параметрів сигналу та з врахуванням задачі його оброблення визначається, які додаткові рівні сигналу потрібно створити. Сигнали кожного рівня оброблюються відповідними методами (наприклад, фільтрації в просторовій і частотній областях, апроксимації поліномами, підвищення контрасту та ін.). В результаті синтезу множини сигналів, обчислених на всіх рівнях, отримується вихідний сигнал.

При обробленні електронно-дифракційних та X-променевих сигналів до найбільш інформативних параметрів сигналів належать:

1. Амплітудні параметри (середнє квадратичне відхилення (СКВ) шуму σ_N , СКВ корисного сигналу σ_S).
2. Частотні параметри (середні просторові частоти).
3. Просторові параметри (середні просторові періоди).
4. Кутові параметри (напрямок контурів α , орієнтація головної осі інерції).
5. Критерії якості сигналу (суб'єктивні та об'єктивні).

При обробленні сигналів у КІВС створюються додаткові рівні сигналу, які відрізняються від початкового сигналу за такими характеристиками:

1. Масштабом – масштабування сигналу на додаткових рівнях здійснюється вздовж певних осей координат.
2. Просторовими параметрами – з локалізацією особливих точок зображення (наприклад, координат центрів перетинів смуг) та з локалізацією ділянок зображення (наприклад, на додаткових рівнях зображення ділиться на вікна).
3. Амплітудними параметрами – як додаткові рівні використовуються обвідні екстремальних значень яскравості зображення у межах вікон.
4. Частотними параметрами – на додаткових рівнях будується карта просторового розподілу середніх частот зображення.
5. Кутовими параметрами – на додаткових рівнях будується карта просторового розподілу орієнтації контурів або текстур зображення.
6. Методами обчислення – додаткові рівні обчислюються різними методами (наприклад, апроксимації).

Використання багатьох рівнів сигналу дозволяє проводити глибший аналіз сигналів, підвищити швидкодію та (або) точність їх оброблення.

Одержав подальшого розвитку високоточний багаторівневий метод обчислення рівня гаусового шуму на зображеннях, який описується його СКВ.

Запропонований метод отримано шляхом модифікації методу-аналогу HLROI, відповідно, до якого виконується зчитування початкового зображення f_n , створення ядер w_H та w_L високочастотного та низькочастотного фільтрів, обчислення шумової складової f_h та її модуля f_d , усередненого зображення рівня шуму f_{dc} і СКВ σ_h гістограми зображення f_h , ітераційне уточнення ділянки інтересу ROI. Новизна запропонованого методу полягає в обчисленні додаткового рівня – контурів g_c зображення, а також у врахуванні контурів при уточненні ділянки ROI. У результаті розроблено багаторівневий метод HLROIC (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest&Contour) визначення СКВ шуму, який використовує високочастотну і низькочастотну фільтрації зображень, а також контури зображення при уточненні ROI.

Згідно з запропонованим алгоритмом до ділянки інтересу ROI додаються тільки ті піксели зображення, які не належать контурам g_c . На основі уточненого СКВ σ_{hs} гістограми зображення f_h обчислюється експериментальне значення СКВ шуму σ_{NE}

$$\sigma_{NE} = (100\sigma_{hs} - \sigma_{min2})^{k_{sh2}}, \quad (1)$$

де коефіцієнти $\sigma_{min2} = 0.02$ та $k_{sh2} = 1.01$.

Проведено обчислення експериментального рівня σ_{NE} гаусового шуму для тестової множини зображень бази BSDS300 (табл. 1). Для оцінювання точності розробленого методу HLROIC використано корінь середньої квадратичної похибки (КСКП) R_{MSE} (Root Mean Square Error), яка обчислюється між значеннями σ_{NE} та σ_N для всіх тестових зображень, а також σ_{NEA} – середнє значення σ_{NE} . Найбільшу точність обчислення рівня шуму досягнуто для порогу $T_S = 0.08$ при виділенні контурів зображення методом Собеля. Запропонованим методом отримано меншу середню похибку $R_{MSE} = 0.210$, ніж похибки методів-аналогів. У випадку зображень з чіткими контурами похибка запропонованого методу в кілька разів менша, ніж методу-аналогу HLROI.

Таблиця 1 – Похибки обчислення експериментального СКВ σ_{NE} (%) гаусового шуму різними методами для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300, до яких додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ_N

σ_N , %	Методи-аналоги						Запропонований метод HLROIC			
	Статистичний метод		PCAP		HLROI		$T_S = 0.1$		$T_S = 0.08$	
	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}	σ_{NEA}	R_{MSE}
1	2.151	2.011	1.068	0.304	1.000	0.210	1.059	0.203	1.004	0.192
5	4.994	1.445	5.022	0.263	5.003	0.164	4.978	0.218	4.950	0.197
10	9.737	1.61	10.052	0.264	10.025	0.221	9.986	0.224	10.012	0.230
15	14.626	1.634	15.035	0.264	14.957	0.236	15.054	0.220	15.062	0.229
20	19.559	1.678	20.009	0.288	20.019	0.222	19.960	0.201	19.930	0.197
1..20		1.686		0.277		0.212		0.213		0.210

За допомогою розробленого методу визначено рівень шуму для серії електронно-дифракційних зображень (рис. 3).

Одержав подальшого розвитку багаторівневий метод фільтрації імпульсного та гаусового шумів на зображеннях, який передбачає медіанну фільтрацію для видалення імпульсного шуму, видалення гаусового шуму фільтром Гауса та зменшення розмиття зображення в ділянці контурів (рис. 4). Обчислення рівня шуму σ_{NE0} на початковому зображенні f_n та рівня шуму σ_{NE} на зображенні f_{nm} виконується розробленим методом високочастотної фільтрації з врахуванням контурів зображення. Обчислення СКВ σ_{wRE} ядра фільтра Гауса та фільтрація зображення f_{nm} з ядром фільтра Гауса виконується згідно з методом-аналогом LGFPS, в результаті чого обчислюється фільтроване зображення g .

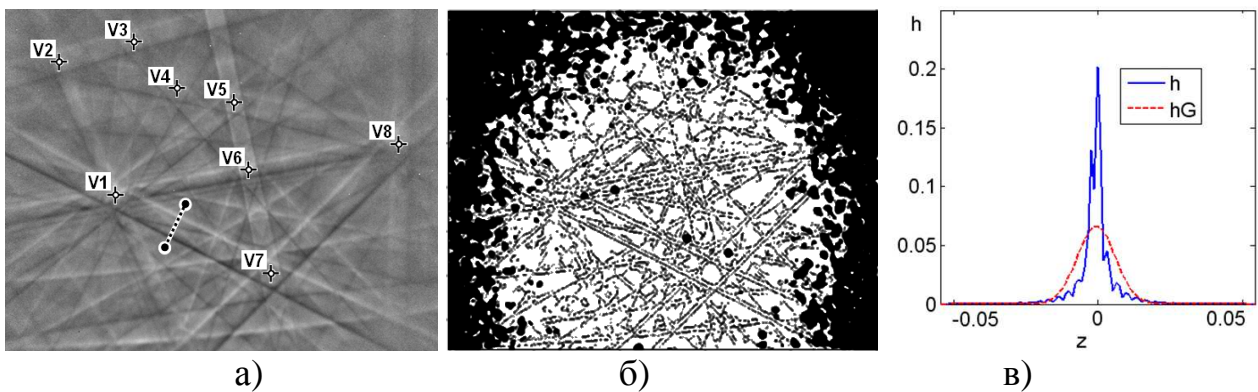


Рисунок 3 – Послідовність обчислення рівня гаусового шуму на зображенні смуг Кікучі: а) початкове зображення f_n ; б) зображення ROI; в) гістограма $h(z)$ зображення f_n , $\sigma_h = 0.00657$, h_G – розподіл Гауса з СКВ σ_h , який апроксимує $h(z)$

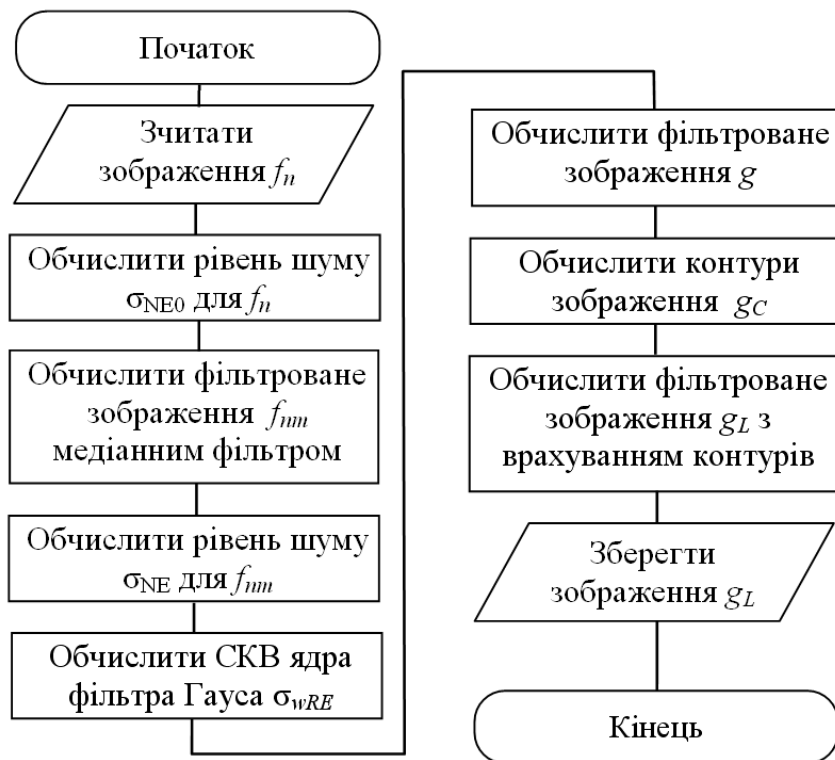


Рисунок 4 – Схема алгоритму методу багаторівневої фільтрації шуму на зображеннях

Новизна запропонованого методу полягає в обчисленні фільтрованого зображення g_L з врахуванням додаткового рівня (контурів g_C , обчислених методом Собеля), яке виконується за формулою

$$g_L(i, k) = f_{nm}(i, k) \cdot g_C(i, k) + g(i, k) \cdot (1 - g_C(i, k)), \quad (2)$$

де $i = 1, \dots, M$; $k = 1, \dots, N$.

Така фільтрація для ділянок контурів зменшує розмиття зображення g_L , що покращує його візуальну якість. У результаті фільтрації серії експериментальних електронно-дифракційних зображень запропонованим методом збільшилося відношення сигнал/шум (до 12 разів). Пікове відношення сигнал/шум (ПВСШ) для розробленого методу менше оптимального ПВСШ приблизно на 0.1 дБ, тому розроблений метод фільтрації є квазіоптимальним.

Вперше запропоновано методи багаторівневої інтерполяції одновимірних і двовимірних сигналів, в яких інтерпольовані сигнали складаються з суми коректованої $g(x)$ та узгоджувальної $u(x, p)$ функцій. Інтерпольована функція $z(x)$ описується лінійною комбінацією функції $g(x)$, яка апроксимує експериментальні профілі $h(x)$, та функції $u(x, p)$, яка наближує значення функції $z(x)$ до h_p у вузлах інтерполяції p , тобто

$$z(x) = g(x) + u(x, p), \quad (3)$$

де p – номер вузла інтерполяції, для якого координата $x \in [x_p, x_{p+1}]$.

Як функцію $g(x)$ використано згладжувальні сплайни (Smoothing Spline), при обчисленні яких мінімізується вираз

$$k_S \cdot \sum_{p=1}^Q (h_p - g(x_p))^2 + (1 - k_S) \cdot \int_{x_1}^{x_Q} (g''(x))^2 dx, \quad (4)$$

де k_S – згладжувальний коефіцієнт, $0 \leq k_S \leq 1$; при $k_S = 0$ як $g(x)$ використовується лінійна функція, а при $k_S = 1$ – функція, близька до кубічного сплайну.

Як функцію $u(x, p)$ для вузлів інтерполяції p та $(p + 1)$ на напівінтервалі $[x_p, x_{p+1}]$ використано суму лінійних функцій, які приймають максимальне значення у вузлі і мінімальні значення – у сусідніх вузлах

$$u(x, p) = (h_p - g(x_p)) \cdot \left(\frac{x_m - x_1}{x_m} \right) + (h_{p+1} - g(x_{p+1})) \cdot \left(\frac{x_1}{x_m} \right), \quad (5)$$

де $x_m = (x_{p+1} - x_p)$ – відстань між вузлами інтерполяції p та $(p + 1)$;

$x_1 = (x - x_p)$ – відстань від поточної координати x до вузла p .

Такий метод обчислення функції $z(x)$ забезпечує усунення некоректних осциляцій між вузлами інтерполяції за рахунок адаптивного згладжування.

Переваги багаторівневої інтерполяції функцій продемонстровано на прикладі оброблення профілів смуг Кікучі (рис. 5). Профіль смуги $h(x)$ визначений у Q вузлах ($Q = 18$); початок і кінець еталонного профілю $e(x)$ такі ж, як для $h(x)$, але значення профілю $e(x)$ визначені в максимальній кількості точок $Q_e = 98$. Для оцінювання точності інтерполяції використано R_q – КСКП між профілями $e(x)$ та $z(x)$. У випадку лінійної інтерполяції піки і впадини сигналу некоректно обмежуються, наприклад, в ділянках 1 та 2 (рис. 5, а). При

інтерполяції кубічними сплайнами між вузлами інтерполяції виникають некоректні осциляції, наприклад, в ділянках 3 та 4 (рис. 5, б). Запропонований метод інтерполяції забезпечує найменшу похибку R_q , а результат інтерполяції $z(x)$ при цьому максимально наближений до $e(x)$ (рис. 5, в). Інтерпольовані запропонованим методом експериментальні профілі смуг Кікучі (рис. 5, г) використано для обчислення деформацій досліджуваних кристалів (рис. 6). Деформації ε обчислено на основі ширини смуги або через форму профілю смуги. Розроблені методи дозволяють на 16% зменшити похибку інтерполяції при підвищенні роздільної здатності експериментальних сигналів, наприклад, профілів смуг Кікучі та X-променевих сигналів.

Багаторівнева інтерполяція двовимірних сигналів (рис. 6, б) виконується за тими ж принципами, що й для одновимірних сигналів.

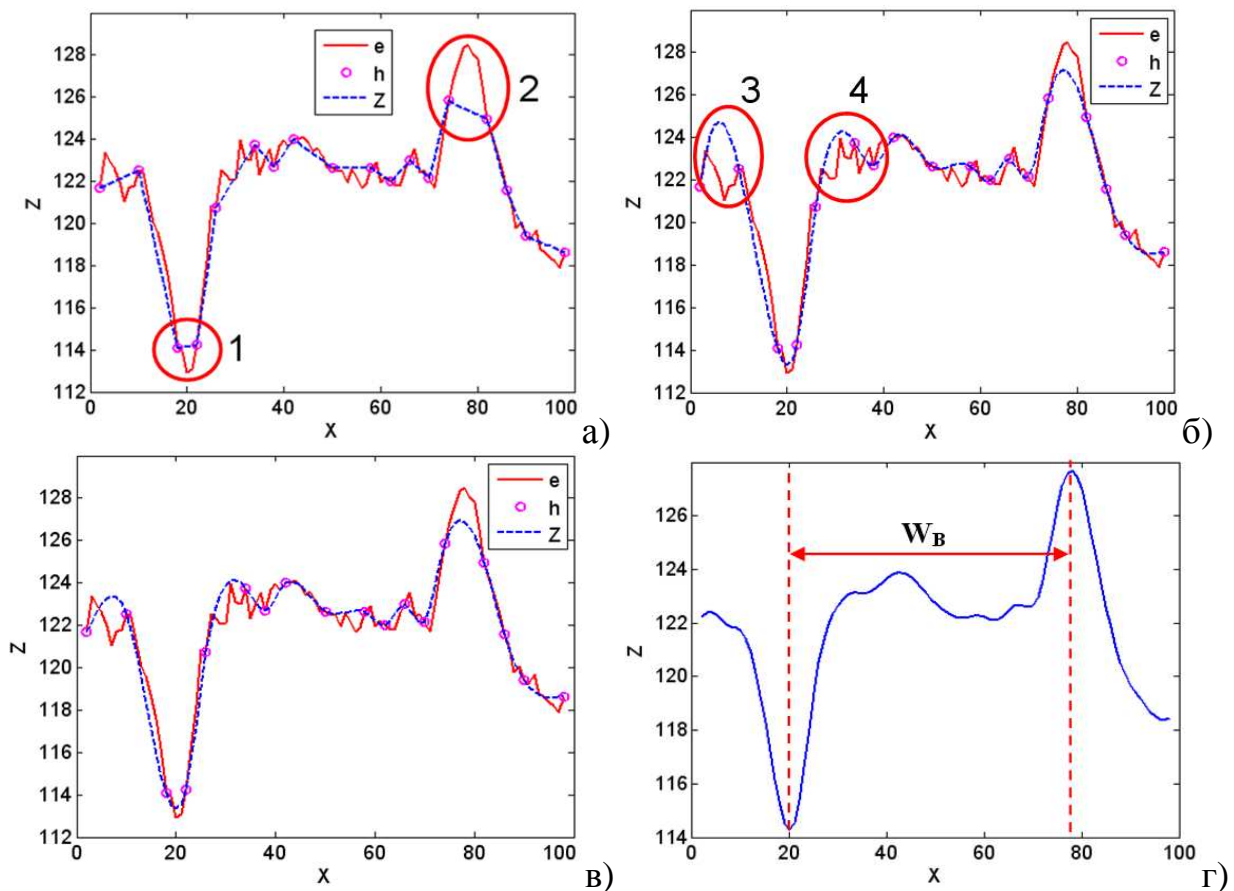


Рисунок 5 – Приклад інтерполяції профілю $h(x)$ смуги Кікучі (див. рис. 3, а): e – еталонний профіль $e(x)$; h – експериментальний профіль $h(x)$; z – результат інтерполяції $z(x)$; а) лінійна інтерполяція, $R_q = 0.89418$; б) інтерполяція кубічними сплайнами, $R_q = 0.90887$; в) запропонований метод інтерполяції, $R_q = 0.76657$ ($k_s = 0.5$); г) обчислення ширини смуги W_B для профілю $z(x)$ при $Q_e = 400$

Запропоновано нові методи багаторівневого аналізу енергетичних спектрів P_S зображень, зокрема X-променевих муарових зображень, які використовують багатомасштабне оброблення спектрів P_S . Спектри P_S муарових зображень чутливі до деформаційних полів досліджуваних кристалів, які описуються набором зосереджених сил з максимальним значенням P_{max} і сумарним P_{sum} .

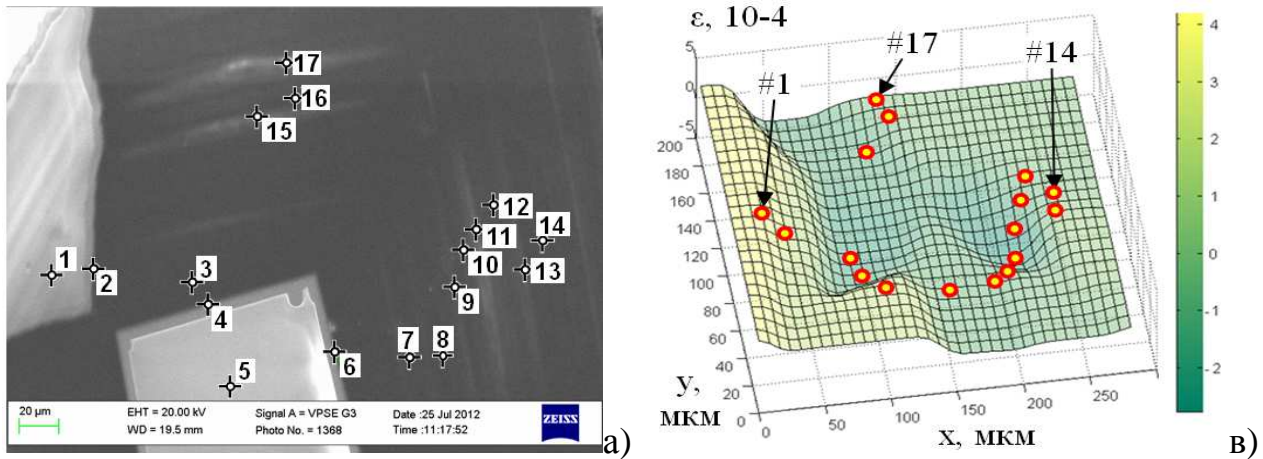


Рисунок 6 – Розподіл деформацій для кристалу алмазу №1: а) зображення фрагменту поверхні кристалу (280×180 мкм), отримане за допомогою електронного мікроскопу, положення ділянок №1-№17, для яких отримано зображення смуг Кікучі, показано маркерами; б) карта просторового розподілу деформацій ϵ кристалу, обчислена методом багаторівневої інтерполяції

Остаточний радіальний розподіл P_R отримується на основі енергетичного спектра P_{SC} для такого вертикального масштабу, при якому еліпсоподібні смуги спектра перетворюються в кола, що дозволяє підвищити точність обчислення P_R . Встановлено, що вибором оптимального масштабу зображення за шириною і висотою забезпечується мінімальне спотворення радіального розподілу P_R і, відповідно, висока точність вирішення оберненої задачі при обчисленні параметрів досліджуваних зразків. Запропонований метод забезпечує збільшення в 2 рази точності обчислення суми сил P_{sum} , які діють на досліджуваний кристал і спричиняють його деформації.

У третьому розділі розроблено методи багаторівневого аналізу, синтезу та локального оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів. Розроблено теоретичні основи та методи для аналізу (декомпозиції) і синтезу профілів розподілу інтенсивності експериментальних зображень, які засновані на використанні конічних перерізів як обвідних початків і кінців серії профілів та обчисленні усереднених (синтезованих) профілів на основі їх серії. Декомпозиція сигналів полягає у розбитті зображення смуги на множину профілів.

Для більшості експериментальних зображень початки і кінці профілів смуги описуються конічними перерізами (кривими другого порядку). У роботі запропоновано створити два нових рівня сигналу, а саме обвідні початків і кінців профілів, а далі на їх основі обчислювати серію профілів. Як обвідні серії профілів використано кола, еліпси, параболи та гіперболи, що дозволяє перетворити всі профілі смуги до одного масштабу і отримати максимальне відношення сигнал/шум для усередненого профілю. Ліва (Envelope L) і права (Envelope R) обвідні описуються Q_{BE} базовими точками кожна (рис. 7, а), які встановлюються користувачем або розраховуються через контури смуги.

Якщо кількість базових точок обвідної профілів $Q_{BE} > 3$, то кожна обвідна апроксимується дугою еліпса, параболи або гіперболи. Вибір конкретної кривої

другого порядку виконується на основі апріорних даних про цифрове зображення або на основі аналізу його смуг. Конічний переріз у полярній системі координат $\rho\varphi$ описується рівнянням

$$\rho = \frac{\mu}{1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi}, \quad (6)$$

де ρ – радіус; φ – полярний кут; μ – параметр конічного перерізу; ε – ексцентриситет ($0 \leq \varepsilon < 1$ для еліпса, $\varepsilon = 1$ для параболи, $\varepsilon > 1$ для гіперболи).

Згідно з розробленою математичною моделлю конічного перерізу в системі координат зображення ki координати його довільної точки $M(k_M, i_M)$ дорівнюють

$$k_M = k_F + \rho \cdot \cos \varphi = k_F + \frac{\mu \cdot \cos \varphi}{1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi}, \quad i_M = i_F + \rho \cdot \sin \varphi = i_F + \frac{\mu \cdot \sin \varphi}{1 - \varepsilon \cdot \cos \varphi}, \quad (7)$$

де k_F, i_F – координати полюсу системи координат $\rho\varphi$ в системі координат ki .

Параметри обвідної ($k_F, i_F, \mu, \varepsilon$) обчислюються методом координатного спуску шляхом мінімізації КСКП між обвідною та базовими точками.

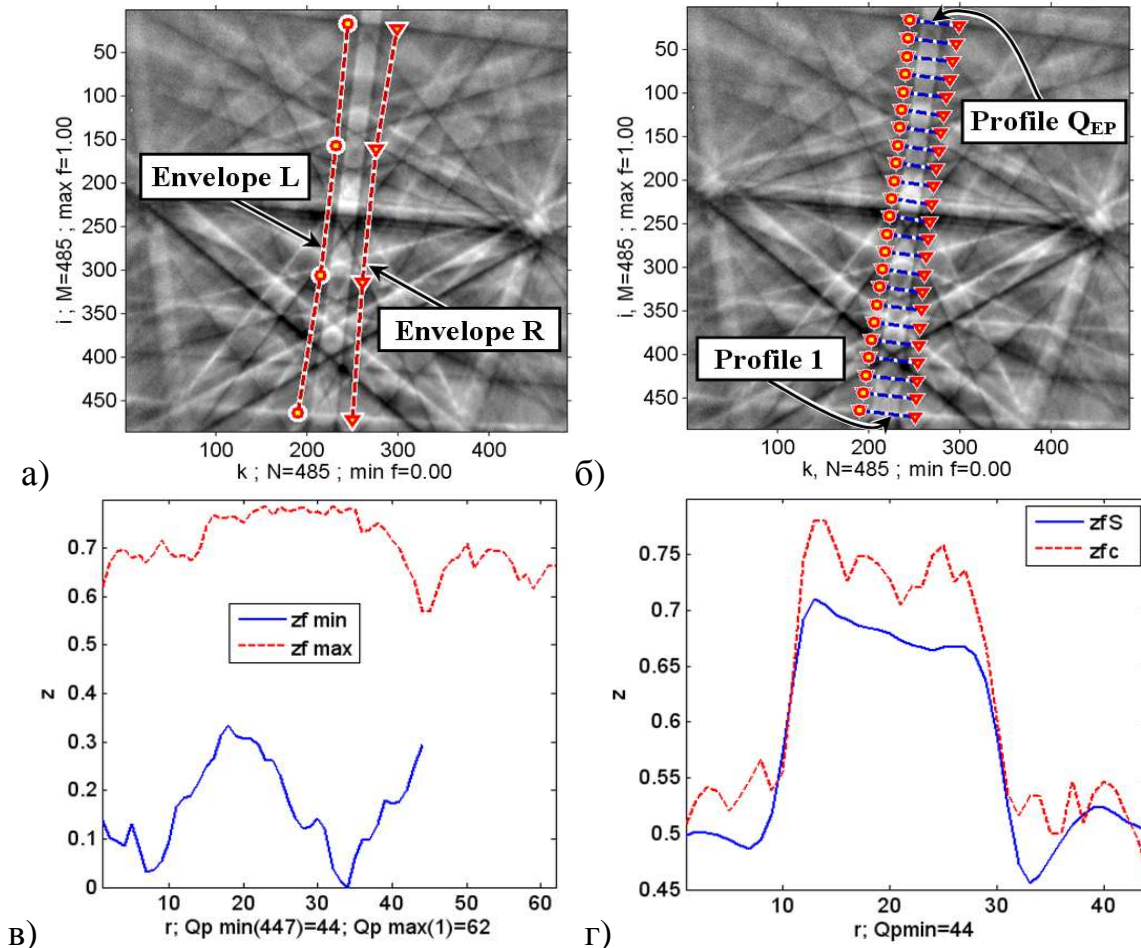


Рисунок 7 – Обчислення усередненого профілю експериментального зображення смуг Кікучі: а) виділення $Q_{BE} = 4$ базових точок для обвідних; б) обчислення серії з $Q_{EP} = 900$ профілів на основі обвідних (апроксимованих гіперболами, показано кожний 20-й профіль); в) профіль z_{fmin} з мінімальною довжиною Q_{pMin} та профіль z_{fmax} з максимальною довжиною Q_{pMax} ; г) профіль класу z_{fc} та усереднений профіль z_{fs} ; r – довжина профілю

Показано, що коректне усереднення серії з Q профілів в \sqrt{Q} разів зменшує рівень шуму. Наприклад, усереднення профілів запропонованим методом для експериментальних зображень смуг Кікучі дозволяє підвищити точність обчислення ширини смуг (у 10-12 разів) (рис. 7). Розроблені методи реалізують режим класифікації, в якому формування усередненого профілю виконується тільки на основі найменш спотворених профілів серії. Апробація розробленого методу проведена на прикладі модельованих зображень смуг Кікучі з гаусовим шумом (10%), при цьому за рахунок усереднення профілів збільшився їх корінь відношення сигнал/шум (в 24 рази).

Розроблено новий швидкодійний метод підвищення локального контрасту і видалення неоднорідного фону зображень (рис. 8), який використовує два додаткові рівні сигналу: обвідні мінімальних та максимальних значень у межах локальних вікон. При локальній обробці зображення ділиться на вікна w розміром $M_w \times N_w$ пікселів, сусідні вікна перекриваються за висотою на величину $M_{w2} = [M_w/2]$ та за шириною на величину $N_{w2} = [N_w/2]$. На основі мінімальних і максимальних (рис. 9, а) значень сигналу, обчислених в межах $Q_{kw} \times Q_{iw}$ вікон, шляхом апроксимації з використання кубічних поліноміальних функцій обчислюються нижня і верхня (рис. 9, б) обвідні сигналу відповідно.

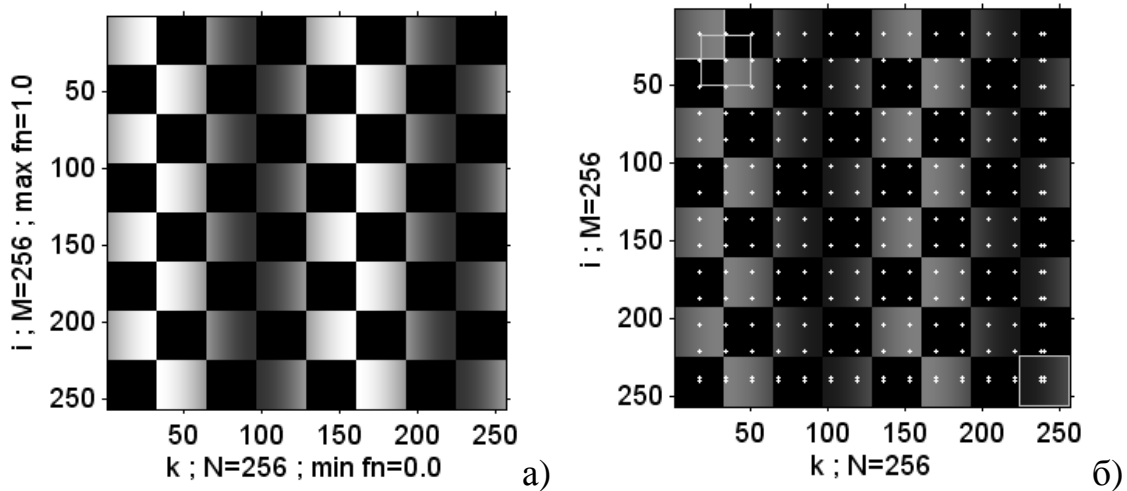


Рисунок 8 – Початкове зображення f_n (а) та поділ його на вікна w (б)

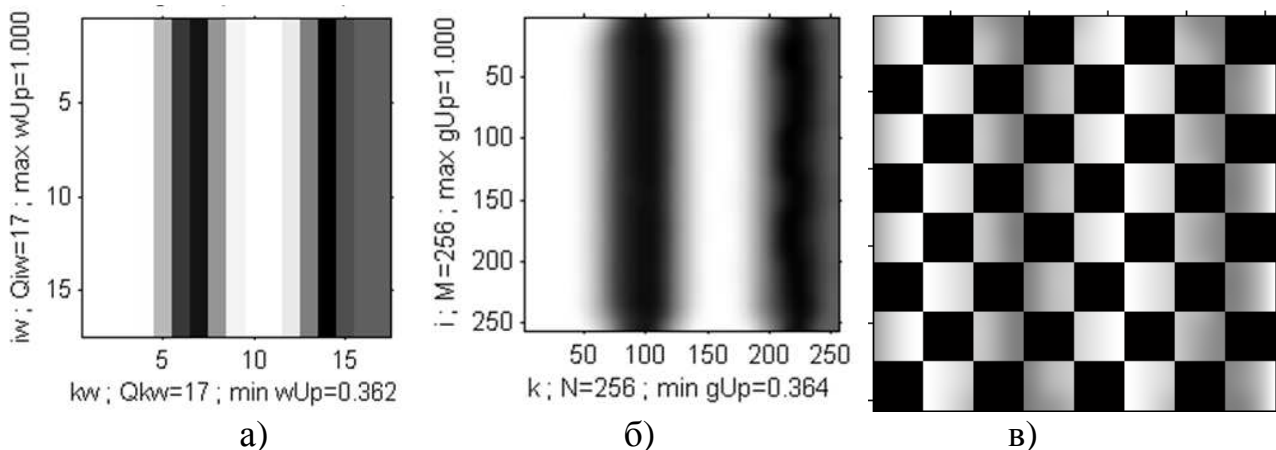


Рисунок 9 – Максимальні w_{Up} (а) значення яскравості зображення f_n (рис. 8) у межах вікон w ; б) верхня обвідна g_{Up} ; в) результат g

Для підвищення візуальної якості зображення-результату g (рис. 9, в) виконується корекція обвідних сигналів, отриманих для різних розмірів локальних вікон. Обчислення зображення g виконується за формулою

$$g(i, k) = (f_n(i, k) - g_{Dn}(i, k)) \cdot S_{c3}, \quad (8)$$

де S_{c3} – коефіцієнт контрасту, $S_c = 1/(g_{Up}(i, k) - g_{Dn}(i, k))$; для коефіцієнту контрасту S_{c3} встановлюється верхня межа $Scale_Max$; $i = 1, \dots, M$; $k = 1, \dots, N$.

Запропонований метод підвищення візуальної якості зображень значно збільшує їх деталізацію, наприклад, для електронно-мікроскопічних, оптичних або X-променевих зображень, що дозволяє розрізнити на них малопомітні, але важливі для подальшого аналізу деталі (рис. 10).

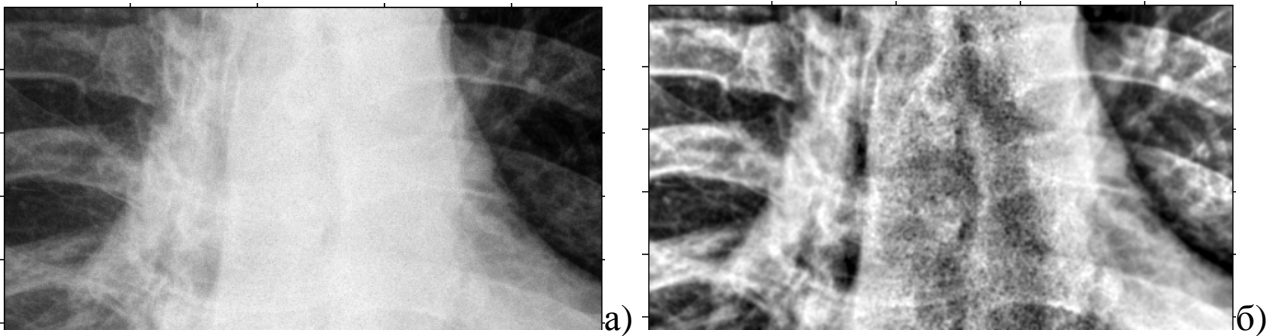


Рисунок 10 – Підвищення візуальної якості для X-променевого зображення хребта (260×470 пікселів): а) початкове зображення f_n ; б) результат g

Встановлено, що корекція обвідних дозволяє підвищувати локальний контраст зображень (в 5-8 разів) без появи помітних артефактів.

Уперше запропоновано математичну модель і метод адаптивної орієнтованої фільтрації зображень в просторовій області, який як ядро фільтра використовує орієнтований двовимірний розподіл Гауса (рис. 11). При орієнтованому згортанні зображень ядро фільтра Гауса $w_{OG} = (w_{OG}(u, v))$, де $u = 1, \dots, M_w$, $v = 1, \dots, N_w$, має переважну орієнтацію і описується виразом

$$w_{OG}(u, v) = \exp\left(-\frac{(a(v - v_c) + b(u - u_c))^2}{2\sigma_{w1}^2} - \frac{(c(v - v_c) + d(v - v_c))^2}{2\sigma_{w2}^2}\right), \quad (9)$$

де u, v – координати елементів ядра w_{OG} ;

σ_{w1} – СКВ ядра w_{OG} вздовж головної осі розподілу;

σ_{w2} – СКВ ядра w_{OG} перпендикулярно до головної осі;

a, b, c, d – коефіцієнти, які визначають напрямки розподілу.

Орієнтація розподілу w_{OG} (9) визначається напрямком головної осі, яка утворює з віссю v кут α (рис. 11). Коефіцієнти напрямку a, b, c, d обчислюються через кут α за формулами

$$a = \cos(\alpha), b = \sin(\alpha), c = -\sin(\alpha), d = \cos(\alpha). \quad (10)$$

Запропонований метод фільтрації дозволяє видаляти на зображеннях шум при допустимому розмитті контурів, оскільки фільтрація в основному відбувається вздовж напрямку контуру. Напрямок фільтрації в межах локальних вікон адаптується до напрямку контуру, для виділення контурів використано методи Собеля, Превітта або Кенні.

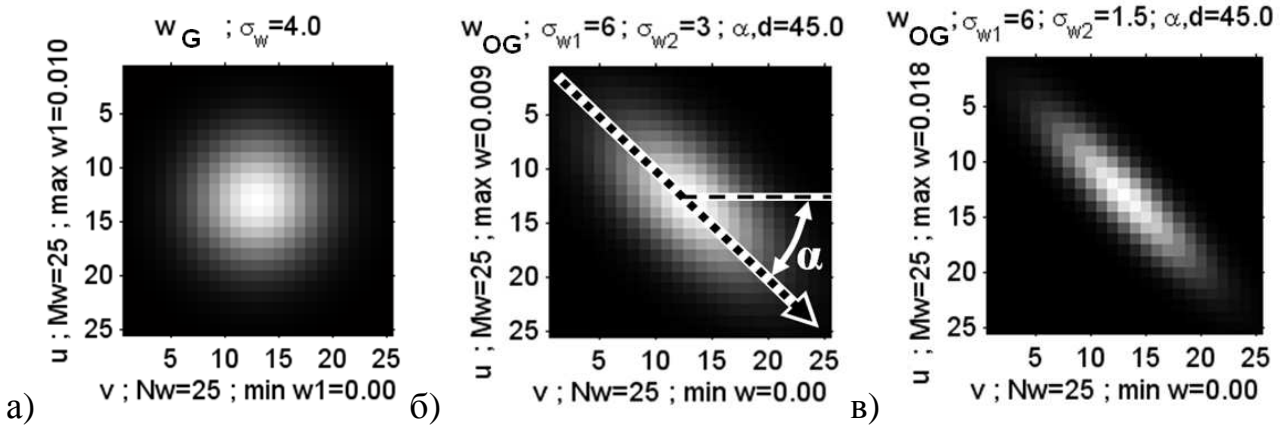


Рисунок 11 – Зображення ядер фільтрів:

- а) w_G – неорієнтований двовимірний розподіл Гауса, СКВ $\sigma_w = 4$;
 б) w_{OG} – орієнтований двовимірний розподіл Гауса, $\sigma_{w1} = 6.0$, $\sigma_{w2} = 3.0$, $\alpha = 45^\circ$;
 в) w_{OG} – орієнтований двовимірний розподіл Гауса, $\sigma_{w1} = 6.0$, $\sigma_{w2} = 1.5$, $\alpha = 45^\circ$

Адаптивна орієнтована фільтрація зображень полягає в тому, що параметри ядра фільтра w_{OG} адаптуються для кожного локального вікна f_w . У результаті такої адаптації змінюється орієнтація α ядра фільтра, СКВ ядра фільтра σ_{w1} та σ_{w2} . Обчислення локальної орієнтації ядра w_{OG} проводиться для кожного пікселя (i, k) зображення контурів g_c в межах вікна f_w з центром (i, k) і розмірами $M_w \times N_w$ пікселів. Багаторівневий підхід у запропонованому методі полягає в обчисленні контурів g_c і параметрів локальних вікон, на основі яких з високою точністю обчислюються параметри орієнтованого ядра w_{OG} .

Орієнтація контурів у межах вікна f_w визначається на основі дискретних центральних моментів $(\mu_{11}, \mu_{20}, \mu_{02})$ матриці f_{wn} (розміром $M_{un} \times M_{un}$ елементів, наприклад, $M_{un} = 5$), яка отримується усередненням розподілу значень матриці f_w навколо кожного пікселя контуру. Кут α орієнтації контурів та ексцентриситет E_C вікна f_w обчислюються через моменти μ_{11} , μ_{20} та μ_{02} матриці f_{wn}

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right), \quad E_C = \frac{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}{(\mu_{20} + \mu_{02})^2}. \quad (11)$$

Ексцентриситет E_C описує степінь орієнтації для розподілу інтенсивності в межах вікна: якщо існує чітка орієнтація – то $E_C \approx 1$, якщо у вікні присутні одночасно кілька напрямків – то $E_C \approx 0$, в проміжних випадках $E_C \approx 0.5$.

В результаті орієнтованої фільтрації (рис. 12) отримано зображення електронограми з видаленими дефектами і чітким контуром, що особливо помітно для профілю зображення (рис. 12, в).

Запропонований метод орієнтованої фільтрації може застосовуватися для підвищення візуальної якості не тільки електронограм, але й зображень різних типів з візуально помітними контурами. У випадку орієнтованої фільтрації зображень смуг Кікучі запропонований метод дозволяє підвищити точність обчислення ширини смуг (до 5 разів).

Уперше запропоновано математичну модель і метод орієнтованої фільтрації зображень смуг Кікучі в частотній області, який заснований на просторовому виділенні смуг на зображенні f_n та їх подальшій фільтрації.

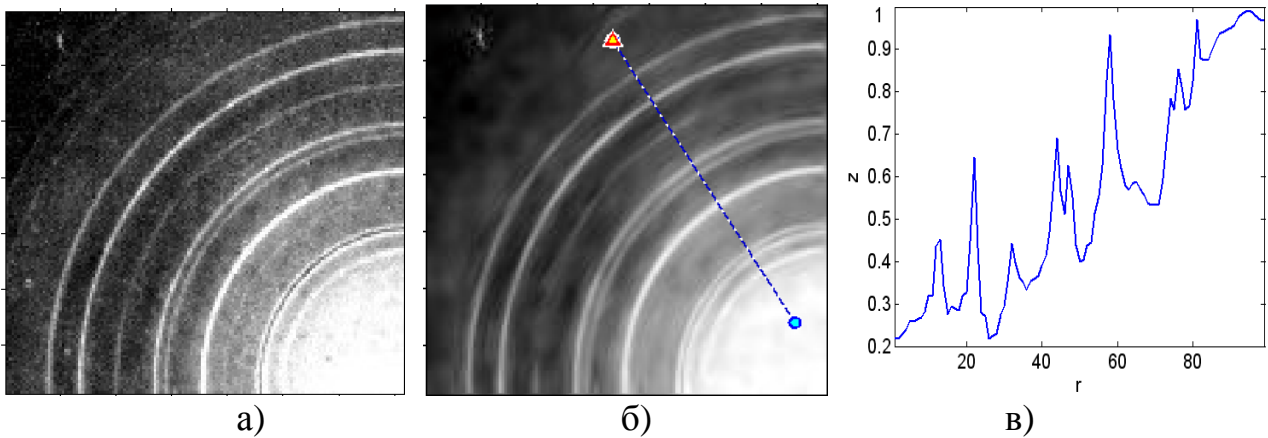


Рисунок 12 – Фільтрація фрагменту електронограми: а) початкове зображення f_n ; б) результат орієнтованої фільтрації g_s ; в) профіль зображення g_s

З врахуванням того, що межі смуг наближено описуються прямими лініями, розроблено математичну модель виділення смуги (рис. 13). Напрямок смуги в прямокутній системі координат xu вказується точками $P_1(x_{P1}, y_{P1}) - P_2(x_{P2}, y_{P2})$, які знаходяться на осі смуги. Нахил осі смуги P_1P_2 відносно горизонтальної осі координат x описується кутом α . Поперечний профіль $z(r)$ смуги Кікучі направлений вздовж осі r , яка перпендикулярна до осі смуги. Смуга Кікучі знаходиться між паралельними лініями a_1 та a_2 , а ширина смуги $D_A = 2R_{0A}$ вказується точками $A_1(x_{A1}, y_{A1})$ й $A_2(x_{A2}, y_{A2})$.

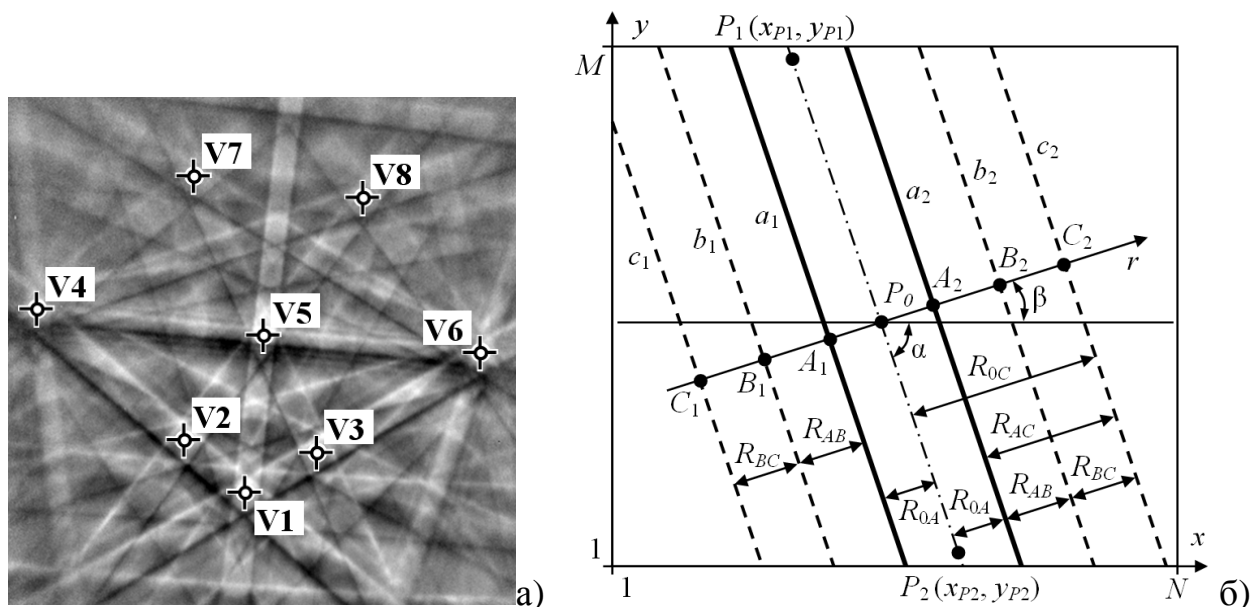


Рисунок 13 – Експериментальне зображення f_n смуг Кікучі (а) та геометричні параметри смуги (б), показані на прикладі смуги між вузлами V3 і V7 (рис. 13, а); центри вузлів V1 - V8 перетину смуг позначені маркерами «+»

З метою зменшення крайових ефектів на межі смуги при її фільтрації навколо зображення смуги створюється перехідна ділянка, яка складається з двох частин: перша обмежена прямими a_1 та c_1 , а друга – прямими a_2 и c_2 . Ділянка смуги Кікучі (обмежена лініями a_1 та a_2) разом з перехідною ділянкою

складають розширену ділянку смуги (обмежену лініями c_1 та c_2) (рис. 13, б). Для плавного виділення смуги в перехідній ділянці використовується додатковий рівень – маска m_p (розміром $M \times N$ елементів) (рис. 14, а), яка множиться на початкове зображення f_{p0} окремої смуги, в результаті чого отримується зображення смуги f_p зі згладженою межею.

Значення елементів маски m_p змінюються від 0 до 1. З метою згладжування межі смуги маска m_p обчислюється як згортка початкового зображення маски m_{p0} (значення якої дорівнюють 1 в межах смуги і 0 – за межами смуги) з ядром w фільтра Гауса з СКВ σ_R . Для зменшення крайових ефектів при наступній фільтрації використано удосконалений метод симетричного розширення зображення f_p до f_{pe} – симетричне розширення під заданим кутом. Фільтрація зображення смуги (рис. 14, б) виконується в частотній області, а функція фільтра W обчислюється у вигляді двох секторів з радіусом $R_{ow} = [M/2]$ і центральним кутом γ , який дорівнює

$$\gamma = k_\gamma \cdot 2 \cdot \arctan\left(\frac{R_{0A}}{M/2}\right), \quad (12)$$

де k_γ – коефіцієнт кута γ ; R_{0A} – половина ширини смуги.

Результати орієнтованої фільтрації модельованих зображень смуг Кікучі показали, що оптимальне значення $k_\gamma = 1.6$. Запропонований метод фільтрації дозволяє виділяти зображення окремої смуги (рис. 14, б) із суперпозиції множини смуг і підвищити точність обчислення ширини смуг (до 7 разів).

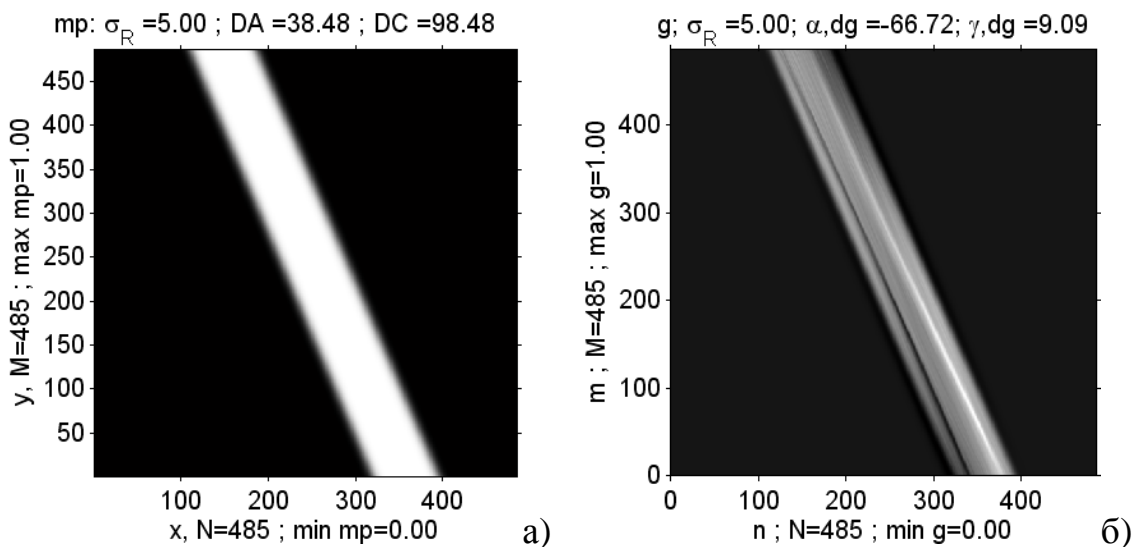


Рисунок 14 – Зображення маски m_p (а) та смуги Кікучі g (б) (рис. 14, а)

Одержав подальшого розвитку метод вейвлет-фільтрації з використанням сімейства біортогональних вейвлетів, призначений для видалення шуму та фону X-променевих сигналів, що підвищує точність визначення структурних параметрів досліджуваних кристалів (більш ніж у 2 рази). Для фільтрації використано одновимірне дискретне вейвлет-перетворення (Discrete Wavelet Transform – DWT). Шляхом фільтрації модельованих сигналів отримано оптимальний масштаб функції (6,8) для сімейства біортогональних вейвлетів.

У четвертому розділі розглянуто методи багаторівневого визначення просторового положення об'єктів на електронно-дифракційних та Х-променевих зображеннях.

Метод детектування просторового положення відрізків прямих, кіл та еліпсів на зображеннях, який заснований на перетворенні Хафа, удосконалено шляхом низькочастотної фільтрації початкового зображення та акумулятора методу. При детектуванні меж смуг на зображенні виконано фільтрацію початкового зображення і підвищено локальний контраст (запропонованими методами) (рис. 15), після чого обчислено контури смуг g_c методом Кенні. На основі контурів g_c проведено детектування відрізків прямих методом Хафа, для цього обчислено акумулятор H_t . Відрізки прямих отримано як максимуми H_t з врахування допустимої мінімальної довжини відрізків (MinLen) та максимальної величини розривів (FillGap) між фрагментами відрізків.

Детектування кіл і еліпсів на зображеннях відбувається так. Для початкового зображення f_n виконується фільтрація шуму і обчислюється його градієнти g_{cx} , g_{cy} , g_{CR} методом Превітта. На основі градієнтів обчислюється акумулятор H_C методом Хафа для радіусів кіл, заданих у допустимому діапазоні, а центри кіл визначаються як максимуми акумулятора H_C після низькочастотної фільтрації. При детектуванні еліпсів на зображеннях методом Хафа використовується алгоритм детектування кіл, але для різних масштабів S_{cy} зображення f_n за висотою. Оптимальний масштаб зображення, при якому еліпси перетворюються на кола, визначається за максимумом акумулятора H_C . Використана фільтрація зображень дозволяє визначати координати об'єктів методом Хафа з точністю до піксела навіть при значних рівнях шуму.

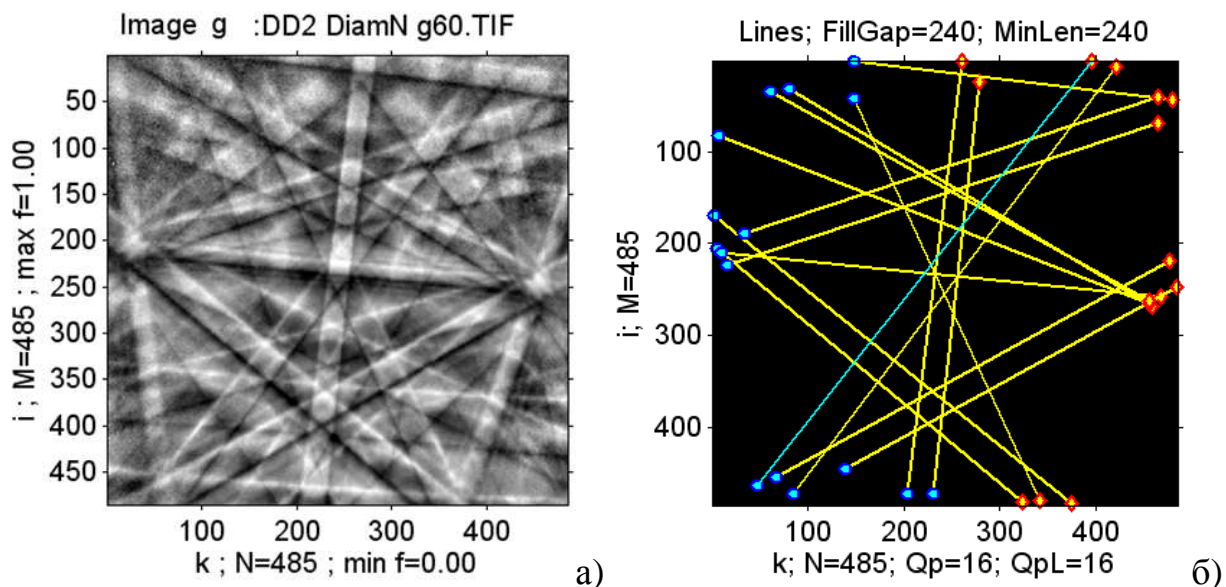


Рисунок 15 – Детектування меж смуг Кікучі як відрізків прямих на зображенні за методом Хафа: а) початкове зображення f_n після видалення шуму фільтром Гауса (СКВ $\sigma_w = 2$); б) детектовані Q_p відрізки прямих

Для знаходження положення особливих ділянок на зображенні, а саме для визначення координат перетинів (вузлів) смуг Кікучі, використано метод суміщення з еталоном (шаблоном). Багаторівневий підхід полягає у тому, що як

вікно ділянки використовується фрагмент зображення еталону, помножений на двовимірний розподіл Гауса. Координати вузлів смуг обчислюються для двох зображень (еталона і зразка) з точністю до пікселя.

Запропоновано новий високоточний метод багаторівневого аналізу енергетичних спектрів зображень, який використовує аналіз енергетичних спектрів для ділянок зображень за допомогою квадродерева. Для спрощення побудови квадродерева виконується розширення початкового зображення ($M_0 \times N_0$ пікселів) до розмірів $M \times N$ пікселів, кратних степеню 2. Початкове зображення ділиться на вікна квадратної форми згідно зі структурою квадродерева.

Для вікон (розміром $M_w \times M_w$ пікселів) на основі їх енергетичних спектрів P_S обчислюються середні просторові горизонтальні частоти v_{CH2}

$$v_{CH2} = \frac{\sum_{m=-M_2}^{M_2} \sum_{n=-N_2}^{N_2} v(n) \cdot P_S(m, n)}{\sum_{m=-M_2}^{M_2} \sum_{n=-N_2}^{N_2} P_S(m, n)}, \quad (13)$$

де $M_2 = \lceil M_w/2 \rceil$; $N_2 = \lceil M_w/2 \rceil$; $v = n/M_w$ – значення просторової частоти з номером n .

Вертикальні v_{CV2} і радіальні v_{CR2} частоти обчислюються аналогічно. Для отриманих просторових частот обчислюються відповідні їм горизонтальні T_{CH2} , вертикальні T_{CV2} і радіальні T_{CR2} періоди. Значення просторових частот верхніх рівнів використовуються для корекції частот нижніх рівнів. На основі значень просторових частот і періодів, обчислених для локальних вікон, шляхом багаторівневої інтерполяції з використанням кубічних сплайнів розраховано карти просторового розподілу частот і періодів зображення з незначною похибкою ($\approx 0.1\%$). Такі карти обчислено, зокрема, для X-променевих муарових зображень (рис. 16), які використовуються для аналізу зображень.

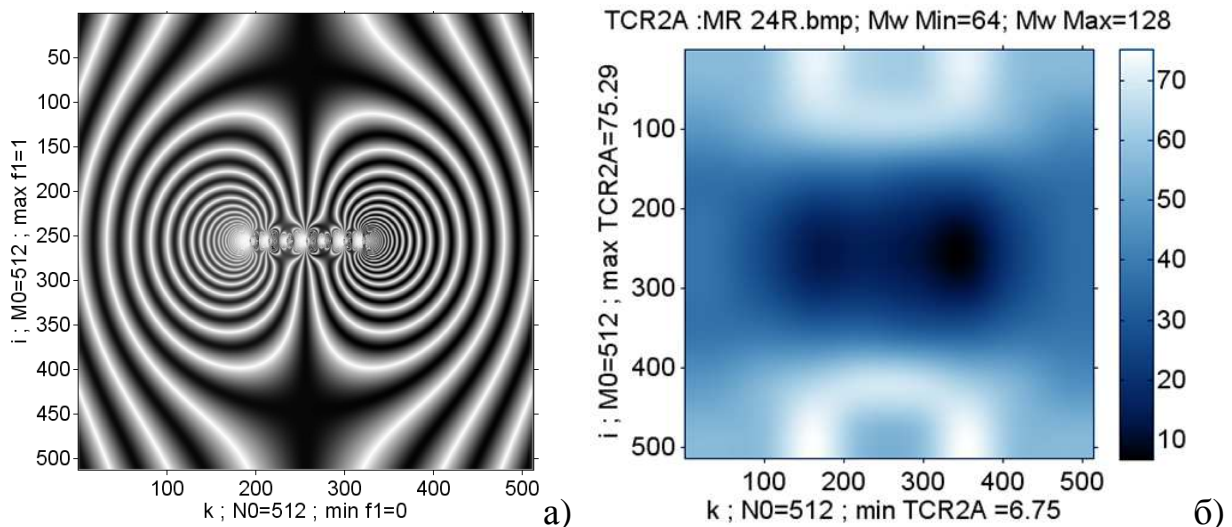


Рисунок 16 – X-променеве муарове зображення (а) та його карта радіальних просторових періодів T_{CR2A} (б); мінімальний розмір вікна – 64 піксели

Розроблено метод деконволюції зображень з використанням вінерівської фільтрації та функції розмиття точки у вигляді двовимірного орієнтованого розподілу Гауса. Поєднання деконволюції та орієнтованої фільтрації зображень на 50% покращує просторове розділення смуг на зображенні. Таке оброблення значно підвищує візуальну якість зображень, зокрема, X-променевих топограм.

У п'ятому розділі розглянуто оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів із використанням засобів штучного інтелекту та багаторівневого підходу.

Одержав подальший розвиток метод використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для вирішення обернених задач відновлення структурних параметрів зразків на основі експериментальних X-променевих кривих дифракційного відбивання. ШНМ створено зі структурою 3-шарового перцептрона (рис. 17). На входи ШНМ подавалися нормовані значення інтенсивності X-променевих сигналів, а виходами ШНМ були параметри z досліджуваних кристалів (максимальна деформація, густина дислокацій та ін.).

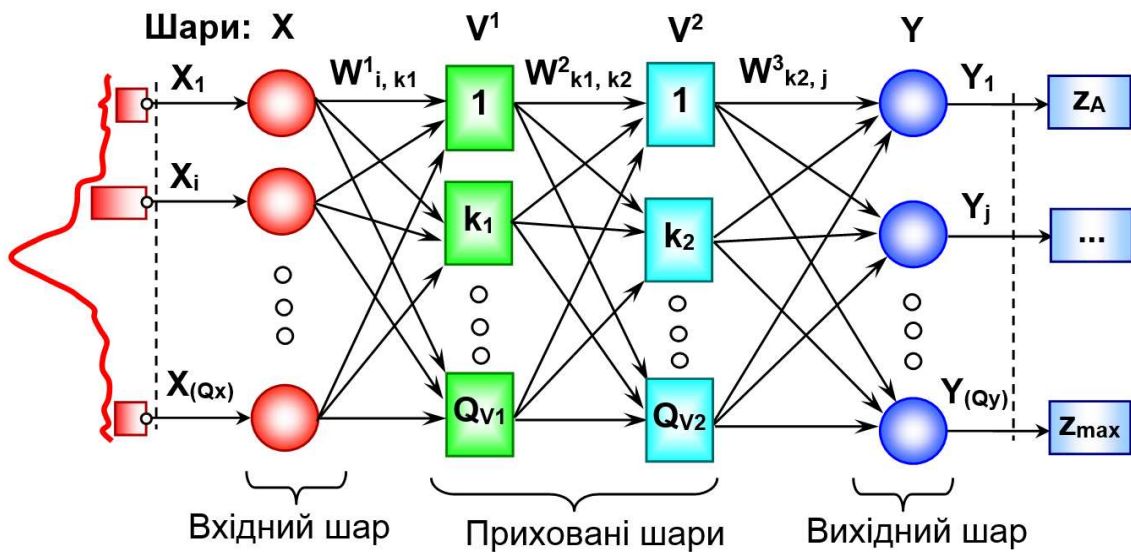


Рисунок 17 – Структура штучної нейронної мережі

У процесі навчання (методом зворотного поширення помилки) виходи Y наближувалися до правильних виходів Y^T шляхом зміни ваг W ШНМ. Після навчання ШНМ за її допомогою обчислено параметри кристалів CdTe на основі серії X-променевих кривих дифракційного відбивання.

Новизна використання ШНМ полягає у багатомасштабному навчанні мережі, при якому ШНМ на першому етапі навчається на основі вхідних сигналів, роздільна здатність яких мінімальна. На наступних етапах кількість Q_x нейронів у першому шарі подвоюється. Для номеру масштабу $s_d = 1$ початкова матриця ваг заповнюється малими випадковими значеннями, а для наступних масштабів ($s_d > 1$) початкові вагові коефіцієнти W^1 обчислюються через налаштовані ваги для попереднього масштабу за формулою

$$W_{i,k1}^{1(sd)} = W_{i,k1}^{1(sd-1)} \cdot k_w, \quad (14)$$

де $i = 1, \dots, Q_x; k_1 = 1, \dots, Q_{v1}; i_1 = [i/2]; k_w$ – коефіцієнт масштабу ($k_w = 1.5$).

Використаний багатомасштабний підхід до навчання дозволяє зменшити час навчання ШНМ більш ніж у 2 рази.

Розроблено новий високоточний метод суміщення зображень об'єктів з використанням генетичного алгоритму (ГА) та алгоритму координатного спуску (рис. 18). В даній роботі виконано суміщення серії електронно-дифракційних та X-променевих зображень, що є важливим для їх аналізу.

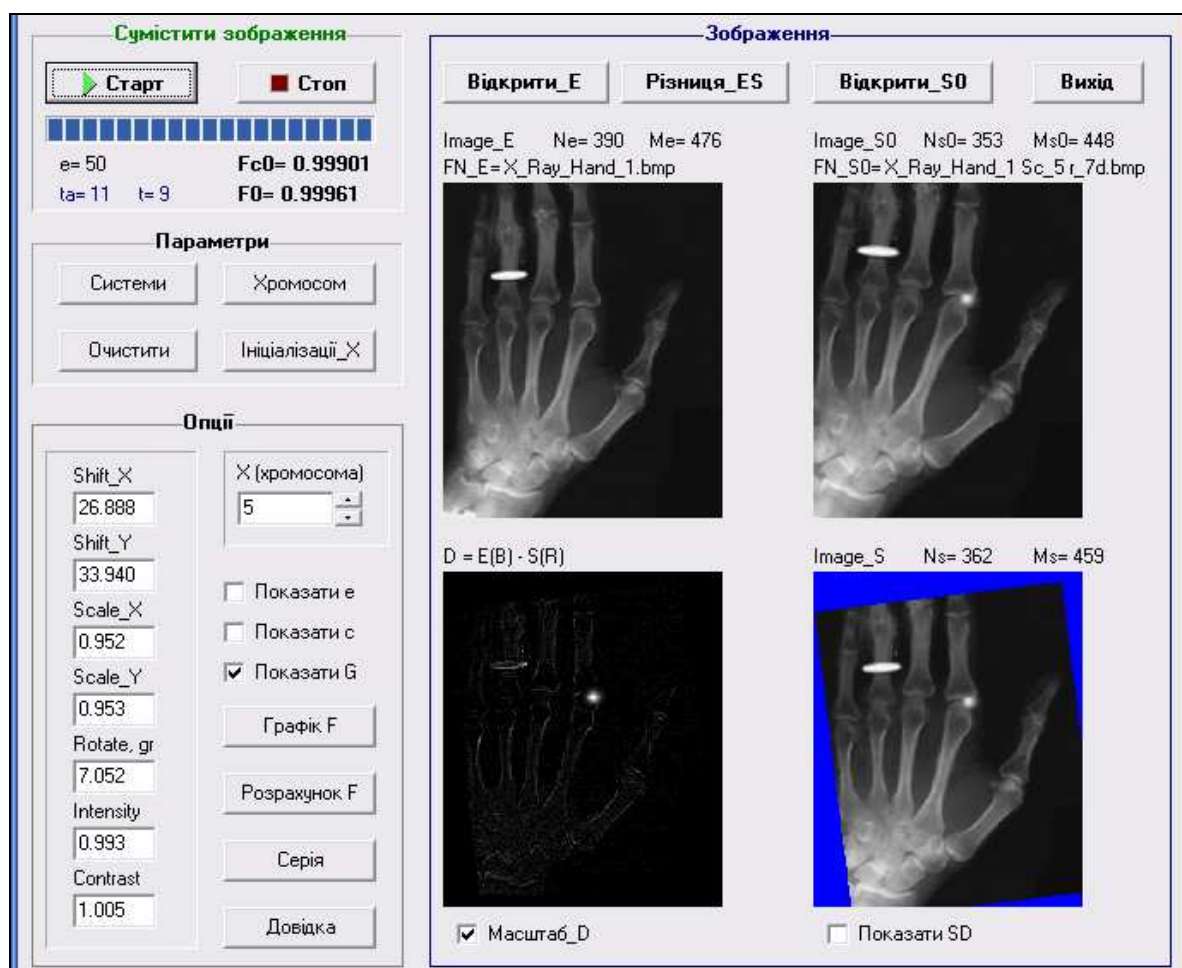


Рисунок 18 – Фрагмент головної форми програми після суміщення зображень генетичним алгоритмом та методом координатного спуску

Для оптимального суміщення зображень потрібно визначити такі їх трансформації, які забезпечують мінімальну різницю зображень, тому розроблено метод суміщення зображень з використанням ГА. Гени G_1 - G_7 хромосом описують основні просторові перетворення зображень та зміни яскравості: G_1 (зсув вздовж осі X), G_2 (зсув вздовж осі Y), G_3 (масштаб вздовж осі X), G_4 (масштаб вздовж осі Y), G_5 (кут повороту), G_6 (середня яскравість), G_7 (середній контраст) (рис. 18). Зроблено висновок про більшу ефективність турнірного методу порівняно з селекцією методом рулетки та ранговим методом. Для досліджуваних зображень найкраще суміщення отримано при амплітуді мутації $\approx 20\%$ і кількості хромосом $Q_C \approx 64$. Після суміщення зображень ГА виконується їх суміщення методом координатного спуску.

У шостому розділі розглянуто практичну реалізацію багаторівневого оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у КІВС.

Розроблено апаратно-програмні засоби оброблення сигналів у КІВС на базі електронного мікроскопу (див. рис. 1). Програмне оброблення сигналів реалізовано в середовищі Borland Delphi та в системі Matlab. Розроблено структурні схеми пристроїв, призначених для реалізації основних етапів оброблення цифрових сигналів за допомогою апаратних засобів. Для цього, зокрема, на основі розробленого алгоритму обчислення рівня шуму та

алгоритму фільтрації шуму (див. рис. 4) синтезовано структурну схему багаторівневої фільтрації шуму на зображеннях у КІВС (рис. 19), яка забезпечує максимум параметру ПІВСШ (PSNR) для фільтрованих зображень g та g_L . Джерелом початкового зображення f_n є ПЗЗ-камера, у результаті оброблення отримується фільтроване зображення з врахуванням контурів g_L , де функція $\varphi(g, g_c)$ описується (2). Розроблена КІВС використана для побудови системи підтримки прийняття рішень оператора електронного мікроскопу.

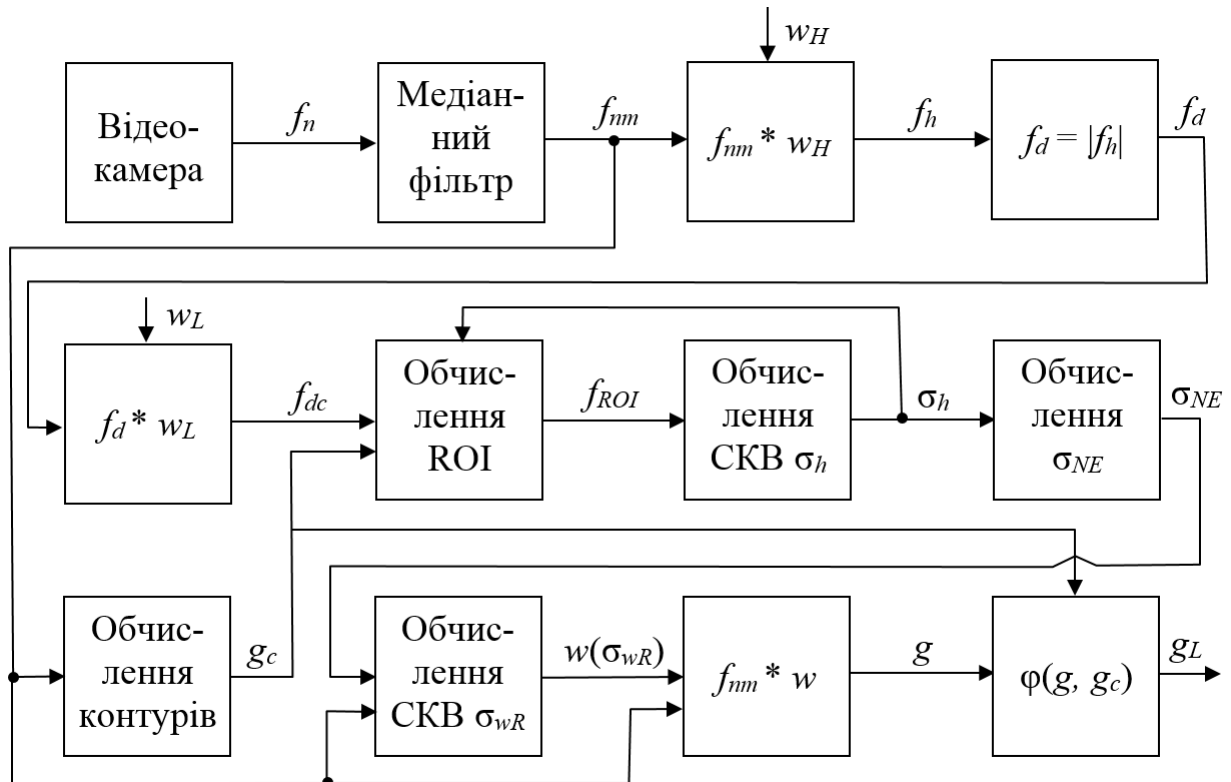


Рисунок 19 – Структурна схема багаторівневої фільтрації шуму на зображеннях у КІВС на базі електронного мікроскопу «Zeiss EVO 50»

На основі розробленої концепції багаторівневого підходу створено комплекси методів для оброблення експериментальних сигналів у КІВС із підвищеною точністю та швидкістю. Комплекс методів для поетапного оброблення електронно-дифракційних зображень (зображень смуг Кікучі) у КІВС на базі електронного мікроскопу містить такі методи: 1) медіанна фільтрація імпульсного шуму; 2) обчислення рівня гаусового шуму; 3) лінійна фільтрація гаусового шуму; 4) інтерполяція профілів смуг; 5) підвищення локального контрасту зображень; 6) орієнтована фільтрація зображень; 7) орієнтована фільтрація виділених смуг; 8) усереднення профілів смуг; 9) детектування положення смуг методом Хафа; 10) інтерполяція зображень; 11) обчислення координат вузлів смуг; 12) суміщення зображень за допомогою генетичного алгоритму; 13) обчислення параметрів кристалів на основі енергетичних спектрів, координат вузлів, різниці зображень або профілів смуг.

Розроблено КІВС на базі Х-променевих дифрактометрів ДРОН-3М та ДРОН-4, апаратно реалізовано адаптери системи і створено програмне

забезпечення для автоматизованого керування дифрактометрами. Розроблена КІВС складається з джерела Х-променів, гоніометра ГУР-8, комплексу керування дифрактометром ККД-1, детектора Х-променів, створеного адаптера комплексу керування (АКК-3), пристрою Arduino UNO, ПК. Комплекс ККД-1 призначений для керування поворотом досліджуваних зразків і детектора Х-променів, аналогового і цифрового оброблення сигналів із детектора. Гоніометр ГУР-8 призначений для точних поворотів досліджуваного зразка, аналізатора й детектора Х-променів. Для керування дифрактометром розроблено й апаратно реалізовано адаптер комплексу керування (АКК-3), який керує поворотами зразка, аналізатора і детектора за допомогою синхронних електричних двигунів, зчитує кількість імпульсів Х-променів та мітки кута повороту аналізатора і детектора.

Програма керування КІВС, яка створена в Borland Delphi, для зв'язку з системою використовує віртуальний СОМ-порт. Розроблена КІВС контролює поворот детектора Х-променів за мітками з оптопари гоніометра. Поворот аналізатора і детектора Х-променів виконується для всіх кутових швидкостей, передбачених конструкцією гоніометра. Аналогічно КІВС на базі дифрактометра ДРОН-3М, розроблено КІВС на базі дифрактометра ДРОН-4, основною відмінністю якої є використання для повороту зразка і детектора крокового двигуна, що забезпечує високу точність поворотів з похибкою до 0.0005° . Таким чином, на основі створеного апаратного і програмного забезпечення для розробленої КІВС побудовано систему підтримки прийняття рішень оператора Х-променевого дифрактометра.

Комплекс методів для оброблення Х-променевоїх сигналів у КІВС на базі Х-променевоїх дифрактометрів містить такі методи: 1) видалення неоднорідного фону; 2) вейвлет-фільтрація сигналів; 3) інтерполяція сигналів; 4) обчислення параметрів кристалів за допомогою ШНМ.

Комплекс методів для оброблення Х-променевоїх муарових зображень у КІВС на базі Х-променевоїх дифрактометрів містить такі методи: 1) медіанна фільтрація імпульсного шуму; 2) обчислення рівня гаусового шуму; 3) лінійна фільтрація гаусового шуму; 4) підвищення локального контрасту зображень; 5) побудова карти просторого розподілу частот зображення; 6) обчислення деформацій кристалів на основі енергетичних спектрів.

Комплексне оброблення експериментальних електронно-дифракційних та Х-променевоїх сигналів запропонованими методами забезпечує поетапне підвищення відношення сигнал/шум сигналів, що дозволяє на порядок збільшити точність обчислення їх параметрів, зокрема, ширини смуг Кікучі, і отримати потрібну для практики точність визначення структурних характеристик досліджуваних кристалів ($\sim 10^{-5}$).

Запропоновані багаторівневі методи також класифікуються за задачами, для вирішення яких вони призначені, при цьому для обчислення додаткових рівнів сигналу використовуються: амплітудні (АП), кутові (КП), просторові (ПП) і частотні (ЧП) параметри, методи обчислення (МО) і параметри масштабу (ПМ) (табл. 2).

Таблиця 2 – Задачі та характеристики основних запропонованих багаторівневих методів, призначених для оброблення електронно-дифракційних та Х-променевих сигналів

№ п/п	Задача	Запропоновані методи (ЗМ)	Параметри додаткових рівнів ЗМ	Методи-аналоги (МА)	Характеристики ЗМ порівняно з МА	
					Точність	Швидкість
1	Обчислення рівня шуму (σ_{NE})	HLROIC	ПП	PCAP	КСКП σ_{NE} ↓ на 0.067 %	≈
2	Видалення шуму	Удосконалений LGFPS	ПП	Білатеральний	ПВСШ ↑ на 0.04 дБ	↑ в 2 рази
3		Орієнтована фільтрація в просторовій області	ПП, КП	Неорієнтована фільтрація	КСКП ↓ у 0.7 разів	↓ на 1-2 порядки
4		Частотна орієнтована фільтрація	ПП	Частотна неорієнтована фільтрація	КСКП ↓ на порядок	↓ в 2 рази
5		Вейвлет-фільтрація з видаленням фону	АП	Вейвлет-фільтрація	КСКП ↓ на 15%	↓ в 2 рази
6		Підвищення роздільної здатності	Багаторівневий метод інтерполяції	МО	Інтерполяція кубічними сплайнами	КСКП ↓ на 16%
7	Аналіз енергетичних спектрів P_S Х-променевих муарових зображень	Багатомасштабне оброблення P_S для обчислення суми сил P_{sum}	Масштабом	Одномасштабне оброблення P_S для обчислення P_{sum}	КСКП P_{sum} ↓ у 2 рази	↓ на порядок
8	Обчислення профілів зображень	Обчислення усереднених профілів на основі серії з Q профілів	Просторовими параметрами	Обчислення окремих профілів	СКВ шуму σ_N ↓ у \sqrt{Q} разів (у 24 рази)	↓ в Q разів
9	Покращення візуальної якості зображень	Багаторівневе підвищення візуальної якості	АП	Локальне віконне оброблення	КСКП ↓ у 1.5 рази	↑ до 2 порядків

Продовження таблиці 2

№ п/п	Задача	Запропоновані методи (ЗМ)	Параметри додаткових рівнів ЗМ	Методи-аналоги (МА)	Характеристики ЗМ порівняно з МА	
					Точність	Швидкість
10	Детектування положення об'єктів на зображеннях	Детектування відрізків методом Хафа з фільтрацією зображення	Частотними і амплітудними параметрами	Детектування відрізків методом Хафа	Довжина правильно виділених відрізків ↑ в 1.2 раза	↓ в 1.5 раза
11	Побудова карти просторого розподілу частот зображення	На основі енергетичного спектра P_S з використанням квадродерева	ПП, ЧП	На основі спектра P_S	КСКП ↓ на порядок	↓ в 2 рази
12	Вирішення оберненої задачі	ШНМ з багатомасштабним навчанням	ПМ	Багатошаровий перцептрон	≈	↑ в 2 рази

В усіх випадках запропоновані методи забезпечують підвищення точності та (або) швидкодії оброблення сигналів (порівняно з аналогами), що свідчить про ефективність запропонованого багаторівневого підходу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі виконано теоретичне узагальнення багаторівневого підходу до аналізу сигналів, що дозволило отримати нове вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення точності та швидкодії оброблення електронно-дифракційних і X-променевих сигналів для комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем. Під час досліджень було отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Розроблено концепцію багаторівневого підходу до оброблення експериментальних сигналів, яка полягає в обчисленні й аналізі додаткових рівнів сигналів, комплексному обробленні сигналів множиною взаємопов'язаних методів, що забезпечує підвищення їх швидкодії або точності на порядок. Розроблено і програмно реалізовано комплекс методів і алгоритмів для поетапного оброблення електронно-дифракційних зображень (зображень смуг Кікучі) у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах на базі електронних мікроскопів, комплекс методів і алгоритмів для оброблення X-променевих сигналів та X-променевих муарових зображень у КІВС на базі X-променевих дифрактометрів; розроблено структуру, апаратне і програмне забезпечення для КІВС на базі X-променевих дифрактометрів ДРОН-3М та ДРОН-4.

2. Розроблено теоретичні основи, метод і програмні засоби для аналізу та синтезу профілів розподілу інтенсивності експериментальних зображень. Характерною особливістю запропонованого методу є використання конічних перерізів як обвідних серії профілів і обчислення усереднених профілів на основі їх серії, що дозволило підвищити точність обчислення просторових параметрів усереднених профілів на порядок. Залежно від експериментальних умов отримання сигналів як обвідні використано відрізки прямих, дуги кіл та еліпсів, гіперболи і параболи. Розроблені методи реалізують режим класифікації, в якому формування усередненого профілю виконується тільки на основі найменш спотворених профілів серії. Показано, що коректне усереднення серії з Q профілів в \sqrt{Q} разів зменшує рівень шуму.

3. Вперше запропоновано і програмно реалізовано високоточні методи та апаратно-програмні засоби для багаторівневої інтерполяції, в яких інтерпольовані одновимірні та двовимірні сигнали складаються з суми коректованої та узгоджувальної функцій, де коректована функція обчислюється з використанням згортки з ядром фільтра Гауса кускових поліноміальних функцій (сплайнів), зокрема лінійних або кубічних, а узгоджувальна функція забезпечує проходження сумарного інтерпольованого сигналу через вузли інтерполяції. Розроблені методи дозволяють при мінімальній похибці інтерполяції підвищити роздільну здатність експериментальних сигналів. При обробленні електронно-дифракційних зображень КСКП розробленого методу інтерполяції, порівняно з аналогами, у середньому на 16% менший.

4. Розроблено новий швидкодійний метод підвищення локального контрасту і видалення неоднорідного фону зображень, який використовує значення обвідних мінімальних та максимальних значень сигналів у межах локальних вікон, що обчислюються шляхом апроксимації з використанням кубічних поліноміальних функцій, а також корекцію обвідних сигналів, отриманих для різних розмірів локальних вікон зображення. Встановлено, що корекція обвідних дозволяє підвищувати локальний контраст зображень (до 8 разів) без появи помітних артефактів і забезпечує значне підвищення візуальної якості відновлених сигналів, особливо у випадку оброблення X-променевих медичних та електронно-мікроскопічних зображень.

5. Уперше запропоновано математичну модель і метод адаптивної орієнтованої фільтрації зображень в просторовій області, який як ядро фільтра використовує орієнтований двовимірний розподіл Гауса. Розроблений метод дозволяє видаляти на зображеннях шум при допустимому розмитті контурів. Напрямок фільтрації в межах локальних вікон адаптується до напрямку контуру, а для виділення контурів використано методи Собеля, Превітта або Кенні. Завдяки орієнтованій фільтрації зображень смуг Кікучі підвищено точність обчислення ширини смуг (до 5 разів).

6. Уперше запропоновано математичну модель і метод орієнтованої фільтрації зображень смуг Кікучі в частотній області, який заснований на просторовому виділенні смуг та їх подальшій фільтрації. З метою зменшення крайових ефектів на межі смуги, які виникають при її просторовому виділенні й орієнтованій фільтрації, навколо зображення смуги створюється спеціальна перехідна ділянка. Розроблений метод фільтрації дозволяє виділяти зображення окремої смуги із суперпозиції множини смуг і підвищувати точність обчислення ширини смуг (до 7 разів), відповідно, у стільки ж разів зростає точність розрахунку параметрів досліджуваних кристалів.

7. Розроблено новий високоточний і швидкодійний метод суміщення зображень об'єктів із використанням генетичного алгоритму та алгоритму координатного спуску. Для генетичного алгоритму вибрано структуру хромосом, яка описує основні просторові перетворення зображень та зміни їх яскравості. У результаті дослідження різних видів селекції хромосом при суміщенні зображень зроблено висновок про більшу ефективність турнірного методу порівняно з селекцією методом рулетки та ранговим методом. Для досліджуваних зображень найкращі результати отримано при амплітуді мутації $\approx 20\%$ і кількості хромосом ≈ 64 , що забезпечує незначну похибку суміщення зображень за масштабом ($\approx 0.01\%$) і кутом повороту ($\approx 0.05^\circ$).

8. Запропоновано новий метод багаторівневого аналізу енергетичних спектрів зображень, зокрема X-променевих муарових зображень, який використовує багатомасштабне оброблення енергетичних спектрів та аналіз енергетичних спектрів для локальних ділянок зображень за допомогою квадродерева, завдяки чому похибка обчислення середньої просторової радіальної частоти зображення є незначною ($\approx 0.1\%$). Встановлено, що вибором оптимального масштабу зображення за шириною і висотою забезпечується мінімальне спотворення радіального розподілу для енергетичного спектра зображення і до 2 разів вища точність розв'язання оберненої задачі при обчисленні параметрів досліджуваних зразків.

9. Одержали подальшого розвитку:

- метод детектування просторового положення таких геометричних примітивів зображень, як відрізки прямих, кола та еліпси. Метод засновано на перетворенні Хафа, низькочастотній фільтрації зображення та акумулятора методу Хафа. Досліджено вплив параметрів методу на точність детектування геометричних примітивів зображень. Використана фільтрація дозволяє визначати координати об'єктів із точністю до пікселя;

- високоточний багаторівневий метод автоматичного визначення рівня гаусового шуму на зображеннях, який використовує високочастотну фільтрацію, виділення та уточнення ділянки інтересу з врахуванням контурів; при обробленні тестових зображень запропонованим методом отримано КСКП $\approx 0.2\%$, що на $\approx 0.1\%$ менше за похибки методів-аналогів;

- метод автоматичної фільтрації гаусового шуму на зображеннях із використанням фільтра Гауса, який використовує локальне оброблення зображень у ділянках, обмежених контурами, що забезпечує квазіоптимальний результат фільтрації згідно з критерієм пікового відношення сигнал/шум та, в середньому, в 2 рази вищу швидкість, порівняно з нелінійними методами-аналогами;

- метод вейвлет-фільтрації з використанням сімейства біортогональних вейвлетів, призначений для видалення шуму та неоднорідного фону X-променевих сигналів; у запропонованому методі виконується поетапна фільтрація шуму і видалення неоднорідного фону, що до 2 разів підвищує точність визначення структурних параметрів досліджуваних кристалів;

- швидкодійний метод використання штучних нейронних мереж для вирішення обернених задач відновлення структурних параметрів кристалів CdTe на основі експериментальних X-променевих сигналів, де як нейронну мережу застосовано багатосаровий перцептрон із використанням багатомасштабного оброблення вхідних даних, що дозволило зменшити час навчання нейромережі в середньому в 2 рази.

- метод деконволюції зображень з використанням вінерівської фільтрації та методу Річардсона-Люсі, які як функцію розсіяння точки використовують орієнтований двовимірний розподіл Гауса, що забезпечує до 1.5 рази вище просторове розділення смуг на X-променевих топограмах.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджено в 3-х науково-дослідних інститутах НАНУ, а також у навчальному процесі в Чернівецькому національному університеті.

Апробація розроблених програмних засобів підтверджує коректність запропонованих наукових положень, моделей та методів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] І. М. Фодчук, та С. В. Баловсяк, *Діагностика поверхні твердого тіла. Загальний стан проблеми та X-променеві методи: Навчальний посібник*. Чернівці, Україна: Рута, 2007.
- [2] I. M. Fodchuk, and S. V. Balovsyak, "New possibilities for determination of solids surface parameters by X-ray reflectivity", *Phys. Status Solidi A*, vol. 204, no. 5, pp. 1543-1554, 2007. doi: 10.1002/pssa.200622171.
- [3] I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borcha, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, "Determination of structural inhomogeneity of synthesized diamonds by back scattering electron diffraction", *Phys. Status Solidi A*, vol. 208, no. 11, pp. 2591-2596, 2011. doi: 10.1002/pssa.201184266.
- [4] М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, Я. Д. Гарабазжив, В. М. Ткач, и И. М. Фодчук, "Определение структурной неоднородности искусственных кристаллов алмазов методом Кикучи-дифракции", *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 31, № 7, с. 911-925, 2009.

- [5] С. В. Баловсяк, и И. М. Фодчук, "Новые подходы в моделировании кривых полного внешнего отражения рентгеновских лучей. Метод частиц", *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 31, № 11, с. 1493-1504, 2009.
- [6] М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, В. Ю. Хоменко, и В. Н. Ткач, "Определение структурной неоднородности кристаллов по данным анализа картин Кикучи", *Металлофизика и новейшие технологии*. т. 35, № 8, с. 1135-1148, 2013.
- [7] С. В. Баловсяк и др., "Локальные деформации в окрестности трещин сварочного шва никелевого сплава, определенные с помощью Фурье-преобразования картин Кикучи", *Металлофизика и новейшие технологии*. т. 35, № 10, с. 1359-1370, 2013.
- [8] И. М. Фодчук, Ю. Т. Роман, и С. В. Баловсяк, "Новые подходы анализа рентгеновских дифрактограмм на основе вейвлет-преобразований", *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 39, № 7, с. 855-863, 2017. doi: 10.15407/mfint.39.07.0855.
- [9] I. M. Fodchuk, et al., "Distribution in Angular Mismatch between Crystallites in Diamond Films Grown in Microwave Plasma", *Diamond and Related Materials*, vol. 19, pp. 409-412, 2010. doi: 10.1016/j.diamond.2010.01.020.
- [10] M. D. Borcha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, and V. N. Tkach, "Distribution of local deformations in diamond crystals according to the analysis of Kikuchi lines profile intensities", *Journal of Superhard Materials*, vol. 35, no. 4, pp. 220-226, 2013. doi: 10.3103/S1063457613040035.
- [11] M. D. Borcha, S. V. Balovsyak, I. M. Fodchuk, V. Yu. Khomenko, O. P. Kroitor, and V. N. Tkach, "Local deformation in diamond crystals defined by the Fourier transformations of Kikuchi patterns", *Journal of Superhard Materials*, vol. 35, no. 5, pp. 284-291, 2013. doi: 10.3103/S1063457613050031.
- [12] I. M. Fodchuk, M. D. Borcha, V. Yu. Khomenko, S. V. Balovsyak, V. M. Tkach, and O. O. Statsenko, "A Strain State in Synthetic Diamond Crystals by the Data of Electron Backscatter Diffraction Method", *Journal of Superhard Materials*, vol. 38, no. 4, pp. 271-276, 2016. doi: 10.3103/S1063457616040080.
- [13] S. Balovsyak, M. Borcha, Ya. Garabazhiv, I. Fodchuk, and V. Tkach, "Use of electron diffraction for determination of strain distribution in synthetic diamonds", *Proceedings SPIE*, vol. 8338, pp. 700819-1 - 700819-7, 2011. doi: 10.1117/12.921051.
- [14] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Суміщення зображень об'єктів з використанням генетичних та градієнтних алгоритмів", *Комп'ютинг*, т. 12, № 2, с. 160-169, 2013.
- [15] I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borcha, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, "Determination of Structural Homogeneity of Synthetic Diamonds from analysis of Kikuchi lines intensity distribution", *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*, vol. 13, no. 3, pp. 262-267, 2010.

- [16] І. М. Фодчук, С. В. Баловсяк, О. С. Кшевецький, та О. М. Потапов, "Програмне забезпечення для цифрової обробки зображень в X-променевої топографії", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, № 201, с. 16-21, 2004.
- [17] I. M. Fodchuk, et al., "Magnetic force microscopy of YLaFeO films implanted by high dose of nitrogen ions", *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*, vol. 16, no. 3, pp. 246-252, 2013. doi: 10.15407/spqeo16.03.
- [18] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Використання штучних нейронних мереж для визначення параметрів напівпровідників за даними X-променевих методів", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, № 420, с. 45-51, 2008.
- [19] В. М. Ткач, та ін., "Визначення структурної неоднорідності синтезованих алмазів та розорієнтації кристалітів/зерен полікристалічних матеріалів методом Кікучі-дифракції", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, № 438, с. 72-85, 2009.
- [20] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Алгоритми і програмне забезпечення розв'язку деяких задач розсіяння електронів та X-променів", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, № 438, с. 113-121, 2009.
- [21] І. М. Фодчук, М. Д. Борча, В. Ю. Хоменко, В. М. Ткач, та С. В. Баловсяк, "Особливості розподілу деформацій в кристалах, визначених методом дифракції зворотно-розсіяних електронів", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, т. 3, № 2, с. 29-38, 2014.
- [22] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Програмне забезпечення для проведення віртуальних лабораторних робіт на базі X-променевого дифрактометра ДРОН-3", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Фізика. Електроніка*, т. 3, № 2, с. 46-53, 2014.
- [23] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Програмне забезпечення для автоматизованого керування X-променевими дифрактометрами", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 2, № 2, с. 56-61, 2011.
- [24] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Апаратно-програмний комплекс для автоматизації фізичного експерименту на X-променевому дифрактометрі ДРОН-4", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 4, с. 100-103, 2005.
- [25] Н. В. Рощупкіна, А. О. Саченко, С. В. Баловсяк, та О. Ю. Рощупкін, "Дослідження методу обробки сигналів багатопараметричних сенсорів", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 5, № 2, с. 57-64, 2014.
- [26] С. В. Баловсяк, Я. Д. Гарабазів, та І. М. Фодчук, "Програмний комплекс для аналізу ліній Кікучі", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 4 (137), с. 68-73, 2009.

- [27] С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, Ю. Н. Соловей, и Я. В. Луцук, "Многоуровневый метод повышения локального контраста и удаления неоднородного фона изображений", *Кибернетика и вычислительная техника*, № 182, с. 15-26, 2015.
- [28] С. В. Баловсяк, Я. Д. Гарабазив, и И. М. Фодчук, "Ориентированная фильтрация цифровых электронно-дифракционных изображений", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (77), с. 4-13, 2016.
- [29] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне видалення гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою квазіоптимального фільтра Гауса", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (83), с. 26-35, 2017.
- [30] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Highly Accurate Estimation of Gaussian Noise Level in Digital Images Using Filtration and Edges Detection Methods", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, vol. 9, o. 12, pp. 1-11, 2017. doi: 10.5815/ijigsp.2017.12.01.
- [31] С. В. Баловсяк, та І. М. Фодчук, "Спосіб визначення середньої арифметичної висоти нерівностей поверхні кристалу методом повного зовнішнього відбивання Х-променів", *Патент на корисну модель 104335 Україна, МПК G01T 1/16 (2006.01), G06F 17/17 (2006/01), G06T 17/30 (2006/01), G09B 23/26 (2006/01), № u201506834*, 25.01.2016.
- [32] С. В. Баловсяк, В. М. Ткач, та І. М. Фодчук, "Спосіб визначення локальних деформацій кристалів на основі профілів розподілу інтенсивності зворотно відбивних електронів", *Патент на корисну модель 100924 Україна, МПК G01T 1/16 (2006.01), G06F 17/17 (2006.01), G06T 17/30 (2006.01), № u201502816*, 10.08.2015.
- [33] С. В. Баловсяк, П. М. Литвин, І. М. Фодчук, та І. В. Яремчук, "Спосіб визначення величини деформаційних полів кристала на основі Х-променевого муарового зображення в кремнієвому LLL-інтерферометрі", *Патент на корисну модель 121378 Україна, МПК G01T 1/16, G06F 17/00, G06F 17/17, № u201702011*, 11.12.2017.
- [34] S. Balovsiak, N. Roshchupkina, A. Sachenko, O. Roshchupkin, V. Kochan, and R. Smid, "Improved Multisensors Signal Processing", in *IEEE 35th Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015)*, Kyiv, Ukraine, 2015, pp. 341-346. doi: 10.1109/ELNANO.2015.7146906.
- [35] С. В. Баловсяк, І. М. Фодчук, та В. М. Ткач, "Підвищення точності діагностики локальних деформацій в штучних кристалах алмазу шляхом цифрової обробки електронно-мікроскопічних зображень", на *VII Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників УНКФН-7*, Дніпро, 2016, с. 302-303.
- [36] S. V. Balovsyak, I. V. Lutsyk, and I. M. Fodchuk, "Methods of Reconstruction and Restoration of Images", на *XV Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок та наносистем*, Івано-Франківськ, Україна, 2015, с. 93.
- [37] S. Balovsyak, I. Fodchuk, Yu. Roman, and M. Solodkyi, "Processing of X-Ray Diffractograms of TiN Thin Films Using Wavelet Transforms", на *XVI Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок та наносистем*, Івано-Франківськ, Україна, 2017, с. 331.

- [38] S. V. Balovsyak, O. V. Derevyanchuk, and I. M. Fodchuk, "Method of calculation of averaged digital image profiles by envelopes as the conic sections", in *The First Intern. Conf. on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2018)*, Kiev, Ukraine, 2018, pp. 2-4.
- [39] M. D. Borchа, S. V. Balovsyak, V. M. Tkach, I. M. Fodchuk, and V. Yu. Khomenko, "Strain measurement of residual deformations in diamond crystals from Kossel and Kikuchi lines", in *11th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging "X-Top 2012"*, St. Petersburg, Russia, 2012, pp. 366-367.
- [40] M. Borchа, et al., "Strain distribution in local areas of synthesized diamonds and weld joint of NiCrFe alloy", in *12th Biennial Conf. on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging "X-Top 2014"*, Villard de Lans, France, 2014, pp. 83.
- [41] I. Fodchuk, M. Borchа, V. Khomenko, S. Balovsyak, V. Tkach, and O. Statsenko, "Full strain tensor determination in synthesized diamonds and diamonds films", in *13th Biennial Conf. on High-Resolution X-Ray Diffraction and Imaging "X-Top 2016"*, Brno, Czech Republic, 2016, pp. 285.
- [42] С. В. Баловсяк, та А. І. Недбаєвська, "Порівняння зображень об'єктів з використанням генетичних алгоритмів", на *Всеукр. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2012”*, Чернівці, 2012, с. 100-101.
- [43] С. В. Баловсяк, та М. О. Якимчук, "Підвищення візуальної якості зображень за допомогою штучної нейронної мережі Хопфілда", на *III Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2014”*, Чернівці, 2014, с. 101-103.
- [44] С. В. Баловсяк, С. Л. Воропаєва, та Л. М. Карча, "Програмне забезпечення для підвищення візуальної якості сканованих текстів за допомогою модифікованих методів просторової фільтрації", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2015”*, Чернівці, 2015, с. 149-151.
- [45] С. В. Баловсяк, та А. Ю. Мельничук, "Орієнтована фільтрація зображень в просторовій області", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2016”*, Чернівці, 2016, с. 131-133.
- [46] С. В. Баловсяк, та К. В. Цигира, "Програмне забезпечення для підвищення локального контрасту та видалення неоднорідного фону зображень", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2016”*, Чернівці, 2016, с. 135-137.
- [47] С. В. Баловсяк, О. О. Пшеничний, та В. І. Шушельницький, "Детектування відрізків прямих ліній на зображеннях з шумом за допомогою перетворення Хафа", на *VI міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» „ПІКТ – 2017”*, Чернівці, 2017, с. 97-99.

- [48] С. В. Баловсяк, та Н. В. Личук, "Розпізнавання зображень символів за допомогою штучних нейронних мереж з використанням перетворення Фур'є", на *16 Міжнар. конф. з автоматичного управління „АВТОМАТИКА-2009”*, Чернівці, 2009, с. 291-293.
- [49] С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, и Я. Д. Гарабажив, "Корреляционный способ определения деформаций изображений, полученных методами дифракции электронов", на *Междунар. конф. „Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании’ 2007”*, Одесса, 2007, с. 85-89.
- [50] С. В. Баловсяк, та О. О. Пшеничний, "Детектування кіл та еліпсів на зображеннях з шумом за допомогою перетворення Хафа", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях»*, Чернівці, 2017, с. 81-82.

АНОТАЦІЯ

Баловсяк С. В. Багаторівневі методи оброблення електронно-дифракційних та X-променевих сигналів у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – "Комп'ютерні системи та компоненти". – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Запропоновано концепцію багаторівневого підходу до оброблення експериментальних сигналів, яка полягає в обчисленні й аналізі додаткових рівнів сигналів, комплексному їх обробленні множиною взаємопов'язаних методів, що забезпечує підвищення швидкодії або точності вищевказаних методів на порядок.

Створено комплекс методів для поетапного оброблення електронно-дифракційних зображень у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах (КІВС) на базі електронного мікроскопу, комплекси методів для оброблення X-променевих сигналів у КІВС на базі X-променевих дифрактометрів. Розроблено структуру, апаратне і програмне забезпечення КІВС на базі електронного мікроскопу «Zeiss EVO 50» та КІВС на базі X-променевих дифрактометрів ДРОН-3М та ДРОН-4.

Ключові слова: багаторівневі методи, цифрове оброблення сигналів, електронно-дифракційні сигнали, X-променеві сигнали, комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи, інтерполяція сигналів, локальне оброблення зображень, фільтрація сигналів, енергетичні спектри.

АННОТАЦИЯ

Баловсяк С. В. Многоуровневые методы обработки электронно-дифракционных и рентгеновских сигналов в компьютеризованных информационно-измерительных системах. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук за специальностью 05.13.05 – "Компьютерные системы и компоненты". – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Диссертационная работа посвящена теоретическому обобщению многоуровневых методов анализа сигналов в компьютеризованных информационно-измерительных системах (КИИС), что позволило получить новое решение важной научно-технической проблемы повышения точности и быстродействия обработки электронно-дифракционных и рентгеновских сигналов.

Предложено концепцию многоуровневого подхода к обработке экспериментальных сигналов, которая заключается в вычислении и анализе дополнительных уровней сигналов, комплексной их обработке множеством взаимосвязанных методов, что обеспечивает повышение быстродействия или точности вышеуказанных методов на порядок.

Создан комплекс методов для поэтапной обработки электронно-дифракционных изображений (изображений полос Кикучи) в КИИС на базе электронного микроскопа, комплекс методов для обработки рентгеновских сигналов в КИИС на базе рентгеновских дифрактометров; разработана структура, аппаратное и программное обеспечение КИИС на базе электронного микроскопа «Zeiss EVO 50» и КИИС на базе рентгеновских дифрактометров ДРОН-3М и ДРОН-4.

Разработаны теоретические основы и метод для анализа и синтеза профилей распределения интенсивности экспериментальных изображений, который основан на использовании конических сечений как огибающих серии профилей и вычислении усредненных профилей на основе их серии, что позволяет на порядок повысить точность вычисления геометрических параметров для усредненных профилей.

Предложены методы многоуровневой интерполяции одномерных и двумерных сигналов, в которых интерполированные сигналы состоят из суммы корректируемой и согласовывающей функций. Разработанные методы позволяют в среднем на 16% уменьшить погрешность интерполяции при повышении разрешающей способности экспериментальных сигналов.

Разработан новый быстродействующий метод повышения локального контраста и удаления неоднородного фона изображений, который использует значения огибающих минимальных и максимальных значений сигнала в пределах локальных окон, где огибающие вычисляются путем аппроксимации при использовании кубических полиномиальных функций.

Предложено математическую модель и метод адаптивной ориентированной фильтрации изображений в пространственной области, который в качестве ядра фильтра использует ориентированное двумерное распределение Гаусса. В случае фильтрации изображений полос Кикучи предложенный метод позволяет до 5 раз повысить точность вычисления их ширины.

Предложено математическую модель и метод ориентированной фильтрации изображений полос Кикучи в частотной области, который основан на пространственном выделении полос и их последующей фильтрации. Предложенный метод позволяет выделять изображение отдельной полосы из суперпозиции множества полос и до 7 раз повысить точность вычисления ширины полос, а соответственно и точность расчета параметров исследуемых кристаллов.

Разработан новый высокоточный и быстродействующий метод совмещения изображений объектов с использованием генетических алгоритмов. Для генетических алгоритмов выбрана структура хромосом, которая описывает основные пространственные преобразования изображений и изменения их яркости.

Предложен новый метод многоуровневого анализа энергетических спектров изображений, в частности рентгеновских муаровых изображений, который используют многомасштабную обработку энергетических спектров и их анализ для локальных областей изображений с помощью квадродерева. Выбором оптимального масштаба изображения обеспечивается до 2 раз большая точность решения обратной задачи при вычислении параметров исследуемых образцов на основе экспериментальных сигналов.

Усовершенствован метод детектирования пространственного положения отрезков прямых, кругов и эллипсов на изображениях, который основан на преобразовании Хафа, низкочастотной фильтрации начального изображения и аккумулятора метода Хафа. Используемая низкочастотная фильтрация позволяет определять координаты объектов с точностью до пикселя.

Получили последующее развитие: высокоточный многоуровневый метод автоматического определения уровня гауссового шума на изображениях; квазиоптимальный метод фильтрации импульсного и гауссового шумов на изображениях; метод вейвлет-фильтрации с использованием семейства биортогональных вейвлетов; быстродействующий многомасштабный метод использования искусственных нейронных сетей для решения обратных задач восстановления структурных параметров образцов на основе экспериментальных рентгеновских сигналов; высокоточный метод деконволюции изображений с использованием ориентированного двумерного распределения Гаусса как функции рассеивания точки.

На основе полученных теоретических положений разработаны программные средства для КИИС, которые отличаются высокой точностью и быстродействием. Компьютерное моделирование, экспериментальные исследования и внедрение разработанных средств в КИИС подтвердили адекватность разработанных теоретических основ и эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: многоуровневые методы, цифровая обработка сигналов, электронно-дифракционные сигналы, рентгеновские сигналы, компьютеризованные информационно-измерительные системы, интерполяция сигналов, локальная обработка изображений, фильтрация сигналов, энергетические спектры.

ABSTRACT

Balovsyak S.V. Multilevel methods for processing of electron-diffraction and X-ray signals in computerized information-measuring systems. – Qualification research work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.05 – "Computer systems and components". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The conception of multilevel approach to the processing of experimental signals is proposed, which consists in the calculation and analysis of additional levels of signals, their complex processing by a set of interrelated methods. It provides the increase of speed or accuracy of the mentioned methods in order.

The complex of methods for the staged processing of electron diffraction images in computerized information-measuring systems (CIMS) was created on the basis of an electron microscope, while complexes of methods for processing X-ray signals in CIMS were worked out on the basis of X-ray diffractometers. The structure, hardware and software for CIMS on the basis of electron microscope «Zeiss EVO 50» and CIMS on the basis of X-ray diffractometers DRON-3M and DRON-4 were developed.

Keywords: multilevel methods, digital signal processing, electron-diffraction signals, X-ray signals, computerized information measuring systems, signal interpolation, local image processing, signal filtering, power spectra.