

ДВНЗ «ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МОЛЧАНОВА ВІРА СЕРГІЙВНА

УДК 004.932::744.4

ДИСЕРТАЦІЯ
КОМПЛЕКС МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ І ВЕКТОРИЗАЦІЇ
РАСТРОВИХ ФОРМАТІВ КОНТУРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОБУДІВЕЛЬНИХ
КРЕСЛЕНЬ

05.13.06 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник
Чичкарьов Євген Анатолійович,
доктор технічних наук, доцент

Київ - 2018

АНОТАЦІЯ

Молчанова В.С. Комплекс методів попередньої обробки і векторизації растрових форматів контурів деталей машинобудівельних креслень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології» – ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» МОН України, Національний транспортний університет МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної наукової й практичної задачі розробки комплексу методів попередньої обробки і векторизації растрових зображень креслень деталей. Використання такого комплексу в автоматизованих системах інженерного документообігу дозволяє зменшити долю ручної праці й терміни створення електронних архівів креслень, підвищити їх якість.

1. На основі аналізу існуючих методів растр-векторного перетворення зображень креслень деталей встановлено, що досі не вирішені питання: втрати малорозмірних примітивів контурів деталей, низької якості бінаризації їх зображень (щодо характеристик яскравості, особливостей зашумлення, необхідності збереження топології контурів), структурних спотворень скелетизованого контуру, недостовірного розпізнавання й параметризації геометричних примітивів із довільною орієнтацією. Особливості предметної області вимагають удосконалення існуючих або розробки нових спеціалізованих методів обробки зображень.

Отримали подальшого розвитку методи усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень, що забезпечують істотне підвищення розрізнення фрагментів зображень креслень деталей без втрати малорозмірних примітивів їх контурів.

Мета досягається за рахунок:

- ітеративного розмиття шуму σ -фільтром без порушення топології контуру деталі та подальшого зменшення інтенсивності ослабленого шуму автоматичним контрастуванням зображення з адаптацією параметрів σ -фільтра й рівня контрастності зображення до інтенсивності шуму;

- апертурної обробки зображення розрідженими ядрами фільтрів підвищення чіткості зображення з адаптацією виду й розміру ядра до рівня шуму; у результаті компенсуються спотворення малорозмірних примітивів.

Отримали подальшого розвитку методи бінаризації кольорових напівтонів зображень, що забезпечують збереження топології контурів деталей:

- метод оцінки глобальних порогів бінаризації засновано на аналізі форм і співвідношення мод світла й тіні у гістограмах яскравості; це дозволяє врахувати глобальну яскравісну неоднорідність зображень;

- метод оцінки локальних адаптивних порогів бінаризації засновано на аналізі балансу яскравості областей інтересу з квазі-бімодальними гістограмами; це дозволяє врахувати локальні яскравісні особливості зображень з адаптацією до різних видів носіїв.

Удосконалено комплекс методів усунення остаточних спотворень растрових бінарних зображень креслень деталей, у складі якого:

- метод контурних масок, який видаляє фонові конгломерати чорних точок за рахунок сепарації точок зображення на контурні й фонові за формами утворених ними атомарних фігур;

- метод усунення контурних спотворень, який усуває чорну «бахрому» навколо контуру деталі й білу «бахрому» - в контурі деталі на основі апертурної просторової фільтрації бінарного зображення креслення деталі розробленими масками з асиметричними ядрами.

Розроблено комплекс методів усунення структурних спотворень скелетів, у складі якого:

- метод коригування спотворення топології кутів скелета, заснований на застосуванні «шахової» метрики замість «манхетенської» і масок розпізнавання кутів контуру;

- метод коригування порушень зв'язності скелета, заснований на застосуванні розробленої корегуючої маски;

- метод коригування порушення топології скелета в точках перетину геометричних примітивів, заснований на застосуванні розроблених регенеруючих масок.

Розроблено комплекс методів векторизації, що забезпечує достовірне розпізнавання й параметризацію відрізків прямих, еліпсів (у тому числі кіл) та їх дуг із довільною орієнтацією, у складі якого:

- метод розпізнавання та кодування характеристичних точок скелета контуру деталі, заснований на зіставленні точок скелета контуру розробленим маскам із метою розпізнавання вершин графа контуру деталі;

- метод формування зорієнтованого графа сегментів контуру деталі, заснований на тимчасовому стиранні околиць характеристичних точок;

- вдосконалений метод кодування графа сегментів контуру деталі ланцюговими Фрімен-кодами із застосуванням нового способу огляду околиць точок контуру; метод усуває проблему втрати частини його точок і прискорює процес кодування за рахунок використання перспективних напрямків сканування скелета;

- методи розпізнавання й параметризації ребр графа контура деталі, засновані на використанні виявлених структурних закономірностей форм геометричних примітивів креслень деталей, а також вперше сформульованих правил синтаксичного аналізу ребр графа;

- метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру деталі, заснований на використанні вперше сформульованих правил рекурсивного бісекціонування й структурно-лінгвістичному аналізі виділених сегментів контуру;

– метод синтезу й оптимізації вектор-контуру деталі, заснований на аналізі зорієнтованого зваженого графа розпізнаних і параметризованих геометричних примітивів та структур їх зв'язності з застосуванням розробленого методу визначення їх товщини.

Аналіз результатів тестування розробленого комплексу методів на репрезентативній вибірці зображень машинобудівельних креслень деталей показав підвищення якості їх растр-векторної трансформації: фільтрації растрових кольорових напівтонових зображень - на 18,55%, бінаризації фільтрованих зображень - на 17,40%, фільтрації бінарних зображень - на 35,71%, скелетизації бінарних контурів деталей - на 25,77%, розпізнавання форм геометричних примітивів - на 49,53%, параметризації геометричних примітивів - на 18,61%. Це підтверджує достовірність й ефективність розробленого комплексу методів. Розроблений комплекс методів зорієнтовано на використання в автоматизованих системах інженерного документообігу.

Ключові слова: креслення, растрове зображення, векторний образ, фільтрація, бінаризація, скелетизація, розпізнавання, параметризація, векторизація.

Список публікацій здобувача

Публікації у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Молчанова В. С. Адаптивный пороговый метод бинаризации растровых изображений технических чертежей // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2015. – 2(33). – С.62-70.

2. Молчанова В. С. Разработка гибридного адаптивного метода подавления шума в растровом образе чертежа детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 4(74). – С.35-43.

3. Чичкарёв Е. А., Молчанова В. С. Модель и метод векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей // Проблеми інформаційних технологій. – 2016. – 1(19). – С.64-74.

4. Molchanova V. S. The technique of homotopic skeletonization of bit-mapped drawings of parts of sea transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – 1(44). – P. 139-148.

Публікації у фахових виданнях

5. Деглина Ю. Б., Денисова В. С. Автоматные алгоритмы синтеза образов // Искусственный интеллект. – 2008. – №3. – С.290-295.

6. Козловский В. А., Молчанова В. С. Построение автоматных моделей простейших графических примитивов // Искусственный интеллект. – 2010. – №4. – С.375-380.

7. Молчанова В. С. Автоматный алгоритм распознавания геометрических примитивов на растровом изображении // Наук. вісник Чернівецького нац. ун-ту ім. Ю. Федьковича. Серія: комп'ютерні системи та компоненти. – 2012. – Том 3, випуск 2. – С.49-55.

8. Молчанова В. С. Восьмисвязный асимметричный алгоритм скелетизации бинарных изображений // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія: Техн. Науки. – 2013. – №2. – С.43-50.

9. Молчанова В. С. Задача классификации сложных специфических объектов на растровых изображениях технических чертежей // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – 1(15). – С.155-160.

10. Бурса А. Г., Молчанова В. С. Комплекс методов фильтрации сканированных изображений графиков функций // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2016. – №2(33). – С.159-168.

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи

11. Козловский В. А., Молчанова В. С., Деглина Ю. Б. Синтез автоматически представленных образов // Сборник тезисов Двенадцатой международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (Донецк, 16-23 сентября 2009). – Донецк-Москва: ИПММ НАНУ. – 2009. – С.47-48.

12. Молчанова В. С, Деглина Ю. Б. Автоматное представление дуги окружности // Тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 25-27 листопада 2009). – Дніпропетровськ: видавництво ДНУ ім. Олеса Гончара. – 2009. – С.190-191.

13. Козловский В. А., Молчанова В. С. Синтез автоматов, описывающих графические примитивы // Збірка праць VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 23-25 листопада 2010). – Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – С.337-342.

14. Молчанова В. С. Модели графических примитивов и их композиций // Збірка матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг» (Донецьк, 11-13 квітня 2011). – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – С.247-250.

15. Козловский В. А., Молчанова В. С., Бурса А. Г. Модель растрового изображения и её преобразование // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (17-22 апреля 2011). – Харьков: Апостроф. – 2011. – С.178-179.

16. Молчанова В. С. (2013). Решение задачи топологического утончения объектов бинарного растра с использованием специализированных агентов // Збірка матеріалів IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг». Донецьк: ДонНТУ. – 2013. – С.743-747.

17. Молчанова В. С. Эффективный алгоритм фильтрации изображений в процессе обработки специализированной конструкторской документации. Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы матема-

тики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (29 сентября-4 октября 2014). – Харьков: Апостроф. – 2013. – С.133-134.

18. Молчанова В. С. Метод распознавания характеристических точек скелета контура растрового образа чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2015». Мариуполь: ПГТУ. – 2015. – С.193-195.

19. Чичкарев Е. А., Молчанова В. С. Метод формирования векторной модели чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2016». Мариуполь: ПГТУ. – 2016. – С.147-148.

20. Молчанова В. С., Чичкарев Е. А. Модель процесса бинаризации в задаче растр-векторной трансформации изображений машиностроительных чертежей деталей // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем» (Київ, 5-9 грудня 2016). – Кіровоград: Центр оперативної поліграфії «Авангард». – 2016. – С.182-187.

ABSTRACT

Molchanova V.S. Complex of methods for preliminary processing and vectorization of raster formats of contours of parts of engineering drawings - Manuscript. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.13.06 "Information Technologies" - State University "Priazovsky State Technical University", National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and practical task of developing a complex of methods of preliminary processing and vectorization of raster images of drawings of parts. The use of such a complex in automated engineering workflow systems reduces the share of manual labor and the timing of creating electronic archives of drawings, improving their quality.

On the basis of the analysis of existing methods of raster-vector transformation of drawings of details of details, it has been established that issues still unresolved: the loss of small-sized primitives in the contours of parts, the low quality of binarization of their images (in terms of brightness characteristics, noises, the need to preserve the contour topology), structural distortions of the skeletonized contour, inaccurate recognition and parametrization of geometric primitives with arbitrary orientation. Features of the subject area require the improvement of existing or the development of new specialized methods of image processing.

Further development of methods for elimination of distortions of raster color Half Ton images, which provide a significant increase in the separation of fragments of images of drawings of parts without loss of small-scale primitives of their contours.

The goal is achieved through:

- an iterative blur of noise by an σ -filter without breaking the contour of the part and further reducing the intensity of the attenuated noise by automatically contrasting the image with the adaptation of the σ -filter parameters and the contrast level of the image to the intensity of the noise;
- aperture image processing with sparse filter kernels to enhance image clarity with the adaptation of the type and size of the core to the noise level; As a result, distortion of small-scale primitives is compensated.

The further development of methods of binaryization of color halftone images, which ensure the preservation of the topology of contours of details, has been further developed:

- the method of evaluating global thresholds for binarization is based on the analysis of forms and the ratio of modes of light and shadow in the histograms of brightness; This allows you to take into account the global brightness heterogeneity of images;
- the method of evaluating local adaptive thresholds of binarization is based on the analysis of the balance of brightness of areas of interest with quasi-bimodal histograms; it allows to take into account the local bright features of images with the adaptation to different types of media.

The complex of methods of elimination of the final distortions of raster binary images of the drawings of details, which includes:

- the method of contour masks, which removes background conglomerates of black dots due to the separation of points of the image on the contour and background by the forms of atomic figures formed by them;
- method of eliminating contour distortions, which eliminates the black "fringe" around the contour of the part and the white "fringe" - in the contour of the part based on the aperture spatial filtration of the binary image of the drawing of the part of the developed masks with asymmetric kernels.

A complex of methods of elimination of structural distortions of skeletons is developed, in which:

- the method for correcting the distortion of the topology of the skeleton's corners, based on the use of the "chess" metric instead of "Manhattan" and the mask recognition of the contour angles;
- the method of correction of skeletal connective disorders, based on the application of the developed corrective mask;
- the method of correcting the violation of the topology of the skeleton at the points of intersection of geometric primitives, based on the application of developed regenerating masks.

A complex set of vectorization methods is developed that provides reliable recognition and parametrization of straight lines, ellipses (including circles) and their arcs with arbitrary orientation, which include:

- the method of recognition and encoding of the characteristic points of the skeleton of the contour of the detail, based on the comparison of points of the skeleton of the contour with the developed masks for the purpose of recognition of the vertices of the contour graph of the part;
- the method of forming an oriented graph of the segments of the contour of the part, based on the temporary erosion of the neighborhoods of characteristic points;
- an advanced method of encoding graph of segments of the contour of a part by chain Freeman codes with the use of a new way of viewing the contours of the points of the contour; the method eliminates the problem of the loss of a part of its points and accelerates the process of encoding due to the use of perspective skeleton scanning directions;
- methods of recognition and parametrization of the edges of the contour graph of the part based on the use of the revealed structural patterns of the forms of the geometric primitives of the drawings of the details, as well as for the first time formulated rules of the syntactic analysis of the edges of the graph;

- the method of recognizing primitive compositions in the parts of the contour of the part, based on the use of the first formulated recursive rules bisecting and structurally-linguistic analysis of the selected segments of the contour;
- the method of synthesis and optimization of the vector-contour of the part, based on the analysis of the oriented weighted graph of the recognized and parametrizable geometric primitives and the structures of their connection with the application of the developed method for determining their thickness.

Analysis of the results of the testing of the developed set of methods on a representative sample of images of machine-building drawings of parts showed an increase in the quality of their raster-vector transformations: the filtering of raster color halftone images - by 18.55%, binaryization of filtered images - by 17.40%, binary image filtration - by 35 , 71%, skeletonization of binary contours of parts - by 25.77%, recognition of forms of geometric primitives - by 49.53%, parametrization of geometric primitives - by 18.61%. This confirms the reliability and efficiency of the developed set of methods. The developed set of methods is oriented to the use in automated systems engineering workflow.

Key words: drawing, raster image, vector image, filtration, binarization, skeletonization, recognition, parametrization, vectorization.

List of publisher publications

Publications in editions included in international science-computer bases

1. Молчанова В. С. Адаптивный пороговый метод бинаризации растровых изображений технических чертежей // Радиотехника, информатика, управление. – 2015. – 2(33). – С.62-70.
2. Молчанова В. С. Разработка гибридного адаптивного метода подавления шума в растровом образе чертежа детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 4(74). – С.35-43.

3. Чичкарёв Е. А., Молчанова В. С. Модель и метод векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей // Проблемы інформаційних технологій. – 2016. – 1(19). – С.64-74.

4. Molchanova V. S. The technique of homotopic skeletonization of bit-mapped drawings of parts of sea transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – 1(44). – P. 139-148.

Publications in professional editions

5. Деглина Ю. Б., Денисова В. С. Автоматные алгоритмы синтеза образов // Искусственный интеллект. – 2008. – №3. – С.290-295.

6. Козловский В. А., Молчанова В. С. Построение автоматных моделей простейших графических примитивов // Искусственный интеллект. – 2010. – №4. – С.375-380.

7. Молчанова В. С. Автоматный алгоритм распознавания геометрических примитивов на растровом изображении // Наук. вісник Чернівецького нац. ун-ту ім. Ю. Федьковича. Серія: комп'ютерні системи та компоненти. – 2012. – Том 3, випуск 2. – С.49-55.

8. Молчанова В. С. Восьмисвязный асимметричный алгоритм скелетизации бинарных изображений // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія: Техн. Науки. – 2013. – №2. – С.43-50.

9. Молчанова В. С. Задача классификации сложных специфических объектов на растровых изображениях технических чертежей // Проблемы інформаційних технологій. – 2014. – 1(15). – С.155-160.

10. Бурса А. Г., Молчанова В. С. Комплекс методов фильтрации сканированных изображений графиков функций // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2016. – №2(33). – С.159-168.

Materials of the conferences, where the testing of work is carried out

11. Козловский В. А., Молчанова В. С., Деглина Ю. Б. Синтез автоматически представленных образов // Сборник тезисов Двенадцатой международной

научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (Донецк, 16-23 сентября 2009). – Донецк-Москва: ИПММ НАНУ. – 2009. – С.47-48.

12. Молчанова В. С, Деглина Ю. Б. Автоматное представление дуги окружности // Тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 25-27 листопада 2009). – Дніпропетровськ: видавництво ДНУ ім. Олеса Гончара. – 2009. – С.190-191.

13. Козловский В. А., Молчанова В. С. Синтез автоматов, описывающих графические примитивы // Збірка праць VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 23-25 листопада 2010). – Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – С.337-342.

14. Молчанова В. С. Модели графических примитивов и их композиций // Збірка матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг» (Донецьк, 11-13 квітня 2011). – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – С.247-250.

15. Козловский В. А., Молчанова В. С., Бурса А. Г. Модель растрового изоб-ражения и её преобразование // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (17-22 апреля 2011). – Харьков: Апостроф. – 2011. – С.178-179.

16. Молчанова В. С. (2013). Решение задачи топологического утончения объектов бинарного раstra с использованием специализированных агентов // Збірка матеріалів IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг». Донецьк: ДонНТУ. – 2013. – С.743-747.

17. Молчанова В. С. Эффективный алгоритм фильтрации изображений в процессе обработки специализированной конструкторской документации. Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (29 сентября-4 октября 2014). – Харьков: Апостроф. – 2013. – С.133-134.

18. Молчанова В. С. Метод распознавания характеристических точек скелета контура растрового образа чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2015». Мариуполь: ПГТУ. – 2015. – С.193-195.

19. Чичкарев Е. А., Молчанова В. С. Метод формирования векторной модели чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2016». Мариуполь: ПГТУ. – 2016. – С.147-148.

20. Молчанова В. С., Чичкарев Е. А. Модель процесса бинаризации в задаче растр-векторной трансформации изображений машиностроительных чертежей деталей // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем» (Київ, 5-9 грудня 2016). – Кіровоград: Центр оперативної поліграфії «Авангард». – 2016. – С.182-187.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	19
 РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	 25
1.1 Аналіз особливостей растрових зображень креслень деталей	25
1.2 Аналіз методів обробки растрових зображень креслень	27
1.3 Аналіз методів фільтрації растрових зображень	30
1.4 Аналіз методів бінаризації растрових зображень	35
1.5 Аналіз методів скелетизації растрових зображень	37
1.6 Аналіз методів векторизації растрових зображень	41
1.7 Висновки і постановка задачі дослідження	45
 РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКС МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ РАСТРОВИХ КОЛЬОРОВИХ НАПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ КРЕСЛЕНЬ ДЕТАЛЕЙ	 47
2.1 Комплекс методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей	 47
2.2 Комплекс методів бінаризації растрових кольорових напівтонових фільтрованих зображень креслень деталей.....	 70
2.3 Комплекс методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень.....	 90
2.4 Висновки до розділу	107
 РОЗДІЛ 3. КОМПЛЕКС МЕТОДІВ ВЕКТОРИЗАЦІЇ КОНТУРІВ ДЕТАЛЕЙ У РАСТРОВИХ БІНАРНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ КРЕСЛЕНЬ	 110
3.1 Аналіз задачі векторизації контуру деталі	110
3.2 Комплекс методів векторизації скелетів контурів деталей.....	114

3.3	Метод розпізнавання і кодування характеристичних точок скелету контуру.....	115
3.4	Метод формування зорієнтованого графу сегментів контуру.....	119
3.5	Метод кодування графу сегментів контуру	121
3.6	Метод розпізнавання і параметризації ребер графу типу «відрізок прямої».....	124
3.7	Метод розпізнавання і параметризації ребер графу типів «еліпс» і «дуга еліпсу» з довільним кутом нахилу.....	130
3.8	Метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру	140
3.9	Метод синтезу й оптимізації векторного образу контуру	142
3.10	Висновки до розділу	148

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ І ВЕКТОРИЗАЦІЇ РАСТРОВИХ ФОРМАТІВ КОНТУРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОБУДІВЕЛЬНИХ КРЕСЛЕНЬ

4.1	Узагальнена схема растр-векторної трансформації зображень машинобудівельних креслень деталей	150
4.2	Методика проведення експериментів	154
4.3	Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей	155
4.4	Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей	157
4.5	Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень	161
4.6	Дослідження достовірності та ефективності комплексу	

методів векторизації контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень	163
4.7 Висновки до розділу.....	169
ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А. АКТИ ПРО ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	188
ДОДАТОК Б. ТЕСТОВІ РАСТРОВІ ЗОБРАЖЕННЯ КРЕСЛЕНЬ ДЕТАЛЕЙ	192
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ	203
ДОДАТОК Г. ПРИКЛАДИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ	245
ДОДАТОК Д. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	260

ВСТУП

Необхідність створення конкурентоспроможної продукції на підприємствах України стимулює впровадження комп'ютерних технологій роботи з електронними архівами конструкторської документації, ефективними інструментами підтримки яких є автоматизовані системи інженерного документообігу (АСІД). За оцінкою International Data Corporation і журналу Document Management, у Світі є більш 5 млрд. інженерно-технічних зображень (більше 65% з них - паперові креслення), що досі зберігаються у паперових архівах і обробляються застарілими методами. Накопичений досвід перетворення графічної інформації паперових креслень у цифрову форму з метою її включення до електронних архівів й інженерного документообігу дозволяє знизити вартість створення, зберігання, тиражування і розповсюдження креслень, дає великий економічний ефект. Креслення в електронних архівах проектних організацій повинні бути представлені не тільки цифровими копіями паперових оригіналів, а й математичними моделями, придатними для автоматизованого аналізу і синтезу креслень. Тому, проблема створення методів перетворення зображень креслень, що зберігаються в паперових архівах конструкторської документації, в електронні архіви в складі АСІД, актуальна і економічно виправдана.

Предметною областю даного дослідження є АСІД, де в якості документів виступають машинобудівельні креслення деталей, їх растрові зображення й векторні образи. Дослідження в області обробки растрових зображень (Путятин Є.П., Шлезінгер М.І., Дуда Р., Фолі Дж., Вельтмандер П.В., Абламейко С.В., Местецький Л.М., Gonsales R.C. та ін.) присвячені загальнотеоретичним методам їх растр-векторної трансформації: попередній обробці (фільтрації, бінаризації, скелетизації) і векторизації (розпізнаванню та параметризації геометричних примітивів). Результати цих досліджень, як правило, абстраговані від специфіки, властивій растровим зображенням креслень деталей (впливу виду носія на характеристики яскравості, особливостей зашумлення, необхідності збереження

структурних особливостей, тощо). Найчастіше це вимагає істотної модифікації розроблених на їх основі методів обробки зображень. У роботах, присвячених комп'ютерній обробці інженерних креслень, зазвичай розглядаються лише окремі аспекти цієї задачі (Темнов К. А., Міщеряков Ю. В., Москаленко С. В., Хрящев Д. А., Новиков Ю.Л.), поза її цілісності. Тому, задача розробки комплексу спеціалізованих методів попередньої обробки і векторизації растрових зображень креслень деталей для використання в АСІД актуальна, лежить у руслі сучасних теоретичних досліджень. Розв'язання цієї задачі має практичне значення, бо дозволяє знизити витрати ручної праці зі створення електронних архівів креслень, зменшити терміни розробки проектів, підвищити їх якість.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та грантами. Дисертаційну роботу виконано згідно плану науково-дослідних робіт ДВНЗ «ПДТУ», у рамках держбюджетної теми №0715U1984 «Розробка методу векторизації примітивів растрових зображень технічних креслень» (№ДР 0215U00095). Здобувач приймав участь у виконанні роботи як виконавець.

Мета роботи полягає у розробці комплексу ефективних методів трансформації растрових зображень машинобудівельних креслень деталей у гомотопні їм векторні образи.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні наукові задачі:

- проаналізувати існуючі методи растр-векторного перетворення зображень креслень деталей із метою виявлення можливості їх застосування у розглянутій предметній області;
- удосконалити методи підвищення об'єктивної якості кольорових напівтонових і бінарних зображень креслень деталей з урахуванням їх специфіки: особливостей зашумлення, яскравісних характеристик, необхідності підвищення розрізнення контурів деталей та збереження їх топології;

- удосконалити методи глобальної та адаптивної бінаризації кольорових напівтонових зображень креслень деталей з урахуванням специфіки їх яскравісних характеристик на різних носіях і потреби збереження цілісності контурів деталей;
- створити вдосконалений метод топологічної скелетизації контурів у бінарних зображеннях креслень деталей, який корегує типові спотворення скелетів та забезпечує їх гомотопність контурам деталей;
- розробити структурно-лінгвістичний метод векторизації растрових об'єктів, який забезпечує розпізнавання й параметризацію довільно-зорієнтованих типових примітивів у топологічно-складних контурах деталей;
- виконати тестування розроблених методів із використанням загальноприйнятих показників якості зображень.

Об'єкт дослідження - процес трансформації растрових зображень креслень деталей у гомотопні їм векторні образи.

Предмет дослідження - комплекс методів трансформації растрових зображень креслень деталей у гомотопні їм векторні образи.

Методи дослідження. У процесі дослідження використані фундаментальні положення теорії обробки зображень і комплекс взаємодоповнюючих загальнонаукових та спеціальних методів. Методи аналізу застосовані для встановлення зв'язків між частинами досліджуваного процесу при розробці узагальненої схеми растр-векторної трансформації зображень креслень деталей. Методи синтезу застосовані для об'єднання етапів обробки зображень в єдину інформаційну технологію растр-векторної трансформації машинобудівельних креслень деталей. Формалізація предметної області використана для компактного представлення даних під час автоматизованої обробки. Експеримент послужив основою для перевірки запропонованих теоретичних положень на тестових зразках. Методи математичної статистики використані для оцінки якості розроблених методів. Інформаційною базою дослідження є репрезентативна вибірка зображень креслень

деталей, що спотворена різними видами яскравісного і хроматичного шуму й містить топологічно-складні контури деталей різної товщини.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

- запропоновано набір коригувальних масок та алгоритм прийняття рішень, на основі яких розроблено комплекс методів усунення структурних спотворень скелетів контурів деталей за рахунок двохстадійного коригування та відновлення гомотопності скелета на стадіях його ітеративного стоншення та завершення скелетизації;

- запропонована модель вектор-контур у вигляді зорієнтованого зваженого графа, вершинами якого є характеристичні точки зображення, які визначаються за допомогою розробленого набору шаблонів, а ребрами – найбільш ймовірні геометричні примітиви скелета, які визначаються лінгвістичними правилами ідентифікації;

- розроблено метод векторизації (розпізнавання та параметризації) Фрімен-кодованих геометричних примітивів контуру деталі, що базується на вперше сформульованих правилах синтаксичного аналізу ребер графа з оцінкою їх ваги, а у випадку складних композицій примітивів - на застосуванні запропонованої методики рекурсивного бісекціонування;

удосконалено:

- спосіб кодування ребр графу ланцюговими Фрімен-кодами на основі запропонованої гібридної схеми огляду околиць точок контуру;

- спосіб усунення залишкового шуму у бінарних зображеннях креслень деталей із використанням нових методів контурних масок і видалення контурних спотворень, заснованих на просторово-апертурній фільтрації зображення розробленими масками сепарації контуру і фону.

отримали подальшого розвитку:

- метод підвищення чіткості контуру деталі за рахунок компенсації спотворень малорозмірних примітивів шляхом розрідження ядер фільтрів підвищення чіткості з адаптацією виду і радіусу розрідження їх ядер;

- двохстадійний метод бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей, шляхом розрахунку оцінок двох глобальних порогів бінаризації на основі форм і відношення мод світла й тіні у гістограмі яскравості зображення, а також розрахунку оцінок локальних порогів бінаризації на основі балансу яскравості областей інтересу з квазі-бімодальними гістограмами.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблений комплекс методів зорієнтовано на використання в АСІД. Практичну значущість наукових результатів дослідження підтверджено впровадженням на промислових підприємствах: ТОВ «АГ Сталь» (акт впровадження від 08.10.2014) та ПАТ «Азовзагальмаш» (акт впровадження від 31.03.2015), а також у навчальному процесі ДВНЗ «ПДТУ» (довідка про впровадження від 03.10. 2017 р.).

Апробація результатів дослідження. Основні результати дослідження доповідалися і обговорювалися на: міжнар. наук.-практ. конф.: «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 25-27.11.2009), «Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених» (Донецьк, 25-27.05. 2010), «Сучасні проблеми математики та її застосування у природничих науках та інформаційних технологіях» (Харків, 17-22.04.2011), «Сучасні проблеми математики, механіки та інформатики» (Харків, 29.09-04.10.2013); міжнар. наук.-техн. конф.: «Університетська наука - 2008» (Маріуполь, 16-18. 05.2008), «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 23-25.11.2010), «Моделювання, ідентифікація, синтез систем керування» (Канака, 09-16.09.2012), «Університетська наука - 2013» (Маріуполь, 19-21.05.2013), «Університетська наука - 2014» (Маріуполь, 20-21.05.2014), «Університетська

наука - 2015» (Маріуполь, 19-20.05.2015), «Університетська наука - 2016» (Маріуполь, 18-20.05. 2016), «Університетська наука - 2017» (Маріуполь, 19-21.05. 2017).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 29 наукових праць, у тому числі 9 статей: 6 – у фахових виданнях, 3 – у виданнях, цитованих у міжнародних науково-метричних базах, і 20 публікацій – у збірниках праць наук.-техн. конф. Загальний обсяг публікацій склав 8,75 друк. арк.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані особисто здобувачем і ґрунтуються на опублікованих наукових результатах. При підготовці публікацій зі співавторами внесок здобувача був визначальним: у [135] розроблено методи розпізнавання примітивів контуру деталі, у [12] розроблено комплекс структурно-лінгвістичних методів векторизації растрового скелета контуру деталі, у [13] розроблено модифікацію методу кодування контуру деталі, у [149] розроблено комплекс методів усунення напівтонових спотворень контурів.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 171 с. основного тексту, 65 рис., 9 табл., 5 дод. на 75 с., список із 149 джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз особливостей растрових зображень креслень деталей

Оригінал машинобудівельного креслення згідно ДЕСТ 2.102-68 [14] виконується на ватмані, а для зберігання в архіві робиться його копія на кальці або «синьці» й оцифровується скануванням з отриманням зазвичай графічного напівтонового кольорового растрового зображення. У науковій літературі, присвяченій аналізу зображень і машинній графіці [6, 8, 10], під растровим зображенням R креслення деталі розуміється прямокутна матриця $[r_{ij}]_{MN}$ розміром $M \times N$ точок, кожен елемент якої з координатами (i, j) характеризується значенням коду C_k кольору з палітри $\{C_k\}_K$ з K кольорів. Напівтонове креслення деталі характеризується плавною зміною тонів різного кольору (кольорове) або одного кольору (монохромне); бінарне зображення - двокольорове (зазвичай чорно-біле). Растрове зображення креслення деталі можна умовно поділити на фон Ψ і контур G [18, 20]. У просторі растрових координат фон Ψ є множиною точок $\{\psi_{ij}\} \in (\Psi \subset R)$, кожен елемент якої характеризується значенням коду кольору $C_k^\Psi \in \{C_k\}_K$ (зазвичай це код «0» кольору «білий»). Контур G являє собою площадковий об'єкт з товщиною $W \geq 1$, який заданий множиною точок $\{g_{ij}\} \in (G = R \setminus \Psi)$, кожен елемент якої характеризується обраним для контуру значенням коду кольору $C_k^G \in \{C_k\}_K$, $C_k^G \neq C_k^\Psi$ (зазвичай це код «1» кольору «чорний»). У [106, 107] показано, що контур деталі являє собою композицію (агрегат) різно-типних графічних примітивів - відрізків прямих і дуг кривих другого порядку, складну як з точки зору математичного опису, так і з точки зору способів растрового представлення. Метричні характеристики графічних примітивів зумовлені стандартами [15-17]. У процесі контурного аналізу розпізнається топологія геометричних примітивів розрахунком їх метричних властивостей і зіставленням з метричними властивостями еталонних зразків. У результаті примітиви

відносяться до деякого типу і параметризуються з метою формування чисельних значень їх геометричних характеристик (довжина, ширина, товщина та ін.) у певній метриці. Растрову відстань між точками $(i, j)_a$ і $(i, j)_b$ зображення креслення деталі обчислюють у цілочисельних метриках: «манхетенській» $\rho_{ab}^{(M)}$ (1.1) і «шаховій» $\rho_{ab}^{(III)}$ (1.2), відповідно до 4-х або 8-зв'язкового алгоритму Брезенхе-ма [11].

$$\rho_{ab}^{(M)} = |(i_a - i_b)| + |(j_a - j_b)| \quad (1.1)$$

$$\rho_{ab}^{(III)} = \max |(i_a - i_b)|, |(j_a - j_b)| \quad (1.2)$$

Параметри растрових геометричних примітивів різноманітні: координати опорних точок (у тому числі координати початку і кінця відрізка прямої й дуги кривої другого порядку), координати центрів дуг кривих і радіуси їх кривизни, товщини ліній тощо (стандартами визначається лише товщина лінії). Хоча зазвичай вважається, що контурна лінія сама по собі несе всю інформацію про форму геометричного примітиву, але для кривих другого порядку інформацію про форму несуть також центри дуг, фокуси і розміри півосей, що не належать контуру.

На результат попередньої обробки і векторизації растрових образів креслень деталей значно впливають такі найбільш характерні їх особливості (рис. 1.1): довжина ліній може варіюватися у значних межах, лінії з розривами представлені агрегатами відрізків прямих (наприклад, штрихові та штрихпунктирні лінії), лінії можуть бути нахилені відносно осей координат під довільними кутами, заштриховані області не завжди замкнуті, різнотипні лінії можуть перетинатися і сполучатися довільним чином, дуги растрових кривих з великими радіусами кривизни у локальних фрагментах креслення мало відрізняються від відрізків прямих, дуги кривих з малими радіусами кривизни у растровому поданні мало схожі на криві другого порядку, лінії, як правило, спотворені візуальним шумом.

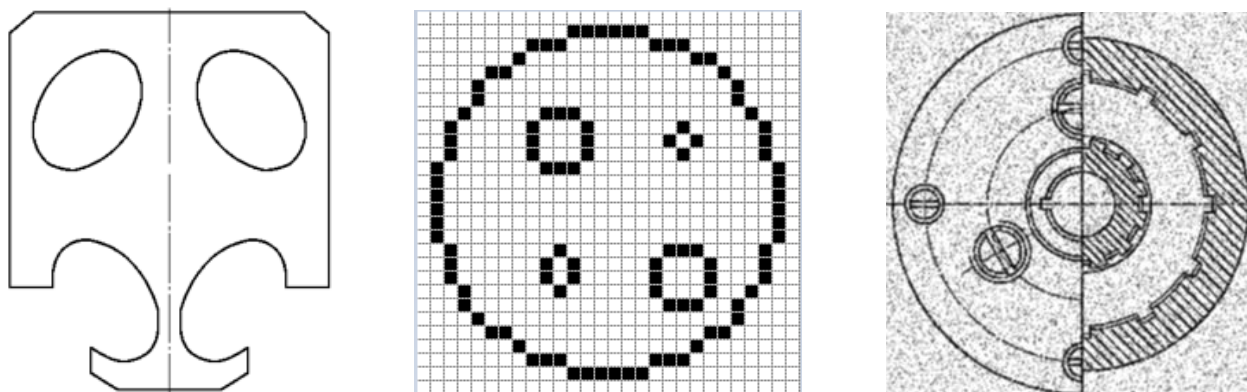


Рисунок 1.1

Ці особливості істотно ускладнюють контурний аналіз і класифікацію геометричних примітивів. Векторизація ж (розпізнавання і параметризація) примітивів і їх композицій на базі растрових образів креслень деталей і зовсім стає нетривіальним завданням; спроба виконання цих дій універсальними засобами часто призводить до незадовільних результатів. Тому методи попередньої обробки і векторизації растрових образів креслень мають враховувати ці особливості у першу чергу.

1.2 Аналіз методів обробки растрових зображень креслень

Найбільш всебічно задачі попередньої обробки і векторизації растрових зображень креслень розглянуті у роботах [18, 111, 112], в яких запропоновані методи їх фільтрації, бінаризації, скелетизації й векторизації.

Запропоновані у [18] академічні методи зорієнтовані на обробку узагальнених зображень (карт місцевості, схем друкованих плат, креслень), але не враховують специфічні особливості предметної області, що розглядається. Так, наприклад, допустимі похибки структурних особливостей карт місцевості і зображень машинобудівельних креслень деталей істотно різні. Крім того, ці методи розглянуті окремо, без урахування необхідності усунення похибок і спотворень, що виникають при поетапній обробці зображень креслень деталей.

Теоретичні засади векторизації машинобудівельних креслень розглянуті у [111], де показано наступний порядок відокремлення об'єктів у растровому образі: відрізки прямих і дуги кіл, штрихові та штрих-пунктирні лінії, заштриховані області, розмірні лінії і рядки тексту. Однак, ці принципи вимагають наявності якісного вихідного зображення (що не містить будь-яких артефактів), принцип отримання якого не визначено. У [112] описано систему векторизації растрових образів інженерних креслень VEDI, створену на основі запропонованих у [111] методів їх обробки; однак, автори самі вказують на недостовірність розпізнавання типів геометричних примітивів та їх параметрів. До того ж програмний код VEDI не є відкритим, що ускладнює його якісну оцінку і модифікацію. Істотним недоліком VEDI слід вважати високі вимоги до якості вихідного зображення (оскільки попередню обробку ця система не виконує).

Робота [106] присвячена розробці спеціалізованого векторизатора для конструкторської документації. Основну увагу при цьому приділено векторизації допоміжних об'єктів: розмірних ліній, стрілок, штрихування. Однак, хоча в описі алгоритму функціонування цього векторизатора і згадуються етапи попередньої обробки креслення, фактично його фільтрація і бінаризація не розглянуті. При цьому векторизуються лише примітиви двох типів: відрізок прямої й окружність. Цього явно недостатньо для уявлення навіть нескладного образу машинобудівельного креслення деталі. Можливість удосконалення використовуваного для векторизації підходу сумнівна, оскільки він заснований на методі Хафа [70, 71], який складно застосувати для розпізнавання і параметризації фігур, складніших за окружність, наприклад, еліпса з довільною орієнтацією або його дуги. Запропонована у [106] ідея векторизації таких кривих апроксимуючим сплайном неконструктивна, оскільки призводить до втрати типів і геометричних характеристик примітивів, а також неможливості модифікації креслення засобами САПР.

Питання попередньої обробки машинобудівельних креслень розглянуті у [107], де представлені методи: фільтрації, бінаризації, видалення розривів ко-

нтурних ліній. Проте, представлений у роботі алгоритм дозволяє розпізнавати лише відрізки прямих. Крім того, він потребує нормалізації зображення його поворотом, так щоб лінії стали ортогональними відносно одна одної й координатних осей. Слід, однак, зауважити, що поворот растрового зображення призводить до неприйняттого у даній предметної області суттєвого спотворення форми і параметрів примітивів. Далі нормалізоване зображення сканується у горизонтальному і вертикальному напрямках з метою відокремлення точок контуру від точок фону. Треба зазначити, що це істотно підвищує трудомісткість і ресурсоемність обчислень, хоча таке уявлення ліній у подальшому й дозволяє позбутися шуму. Перевагою цього методу є зручність розрахунку товщини ліній контуру. Задачу розпізнавання кривих другого порядку у роботі не розглянуто зовсім.

Методи, запропоновані у [108], припускають уявлення результуючого векторного образу графом, вершинами якого є об'єкти, а ребрами - відносини між ними. Для збереження вершин і ребер графа пропонується використовувати спеціальні структури, поля яких містять відстані або кути між об'єктами. В якості вихідних даних метод вимагає наявності якісних бінарних растрових зображень креслень, хоча методи їх попередньої обробки у роботі не розглянуто в принципі. Перевагою такого підходу є його інваріантність щодо масштабу й повороту об'єктів, можливість досить точного відображення їх просторового розташування. Розпізнавання геометричних об'єктів пропонується виконувати на підставі ступеня відповідності робочого й еталонного графів. Цей процес є трудомістким і складно реалізовується, оскільки неясною залишається наявність і можливість побудови еталонних графів для довільно розташованих геометричних примітивів креслення. Для отримання скелета контуру пропонується використовувати хвильовий метод [48], який призводить до отримання скелета у вигляді ламаної лінії з надмірною кількістю відрізків. Для розглянутої у дисертації предметної області це є неприйнятним, бо призводить до втрати гомо-

топності контуру деталі його скелетові, й, у кінцевому рахунку, - до недостовірної векторизації примітивів креслення деталі.

Виконаний аналіз існуючих методів обробки зображень креслень дозволяє зробити наступні висновки:

- академічні методи, що дають добрий результат в окремих випадках обробки креслень, як правило, використовують ідеальні вихідні зображення і не враховують специфіку даної предметної області;
- методи, що спеціалізовані на розглянуту предметну область, як правило, не беруть до уваги додаткові спотворення, що виникають на кожному етапі обробки вихідних образів креслень деталей;
- хоча кожен з етапів обробки зображень креслень деталей (фільтрацію, бінаризацію, скелетизацію, векторизацію) можна розглядати як самостійну задачу, методи, що використовуються при розв'язанні цих задач, доцільно розглядати комплексно;
- задача векторизації зображень машинобудівельних креслень деталей комплексно не ставилася і не розв'язувалася.

1.3 Аналіз методів фільтрації растрових зображень

Причини появи візуальних дефектів зображення, що називають шумом, при оцифруванні оригіналів креслень описані у [18-21]. Зашумлення растрових зображень креслень негативно позначається на якості їх попередньої обробки та векторизації, залежить від виду носія (ватман, калька, «синька») і є результатом спотворень, що ненавмисно виникають через: низьку якість оригіналу креслення, характеристики пристроїв оцифровки зображень (дисторсія, розфокусування, оптична роздільна здатність сканеру), не оптимальну яскравість і контрастність тощо. Тому, важливим завданням попередньої обробки растрових зображень креслень є покращення їх якості, що виражається у підвищенні розрізнення контуру й фону креслення деталі як на глобальному рівні (креслення у

цілому), так і на локальному рівні (фрагментів креслення, у тому числі малорозмірних примітивів і тонких ліній).

За визначенням з [20], фільтрація є фундаментальною операцією обробки зашумлених зображень креслень і зводиться до їх очищення від шуму застосуванням деякого набору правил (фільтрів) з метою отримання зображення, еквівалентного за своїми характеристиками незашумленому оригіналу. Система класифікації дефектів растрових зображень креслень, представлена у [20], дозволяє поділити їх на групи:

1. Перша група дефектів представлена геометричними спотвореннями всього зображення, наприклад, перекис (кутове відхилення) через невірну орієнтацію носія у сканері, нестандартний формат, тощо. Такі дефекти зображень можуть бути усунені спеціальними засобами растрової корекції.

2. Друга, найбільш поширена група дефектів, представлена:

- спотвореннями: нерівномірна яскравість і контрастність, паразитна тональність фону, розмиття контуру деталі;

- растровим шумом: конгломератами кольорових точок у напівтонових зображеннях, білими артефактами на контурі деталі й чорними - навколо нього у бінарних зображеннях, розривами і «бахромою» контурів.

В задачі шумопригнічення у зображеннях креслень деталей (розділ 1.1) значимими є наступні особливості зображень креслень деталей:

1. Товщина ліній деяких графічних примітивів обмежена однією або декількома точками, що при фільтрації може призвести до їх видалення, як шуму, з результуючого зображення.

2. Зустрічаються малорозмірні контрастні об'єкти (наприклад, штрихи і точки у штрих-пунктирних лініях), які при фільтрації можуть сприйматися як шум.

3. У локальних фрагментах зображень креслень деталей (наприклад, у межах штриховок) різко погіршується співвідношення «сигнал / шум».

4. Зважаючи на контурно-штриховий стиль, зображенням креслень деталей властива стрибкоподібна зміна яскравості точок. У цьому випадку ознакою корисного сигналу є різкі перепади яскравості у локальній околиці зображення.

З огляду на вищевикладене, до методів фільтрації зображень креслень деталей ставляться специфічні вимоги збереження: малорозмірних примітивів, тонких ліній, топології контуру деталі у цілому. Якість же фільтрації зображень креслень слід оцінювати двома взаємно-суперечливими критеріями: здатністю фільтра видаляти із зображень паразитний шум і здатністю фільтра зберігати форму (топологію) контуру деталі.

Найбільш популярні методи фільтрації зображень [8, 11, 18, 21-23, 25-30], у залежності від характеру математичних моделей, на основі яких вони побудовані, класифікуються на:

- методи просторової фільтрації, де використовуються спеціальні оператори (маски) до кожної точки вихідного зображення [18];
- методи частотної фільтрації, засновані на обробці сигналів за допомогою частотних перетворень [8];
- методи морфологічної фільтрації, засновані на теорії множин [11, 21];
- нечіткі методи фільтрації, засновані на використанні нелінійних нечітких фільтрів [22] і теорії навчання нейронних мереж [23].

Згідно з [18] основна ідея методів просторової фільтрації зображень полягає в оцінці вихідного значення яскравості будь-якої точки зображення на основі її власної яскравості й яскравості сусідніх точок вибірки, що накривається «апертурою» фільтра. Апертура фільтра характеризується формою, розміром і конфігурацією ядра (наприклад: $\Omega_{3 \times 3} = \{\{101\}, \{010\}, \{101\}\}$). Під час зондування вихідного зображення за заданим законом (напрямком) апертура накладається на зображення, а конфігурація ядра фільтра порівнюється з конфігурацією апертури зображення. У результаті такого зіставлення змінюється яскравість точки інтересу відповідно до правил прийняття рішення (ППР). До типових методів просторової фільтрації, що відрізняються апертурами і ППР, відно-

сяться методи: лінійної, медіанної, рангової й анізотропної фільтрації [20]. У застосуванні до зображень креслень деталей кожен з цих методів, сам по собі, не дає позитивного результату. Наприклад, медіанний фільтр розмиває зображення, що є неприпустимим через втрату фрагментів контуру деталі, величина яких менше розміру апертури. Зменшення розміру апертури до мінімального 3×3 призводить до збереження крупних візуальних дефектів, що також є неприпустимим. Застосування ж існуючих методів апертурної просторової корекції [41] до бінарних зображень креслень деталей, що спотворені контурною «бахромою», не доцільне, тому що ці методи дозволяють усунути тільки чорні артефакти розміром в 1 точку.

Основна ідея частотних методів фільтрації зображень [8] заснована на перетворенні Фур'є, суть якого - в уявленні вихідної неперіодичної функції, заданої у просторових координатах, у вигляді суми тригонометричних функцій різних частот, помножених на задані вагові коефіцієнти, - у частотних координатах. Вважається, що низькі частоти властиві фону і крупним об'єктам зображення, а високі - дрібним об'єктам і шуму. Використання вейвлет-перетворення, - різновиду частотного перетворення [10] - дозволяє пригнічувати шум, не зачіпаючи значно межі й деталі зображення. Частотну фільтрацію зображень доцільно застосовувати для напівтонових зображень: низькочастотну - для згладжування зображення, високочастотну - для виділення контурів і малорозмірних об'єктів. Зниження потужності частотної фільтрації у низькочастотному спектрі зображення призводить до зниження перешкод у вигляді розмиття зображення, а у високочастотному - до більш чіткого виділення контурів об'єктів. Стосовно до зображень креслень деталей частотні методи фільтрації ліквідують розмиття контуру деталі, але роблять більш чітким шум у вигляді дрібних артефактів (точок і рисок), який є типовим для копій креслення на «синьці». При обробці фрагментів зображень креслень з непостійною яскравістю (а це дуже характерно для носіїв калька і «синька») імпульсна характеристика частотного фільтра звужується, і неоднорідності, разом із властивим їм шумом,

передаються з вихідного зашумленого зображення у результуюче майже без фільтрації. Частотна фільтрація, хоча й робить більш чітким контур, але викликає втрату дрібних фрагментів креслення деталі (наприклад, штрихових ліній). Тому, застосування методів частотної фільтрації до зашумлених зображень креслень деталей недоцільне.

Методи шумопригнічення на основі апарату математичної морфології описані в [11, 18, 19, 21]: метод стирання «бахроми» [21] і методи, що застосовують фільтри «відмикання» і «замикання» [11]. В основі математичної морфології зображень лежить апарат теорії множин, а в якості оброблюваних множин виступають бінарні растрові зображення: оригінал й спеціальне - «структурний елемент», розмір якого у точках значно менше оброблюваного зображення і зазвичай обирається з ряду $\{3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5, \dots\}$ [19], а форма найчастіше симетрична. Методи морфологічної фільтрації зображень при тестуванні на невеликих зображеннях загального плану дають непоганий результат за якістю [24, 25], але для зображень креслень деталей абсолютно неприйнятні, оскільки не тільки істотно спотворюють топологію контуру деталі, але й призводять до повної втрати малорозмірних його примітивів. Крім того, оскільки розміри креслень деталей значні, то застосування цих методів в оригінальному вигляді при лінійному способі реалізації призводить до неприйнятних часових і ресурсних витрат.

Серед відомих методів фільтрації зображень, що використовують апарат нечіткої логіки [26-28], слід виділити розширений фільтр Калмана з прогнозом стану і його уточненням за поточним виміром [27], а також реалізації медіанних фільтрів із використанням нечіткої бази правил [28]. У цих методах зашумлене зображення вважається нечіткою множиною точок, що характеризуються ступенем належності множині. Загальний принцип фільтрації шуму при цьому зводиться до нечіткого угруповання корисного сигналу і шуму у зображенні відповідно до функції належності, що потребує налаштування. У [23] запропоновано кілька концепцій побудови такої функції: експертних оцінок, детерміні-

стична, ймовірнісна, кібернетична, оптимізаційна, об'єктивна. Слід, однак, відзначити, що методи нечіткої логіки прийнятні при обробці напівтонових кольорових і монохромних зображень, але малоефективні для фільтрації бінарних зображень.

Результат аналізу існуючих методів фільтрації показав їх низьку ефективність у даній предметній області. Отже, науковий і практичний інтерес представляє вдосконалення і комплексування методів підвищення об'єктивної якості напівтонових і бінарних зображень креслень деталей з урахуванням їх специфіки: особливостей зашумлення, яскравісних характеристик, необхідності підвищення розрізнення контурів деталей і збереження їх топології.

1.4 Аналіз методів бінаризації растрових зображень

У літературі, присвяченій задачам аналізу зображень у машинній графіці [6, 8, 10], під бінарним растровим зображенням R креслення деталі розуміється прямокутна матриця $[r_{ij}]_{MN}$ розміром $M \times N$ точок, кожен елемент якої з координатами (i, j) характеризується значенням коду C_k кольору з палітри кольорів $\{C_k\}_{k=2} \in \{0, 1\}$. Процес перетворення напівтонового растрового зображення у бінарне називається бінаризацією зображення [30]. Методи бінаризації [7, 18, 30, 34] двоетапні: на першому етапі вихідне напівтонове кольорове зображення перетворюється у напівтонове монохромне, а на другому - напівтонове монохромне зображення бінаризується. У бінарних растрових зображеннях білий колір використовується в якості кольору фону, а чорний - кольору контуру.

Доцільність бінаризації на етапі попередньої обробки зображення креслення деталі пояснюється необхідністю класифікації його точок на контурні та фонові: обробка двоколірного зображення простіша як з точки зору теоретичної складності застосовуваних методів, так і за обчислювальною трудомісткістю.

Існуючі типові підходи до бінаризації растрових зображень описані в [18, 30-33]. В [30] їх пропонується класифікувати на порогові й адаптивні. Порогові

методи бінаризації оброблюють растрове зображення у цілому, порівнюючи яскравість кожної його точки зі значенням порога яскравості, що дозволяє трактувати точки зображення з яскравістю, меншою порога, як чорні, а решту - як білі. Якщо значення порога яскравості однаково для всіх фрагментів зображення, то поріг називається глобальним порогом бінаризації [18], в іншому випадку - локальним. Для бінаризації зображень креслень деталей очевидним способом виділення фонових і контурних точок є секціонування гістограми розподілу їх яскравостей щодо порогу бінаризації. Успішність такої бінаризації залежить від того, чи піддається гістограма яскравості бісекціонуванню на моди світла й тіні. Виражена бімодальна форма гістограми означає, що точки з яскравістю у моді тіні є контурними, а у моді світла - фоновими. Методи бінаризації на основі порогової класифікації (з нижнім, верхнім, подвійним і динамічним порогами) описані в [18, 34, 35]. Всі вони мають схожу логіку і розрізняються лише способом розрахунку порогів бінаризації.

Основною проблемою порогової бінаризації зображень є вибір оптимального значення порогу, у залежності від розподілу яскравостей точок у зображенні. Критерії бінаризації для полегшення підбору порогу розробляли: Bernsen J. (Бернсен) [35], Eikvil L. (Ейквіл) [32], Otsu N.Y. (Оцу) [36], Niblack W. (Ніблек) [31], Yanowitz S.D. & Bruckstein A.M. (Яновиць і Брукштейн) [38] та ін. Порівняльний аналіз переваг і недоліків методів бінаризації, виконаний у [32], показав наступні їх особливості. Так методи глобальної бінаризації не враховують характеристик локальних околиць точок, а методи локальної бінаризації - характеристик зображення у цілому. Поліпшити якість бінаризації дозволяють методи адаптивної порогової бінаризації, в яких значення порога яскравості залежить від локальної характеристики зображення (наприклад, від середньої яскравості околиці точки). Ці методи використовуються для бінаризації зашумлених зображень низької якості [37].

Як було сказано вище, зображення креслень деталей характеризуються типовими у даній предметній області спотвореннями: нерівномірні яскравість і

контрастність, що змінюються стрибкоподібно, змащений контур, нерівномірний паразитний фон. Гістограми яскравості таких зображень можуть мати дуже слабо виражену бімодальність. Тому, при бінаризації креслень деталей існуючими методами найчастіше виникають недопустимі в аналізованій предметній області порушення вихідної топології контуру деталі внаслідок невірного визначення порогів бінаризації. Вищевказані особливості предметної області роблять застосування класичних методів бінаризації до кольорових напівтонових зображень креслень деталей недоцільним. Так наприклад:

- метод дискримінантного критерію [134] непридатний, тому що моди світла й тіні на гістограмах зображень креслень значно різняться;
- класичні методи марківської фільтрації та байєсівської сегментації [127] неприйнятні з точки зору їх великої ресурсоемності;
- класичні методи глобальної та локальної бінаризації [18, 30-38] викликають втрату малорозмірних примітивів і цілісності контуру креслення деталі.

Виконаний аналіз існуючих методів бінаризації растрових зображень показав необхідність розробки методу бінаризації зображень креслень деталей на основі модифікації методу адаптивної бінаризації напівтонових зображень з метою урахування специфіки характеристик яскравості креслень деталей на різних носіях і необхідності збереження цілісності контурів деталей.

1.5 Аналіз методів скелетизації растрових зображень

Згідно з ДЕСТ 2.109-73 [109] і класифікацією просторових геометричних об'єктів [110], геометричні примітиви контуру в кресленнях деталей можна класифікувати як точкові й лінійні. Геометричний опис растрового точкового об'єкту - точка на поверхні, а лінійного - набір зв'язаних в опорних точках відрізків прямих і дуг кривих другого порядку одиничної товщини [110]. Однак, лінії контурів бінарних зображень креслень деталей представлені ще одним видом об'єктів - площадковим, що являє собою товсту ступінчасту ламану лінію контуру чорного кольору. Геометричний опис площадкового об'єкту - частина про-

стор, обмежена замкнутим лінійним об'єктом. Так під контуром площадкового об'єкту розуміється частина обмежуючої його контурної лінії, що відокремлює об'єкт від фону з одиничною дистанцією [66]. Розпізнавання у контурі геометричних примітивів виконується на основі контурного аналізу бінарних зображень. Але, внаслідок площадкового характеру і варіативності товщини контуру деталі, контурний аналіз доцільно виконувати на основі попередньо виділеної скелетної лінії, - композиції серединних ліній (товщиною в одну точку) площадкового контуру. При цьому істотно спрощуються методи векторизації растрових зображень.

Скелетом площадкового контуру (далі просто скелетом) називається лінійний об'єкт - плоский зв'язний граф, ребра якого утворені геометричними місцями центрів вписаних у контур кіл максимального діаметру [66]. Топологія скелету відображує особливості форми деталі і використовується методами розпізнавання геометричних примітивів. У роботах, присвячених скелетизації растрових зображень [3, 39-49], для побудови скелету використовується два підходи: безперервний і дискретний.

Безперервний підхід [3, 39-42] передбачає апроксимацію межі площадкової фігури багатокутником мінімального периметру і побудову скелету обмеженої ним області [43]. Гідність такого підходу полягає у математичній коректності скелету при трансформації об'єктів. Однак, такий скелет надзвичайно чутливий до локальних властивостей межі растрового зображення, оскільки кожна гілка скелету пов'язана з кожною точкою локального максимуму кривизни межі. У результаті області, що мають несуттєві відмінності межі (викликані ступінчастістю растрового зображення), мають принципово різні у топологічному сенсі скелети. Хоча цей недолік частково згладжується за рахунок ресурсоємної операції регуляризації скелету, безперервний підхід характеризується алгоритмічною складністю і трудоемністю розрахунків.

У дискретному підході площадковий об'єкт у вигляді множини чорних точок розглядається як растрове зображення об'єкту [18]. Дискретна скелетиза-

ція зображення покладена в основу декількох методів: обходу контурів [4], графів смуг [44-46], відстеження пікселів [3, 39, 47], дистанційних карт [31], хвильового [48], топологічного стоншення [3, 4, 31, 40, 49] та ін., що мають переваги і недоліки з точки зору розглянутої предметної області. Суть методу обходу контурів [4] полягає в розрахунку координат серединних точок перпендикулярів, що з'єднують пари протилежних точок контуру. Ланцюжок, що складається з таких точок, і є скелетом об'єкту. Основна проблема при цьому - обробка розгалужень контуру - поки залишається невирішеною. В основу методу побудови графів смуг покладено ідею опису горизонтальних або вертикальних ланцюжків пікселів растрового об'єкта методом RLE [51]. До недоліків цього методу відносяться: трудомісткість побудови графа смуг, що квадратично залежить від кількості точок у зображенні, спотворення, викликані неточним визначенням положення точки розгалуження, і коливання скелету, викликані растровими спотвореннями. Метод відстеження точок [3, 39, 47] використовує послідовність серединних точок, отриманих відстеженням зачерненої області об'єкту з визначеним кроком. Метод не є конструктивним, якщо: розмір області перетину двох об'єктів більше кроку відстеження, відстеження перервано у точках перетину об'єктів або внаслідок зациклювання. Основна причина цих недоліків - у тому, що напрямки спостереження не залежать від топології вихідного об'єкту. Метод «дистанційних карт» [31] передбачає попереднє дистанційне перетворення вихідного зображення, при якому для кожної точки об'єкту відома відстань до найближчої точки фону. У результаті на зображенні виділяються шари точок, що видаляються з зображення ітеративно. Істотним недоліком цього методу є низька якість скелету (можливі розриви або подвоєння скелетних ліній), що робить його неприйнятним для скелетизації контурів деталей. «Хвильовий» метод [48] передбачає, що у деякій вихідній точці генерується хвиля, яка розповсюджується за певними законами і позначає пройдені точки номером дискретного кроку. Відстеження відрізків хвилі проводиться шляхом фіксації траєкторії переміщення центру відрізка, утвореного останніми точками

генерації хвилі. Побудова скелету об'єкта «хвильовими» методами зводиться до виділення відрізків і місць їх з'єднання з занесенням знайдених даних у граф. Недоліками хвильового методу є: обчислювальна трудоемність, необхідність генерації великої кількості опорних точок скелету, суттєві викривлення топології скелету»; це робить проблематичним його використання для скелетизації контурів деталей.

Перспективними для використання в аналізованій предметній області є ітеративні методи топологічного стоншення [53-63], проте у чистому вигляді жоден з них не може бути використано для скелетизації контурів деталей, оскільки скелет, що продукується ними не є гомотопним по відношенню до вихідного контуру. Методи [54-59, 61, 63] стоншують контур після єдиного кроку виконання, але не зберігають топологію фрагментів контуру. Ітераційні методи [41, 42, 59, 62, 63] не гарантують збереження скелетом топології контуру деталі. Несиметричні методи [41, 55, 57, 58, 63] виготовляють більш тонкі скелети, ніж симетричні методи, але вони варіантні до обертання ядер шаблонів. У цих методах визначення скелету засноване на метафорі «пожежа у прерії» [64], де скелетизація трактується як ітеративне пошарове стоншення («вигорання») фігури. Для цього на кожній ітерації з усіх боків площадкового об'єкту видаляється одноточковий граничний шар, і так доки об'єкт не виродиться в скелет – зв'язну множину пікселів, що має мінімальну потужність і зберігає топологію растрового об'єкту. Ці методи використовують шаблони локальних околиць точок растрового зображення і виділяють критерії для визначення можливості перефарбування точок у колір фону. Методи цієї групи відрізняються наборами шаблонів, критеріями належності точок зображення скелету і способами тестування точок на відповідність цим критеріям.

Серед методів, що використовують шаблони, особливий інтерес у плані подальшого розвитку представляє метод Wu R.Y. & Tsai W.H. [41], шаблони якого містять незадіяні позиції з невизначеними заздалегідь значеннями, а, отже, допускають варіабельність. Використання цих позицій для реконструкції

спотворених скелетів дозволяє забезпечувати їх структурну відповідність контуру деталі, необхідну в аналізованій предметній області.

З точки зору розглянутої предметної області, існуючі методи, незважаючи на переваги кожного [3, 4, 31, 40, 49], мають загальний істотний недолік, що виявляється у порушенні гомотопності скелета контуру деталі:

- спотворення топології кутів скелета при паралельній ітераційній скелетизації контуру деталі;
- порушення зв'язності скелету в процесі стоншення контуру деталі;
- порушення гомотопності скелета контуру деталі у точках перетину примітивів контуру деталі;
- чутливість до локальних властивостей контуру деталі.

Таким чином, виконаний аналіз існуючих методів скелетизації растрових зображень показав необхідність розробки покращеного методу топологічної скелетизації контурів деталей із метою корекції типових спотворень скелетів і забезпечення їх гомотопності контурам деталей.

1.6 Аналіз методів векторизації растрових зображень

Результатом попередньої обробки вихідного растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі є вільний від шуму бінарний растровий скелет контуру деталі, що являє собою композицію примітивів: відрізків прямих і дуг кривих другого порядку. У роботах, присвячених обробці й векторизації растрових зображень [18, 93, 104-108] під векторизацією розуміється растр-векторне перетворення, при якому результуючий векторний контур представлено композицією його складових - вектор-контурів геометричних примітивів із збереженням їх топології та зв'язності. Векторизація зображення вимагає його контурного аналізу, який передбачає: кодування контуру (тобто формальний опис, що однозначно задає його форму), розпізнавання у контурі геометричних примітивів і їх параметризацію (визначення чисельних значень їх

геометричних параметрів). У [18, 35, 65, 66, 107, 113] показана доцільність поетапної векторизації з обробкою не самих контурів об'єктів, а кодованого компактного уявлення їх скелетів.

У літературі представлено кілька груп методів кодування контурів двовимірних об'єктів: двовимірне кодування [35, 65], полігональне уявлення [35, 66] та ін. Широке розповсюдження у задачах обробки зображень отримав метод опису контурів об'єктів ланцюговими Фрімен-кодами та його модифікації [66]. Ідея ланцюгового Фрімен-коду полягає у тому, що, починаючи з деякої початкової точки, для кожної наступної точки лінії в якості коду використовується напрямок на суміжну їй точку контуру. Цей метод відрізняється високою продуктивністю і доброю якістю кодування; тому його може бути обрано за базовий метод кодування скелетів.

Запропоновані у [69-73, 76, 80, 82] методи векторизації зображень можна згрупувати у: скануючі, відстежуючі та комбіновані. Скануючі методи передбачають перегляд і розмітку зображення. При цьому кожна точка контуру аналізується, класифікується і запам'ятовується як: кінцева точка, елемент лінії або вузол. Відстежуючі методи, починаючи з кінцевих і вузлових точок контуру, виконують його трасування і запам'ятовують у вигляді дерева зв'язних примітивів із виділенням й обробкою опорних точок, вузлів і сегментів; векторизація передбачає обробку особливих ситуацій. Далі виконується складання сегментів однієї гілки, гілки об'єднуються в об'єкти, виконується їх кусково-лінійна апроксимація і розраховуються геометричні характеристики. Для розпізнавання типів примітивів використовуються структурні підходи [67-69], засновані на порівнянні з еталонами особливостей примітивів: метричних (довжина, ширина, кут), аналітичних (паралельність, кривизна), структурних (чергування графічних елементів), топологічних (вкладеність, сусідство, перетин) тощо.

Розглянемо найбільш поширені групи методів розпізнавання і параметризації геометричних примітивів.

Методи інтегральних перетворень простору зображення у простір параметрів примітиву [70] засновані на перетвореннях Радона і Хафа [71]. В основному вони зорієнтовані на розпізнавання відрізків прямих і дуг окружностей шляхом пошуку максимуму таблично-заданої багатовимірної функції, що параметризує примітив. Перевагами цього сімейства методів є математична обґрунтованість і наочність. Однак, збільшення кількості параметрів примітиву при розпізнаванні фігур довільної форми узагальненим перетворенням Хафа істотно збільшує ресурсоемність, трудомісткість і складність методу. Методами цієї групи складно підібрати оптимальне розбиття фазового простору: у залежності від насиченості креслення деталі примітивами, масштабу і рівня шуму розмір осередків фазового простору необхідно визначати емпірично, що є неприйнятним для АСІД. Крім того, серед сусідніх елементів матриці, що мають несуттєві відмінності значень, складно однозначно визначити локальний максимум. Це призводить до втрати або помилкового виявлення примітивів, що у даній предметній області є неприпустимим.

Метод інверсії зображення і конформних перетворень [52] у поєднанні з перетворенням Хоу [74] дозволяє розпізнавати дугу окружності та поширюється на ряд конформних перетворень. Однак, чим складніше фігура, тим важче підібрати комбінацію операцій зсуву та повороту для отримання інформативного результату; це робить недоцільним застосування методу до креслень деталей.

Метод класифікації особливих точок алгебраїчних кривих [70] полягає у використанні інваріантів кривих довільного порядку і дозволяє визначити тип кривої (або її дуги), а також розрахувати її канонічні параметри. При цьому точки, що належать кривій другого порядку, повинні задовольняти її алгебраїчному рівнянню, а задача розпізнавання кривої зводиться до задачі визначення коефіцієнтів рівняння. Крива другого порядку цілком визначається 5 точками, ніякі 4 з яких не лежать на одній прямій [75]. Параметри кривої розраховуються розв'язанням системи рівнянь на основі координат її точок. На практиці кіль-

кість точок примітиву зазвичай перевищує 5, тому система рівнянь щодо параметрів перевизначена, а її розв'язок шукається методом найменших квадратів. Аналіз виду кривої виконується на основі відомих інваріантів рівнянь другого порядку. Недолік методу полягає в його чисельній нестійкості на зображеннях із відхиленнями від ідеальної форми, що характерно для растрових скелетів контурів деталей. Різні модифікації цього методу [76], зорієнтовані на досягнення стійкості рішення за рахунок оцінки градієнта, призводять до значного зростання обчислювальної складності і, тому, застосовуються лише для невеликих зображень (що не характерно для креслень деталей).

Метод RANSAC [77] відноситься до методів апроксимації множини точок кривої і заснований на ітеративному зборі статистики про вихідні дані. При цьому на кожній ітерації з хмари точок зображення випадковим чином обирається підмножина фіксованого розміру й апроксимується прямою, а кількість точок хмари, що опинилися поблизу отриманої прямої, запам'ятовується. Пряма, поблизу якої виявилася найбільша кількість точок, вважається найкращою апроксимацією точок зображення. Ефективність методу залежить від кількості ітерацій, алгоритму вибору підмножин точок і їх кількості.

З огляду на те, що навіть невеликі прості зображення креслень деталей можуть містити сотні примітивів, застосування вищеописаних груп методів для розв'язання задачі векторизації растрових зображень машинобудівельних креслень деталей не виправдане через їх високу трудомісткість і ресурсоемність, що зростають зі збільшенням кількості примітивів.

Цих недоліків позбавлені структурно-лінгвістичні методи векторизації [69, 114, 115, 116]. Вони припускають побудову компактного опису структури зображення, при якому кожен об'єкт зображення замінюється лінгвістичним описом його ознак, а опис аналізується з застосуванням апарату математичної лінгвістики. В [114, 115] показані наступні переваги такого підходу:

- лінгвістичний опис об'єктів є компактним і дозволяє відкинути несуттєві деталі зображення, що можуть призвести до зниження якості розпізнавання при використанні методів, заснованих на чисельних наближеннях;

- використання при лінгвістичному розпізнаванні відносних показників об'єктів дозволяє добитися інваріантності до операцій масштабування та повороту.

Тому, у рамках даного дослідження доцільно використання структурно-лінгвістичного підходу до розпізнавання й параметризації примітивів контуру деталі. Крім того, векторизація креслень деталей є задачею, більш спеціалізованою на предметну область, ніж векторизація зображень взагалі. Адже звичайне растрове зображення розглядається як набір абстрактних геометричних фігур, а під час векторизації креслень деталей необхідно використовувати лише обмежений стандартами набір геометричних примітивів і при цьому враховувати особливості креслень (розділ 1.1).

Однак, існуючі структурно-лінгвістичні методи векторизації, як правило, не враховують специфіки машинобудівельних креслень деталей і необхідність їх подальшої обробки засобами САПР; вони оперують набором структурно-лінгвістичних правил, недостатнім для розпізнавання і параметризації довільно-зорієнтованих еліпсів та їх дуг, а також топологічно-складних контурів деталей.

Виконаний аналіз існуючих методів векторизації растрових зображень показав необхідність розробки методу векторизації контурів деталей на основі вдосконалення і розвитку структурно-лінгвістичних методів векторизації растрових об'єктів з метою забезпечення розпізнавання й параметризації довільно-зорієнтованих типових примітивів у топологічно-складних контурах деталей.

1.7 Висновки і постановка задачі дослідження

Аналіз літературних джерел показав, що:

- роботи, присвячені задачі растр-векторної трансформації креслень, пропонують окремі рішення у рамках задач фільтрації, бінаризації, скелетизації та векторизації зображень, як правило, поза взаємозв'язків цих задач;

– розв’язання цих задач, з урахуванням специфіки розглянутої у даному дослідженні предметної області та об’єктивної якості досягнутих результатів, вимагає модифікації існуючих методів або розробки нових методів.

Мета і задача дослідження – підвищення якості трансформації растрових зображень машинобудівельних креслень деталей у гомотопні (тобто топологічно-еквівалентні за кількістю геометричних примітивів і за їх зв’язністю) їм векторні образи.

Досягнення поставленої мети вимагає розв’язання наступних задач:

1. Аналіз існуючих методів растр-векторного перетворення зображень креслень деталей із метою виявлення можливості їх поліпшення й адаптації до даної предметної області.

2. Удосконалення та комплексування методів підвищення об’єктивної якості кольорових напівтонових і бінарних зображень креслень деталей із урахуванням їх специфіки: особливостей зашумлення, яскравісних характеристик, необхідності підвищення розрізнення контурів деталей і збереження їх топології.

3. Розробка методу бінаризації кольорових напівтонових зображень креслень деталей на основі модифікації методів глобальної й адаптивної бінаризації з метою урахування специфіки яскравісних характеристик зображень креслень деталей на різних носіях і необхідності збереження цілісності їх контурів.

4. Розробка поліпшеного методу топологічної скелетизації контурів у бінарних зображеннях креслень деталей із метою корекції типових спотворень скелетів і забезпечення їх гомотопності контурам деталей.

5. Розробка методу векторизації скелетів контурів деталей на основі вдосконалення і розвитку структурно-лінгвістичних методів векторизації растрових об’єктів із метою забезпечення розпізнавання і параметризації довільно-зорієнтованих типових примітивів у топологічно-складних контурах деталей.

РОЗДІЛ 2

КОМПЛЕКС МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ РАСТРОВИХ КОЛЬОРОВИХ НАПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ КРЕСЛЕНЬ ДЕТАЛЕЙ

2.1 Комплекс методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей

Успішне розв'язання задачі векторизації растрових зображень креслень деталей безпосередньо залежить від відсутності спотворень, що вносяться в них під час растрування. Тому, доцільні вдосконалення і комплексування методів підвищення об'єктивної якості кольорових напівтонових зображень креслень деталей з урахуванням їх специфіки: особливостей зашумлення, яскравісних характеристик, необхідності підвищення розрізненості фону креслення і контурів деталей зі збереженням їх топології.

2.1.1 Аналіз задачі усунення спотворень растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі

Кольорове напівтонове растрове зображення креслення деталі, не спотворене шумом, зручно представити двовимірною матрицею $R^{(0)}$ (2.1).

$$R^{(0)} = \{r_{ij}\}_{i=0, j=0}^{M-1, N-1} \mid r_{ij} \in (C = \{c_k\}_0^{K-1}), \quad (2.1)$$

де r_{ij} – точка растрового зображення креслення деталі з координатами (i, j) ;

C – кольорова палітра з K кольорів;

M, N – габаритні розміри зображення креслення деталі.

Спотворення растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі у просторовій області передбачає спотворення точок $\{r_{ij}\}$ вихідного зображення $R^{(0)}$:

- шумом заміщення Π_3 дією матричного оператора $H_{\Pi_3}[R^{(0)}]$;
- адитивним шумом Π_A сукупною дією матричних операторів $\{H_{\Pi_A}[R^{(0)}]\}$ за різновидами шуму;
- випадковими яскравісними перешкодами.

У результаті маємо викривлене кольорове напівтонове растрове зображення креслення деталі $R^{(C)} = H_{\Pi_3}[R^{(0)}] + H_{\Pi_A}[R^{(0)}]$.

Аналіз репрезентативної випадкової вибірки зображень креслень деталей дозволив виділити їх типові напівтонові спотворення (рис. 2.1):

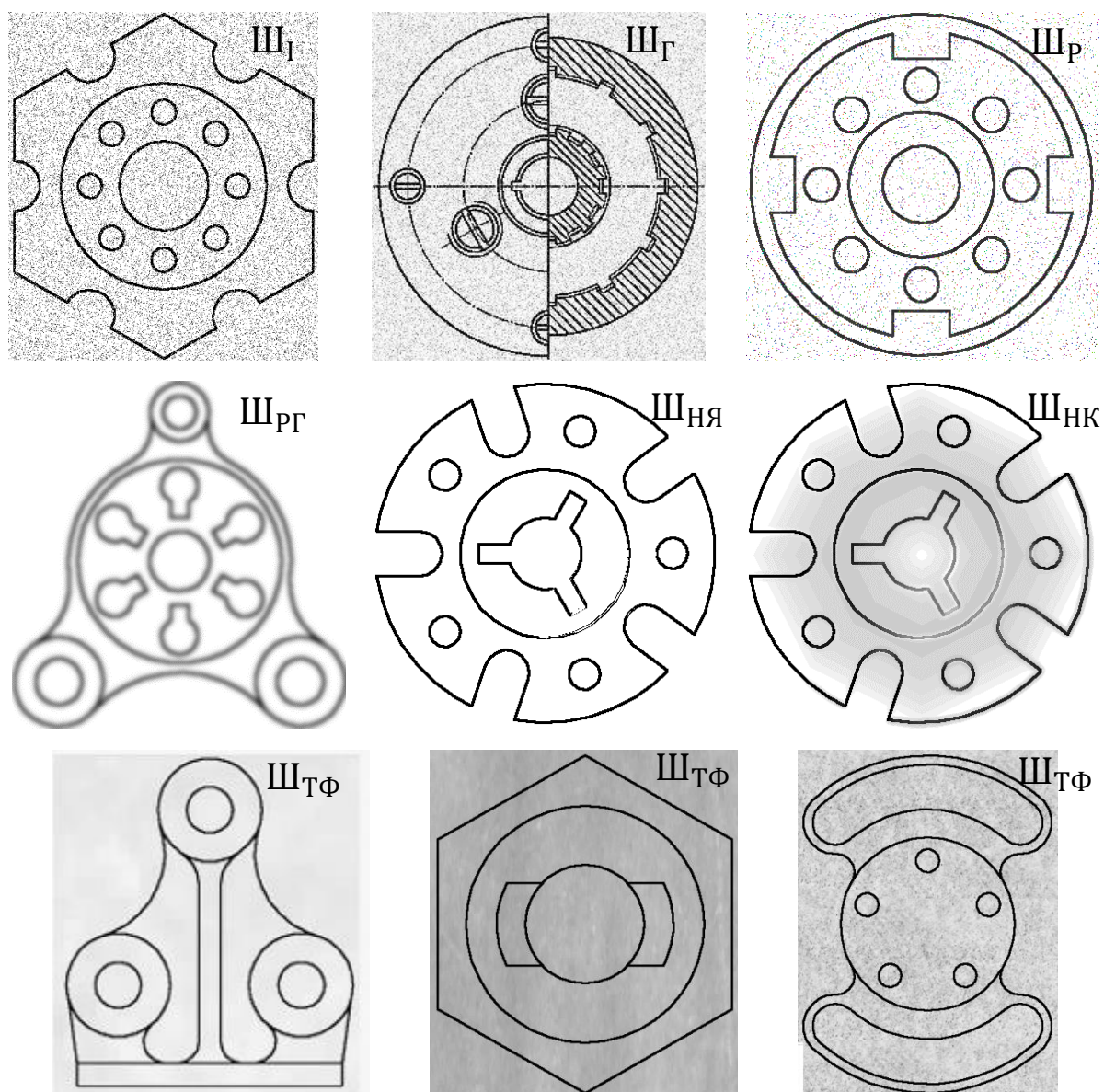
- високочастотний імпульсний шум заміщення (Π_I) з $p(z) = P_a \forall z = a$; $p(z) = P_b \forall z = b$; $p(z) = 0 \forall z \notin \{a, b\}$ (z - випадкова величина, що визначає рівень яскравості шуму, що приймає значення з діапазону яскравостей зображення) [68, 117];

- адитивний гаусів шум (Π_G) зі спектральною щільністю розподілу ймовірностей $p(z) = (\sqrt{2\pi D})^{-1} \cdot e^{-(z-\mu)^2/2D}$ і нормальним розподілом амплітуди яскравості [67];

- адитивний рівномірний шум (Π_P) з $p(z) = (b-a)^{-1} \forall x \in [a, b]$; $p(z) = 0 \forall x \notin [a, b]$ [18];

- розмиття (нерізкість) межі контуру за Гаусом (Π_{PG}) зі щільністю сферичного нормального розподілу ймовірностей $p(i, j) = (2\pi\sigma^2)^{-1} \cdot e^{-(i^2+j^2)/(2\cdot\sigma^2)}$ [119];

- яскравісні перешкоди, що знижують розрізняюваність фрагментів зображення: нерівномірні занижені яскравість ($\Pi_{HЯ}$) [8] і контрастність (Π_{HK}) [121], тональність фону ($\Pi_{ТФ}$) [122], що зумовлена видом носія креслення (під тональністю фону будемо розуміти його просторово-неоднорідне забарвлення).



креслення деталі на «кальці»

креслення деталей на «синьці»

Рисунок 2.1 - Приклади типових спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей

Слід зазначити, що завищення контрастності зображень креслень деталей є неприпустимим спотворенням, оскільки призводить до непоправної втрати фрагментів контуру (зокрема до втрати малорозмірних примітивів і тонких ліній). Таке зображення має бути перескановано.

Враховуючи випадковий характер спотворення напівтонового зображення креслення деталі, функцією мети $\varphi: R^{\varepsilon} \rightarrow R^{(CF)}$ задачі його відновлення є гомотоп-

не відображення зашумленого зображення R в оригінал $R^{(0)}$ з допустимою похибкою ε застосуванням методів усунення шуму заміщення Π_3 й адитивних спотворень Π_A (2.2) (рис. 2.2).

$$R^{(CF)} = H_{\Pi_3}^{-1}[R^{(0)}] - H_{\Pi_A}[R^{(0)}] \mid$$

$$\Pi_3 = \Pi_I, \quad \Pi_A = \{\Pi_\Gamma, \Pi_P, \Pi_{PG}, \Pi_{HЯ}, \Pi_{HK}, \Pi_{TF}\}, \quad (2.2)$$

де $H_{\Pi_3}^{-1}[R^{(0)}]$ – матричний оператор відновлення зображення, зворотній оператору його зашумлення $H_{\Pi_3}[R^{(0)}]$ імпульсним шумом заміщення.

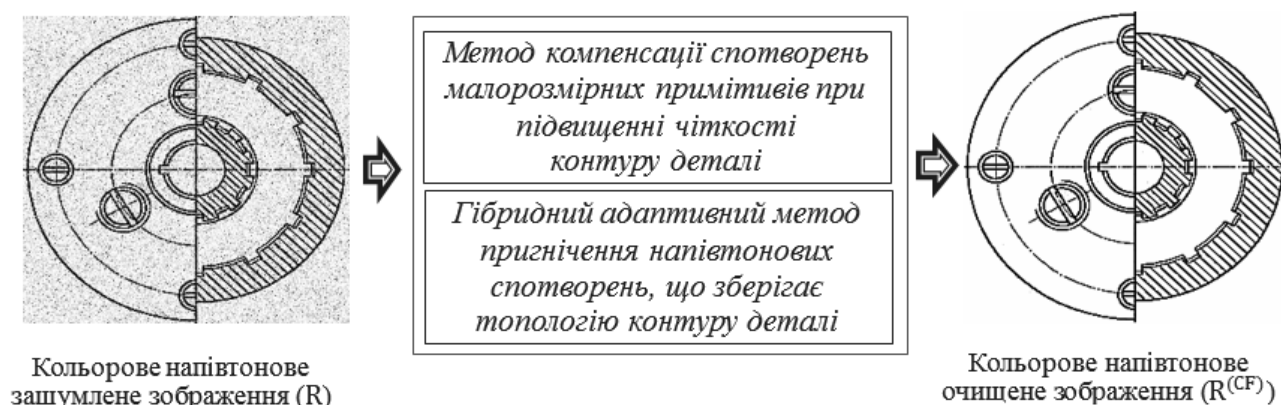


Рисунок 2.2 - Модель усунення спотворень растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі

Відповідно до сформульованої задачі фільтрації, в якості узагальненого критерія якості фільтрації доцільно обрати мінімальну відстань Хемінга між результатом (тут фільтрованим, $R^{(CF)}$) й еталонним (не спотвореним, $R^{(0)}$) зображеннями (2.3) [131, 132].

$$\rho(R^{(CF)}, R^{(0)}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (r_{ij}^{(CF)} \wedge r_{ij}^{(0)}) \leq \varepsilon, \quad (2.3)$$

Мірами цієї відстані виступають загальноприйняті уніфіковані показники якості: MSE, PSNR, CNR, SSIM [82, 90, 119, 121].

Зазвичай спотворення зображення кількісно оцінюються спектральною щільністю розподілу ймовірностей. Однак, оскільки для аналізу доступні лише спотворені зображення креслень деталей, то оцінки спотворень (а, отже, і функції мети) можна отримати на основі аналізу гістограм яскравості та контрастності зображень креслень деталей.

Гістограми яскравості типових спотворених зображень креслень деталей характеризуються (рис. 2.3):

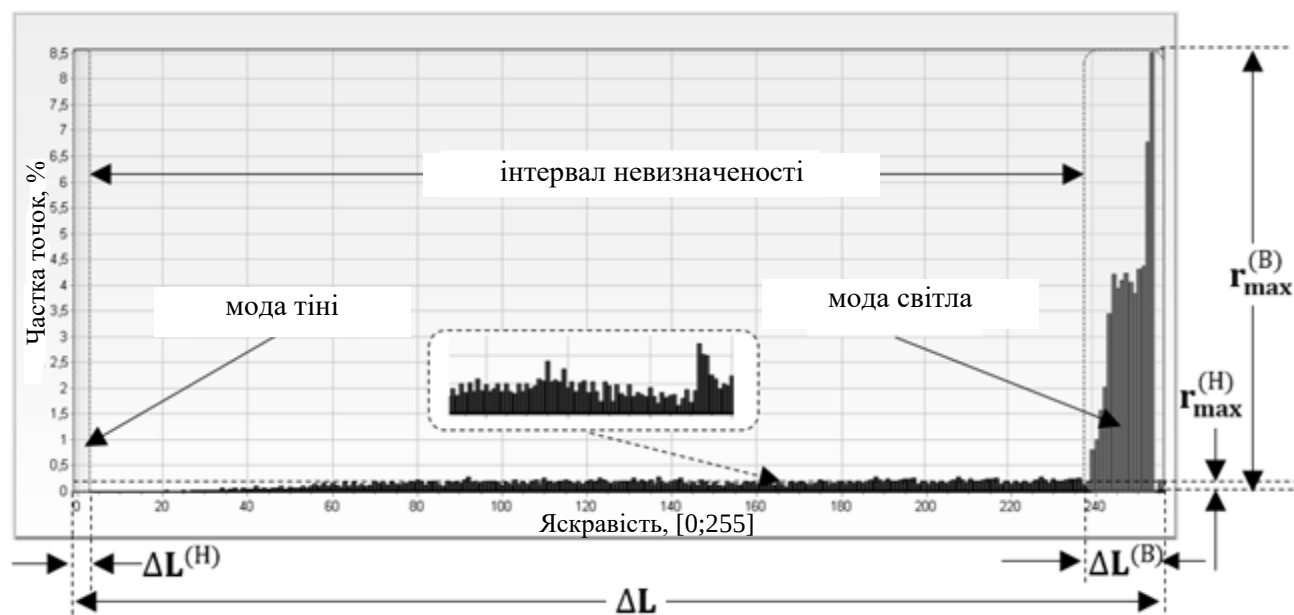


Рисунок 2.3 - Гістограма яскравості типового зашумленого кольорового напівтонового зображення креслення деталі

– сильною виразністю моди світла і малою модою тіні при відношенні екстремумів мод $n(r_{\max}^{(B)}):n(r_{\max}^{(H)}) \in [5:1; 50:1]$;

– вузькими вираженими тоновими діапазонами світла $\Delta L^{(B)}$ і тіні $\Delta L^{(H)}$ у тоновому діапазоні зображень креслень ΔL $\Delta L^{(B)}, \Delta L^{(H)} \approx (2 - 6\%) \cdot \Delta L$ при їх відношенні $\Delta L^{(B)}:\Delta L^{(H)} \approx 5:1$;

– наявністю багаточисельних локальних екстремумів в інтервалі невідзначеності (де точки зображення креслення деталі можуть належати або контуру, або фону), що зіставні з екстремумами моди тіні.

Гістограми контрастності типових зашумлених зображень креслень деталей характеризуються нерівномірною контрастністю з більш високим ступенем контрастності у локальних областях, в основному в околиці контуру (рис. 2.4).

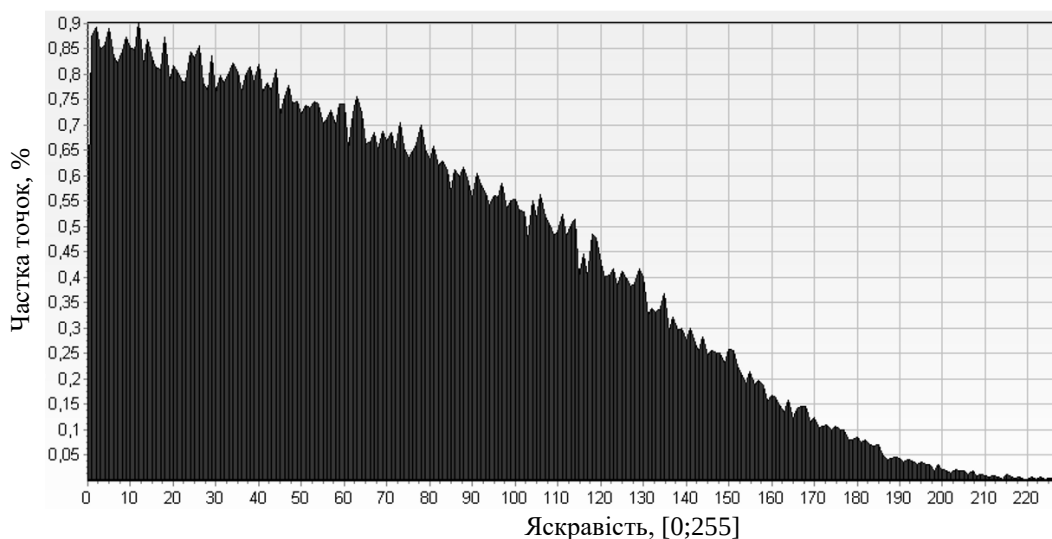


Рисунок 2.4 - Гістограма контрастності типового зашумленого кольорового напівтонового зображення креслення деталі

Для побудови гістограм контрастності у дисертаційній роботі використано функцію (2.4) [79].

$$g_k(\Upsilon(r_{ij}, \Omega_{r_{ij}}^{(8)})) : \Upsilon(r_{ij}, \Omega_{r_{ij}}^{(8)}) = |r_{ij} - \overline{\Omega_{r_{ij}}^{(8)}}|, i, j \in [-1; +1], \quad (2.4)$$

де r_{ij} – яскравість аналізованої точки (i, j) зображення;

$\Omega_{r_{ij}}^{(8)}$ – 8-околиця аналізованої точки r_{ij} ;

$\Upsilon(r_{ij}, \Omega_{r_{ij}}^{(8)})$ – правило порівняння r_{ij} з яскравостями точок 8-околиці $\Omega_{r_{ij}}^{(8)}$.

У модель усунення спотворень кольорових напівтонових зображень креслень деталей доцільно ввести обмеження, що враховують графічні особливості розглянутої предметної області:

- тип спотворення зображення креслення деталі заздалегідь не вказаний;
- характер розподілу шуму по зображенню креслення деталі заздалегідь не вказаний і може варіюватися, у залежності від просторових координат фрагменту зображення;
- рівень спотворення зображення креслення деталі помірний ($\leq 20\%$);
- до методів фільтрації спотворень зображень креслень пред'являється базова вимога - збереження топології контурів деталей, у тому числі малорозмірних примітивів і тонких ліній.

Таким чином, проведений аналіз показав, що характеристики зашумлених кольорових напівтонових зображень креслень деталей, незалежно від виду носія і типу шуму, вимагають застосування комплексного підходу до фільтрації спотвореного зображення шляхом його секціонування на контур і фон. Фільтрація спотворень при цьому істотно ускладнюється необхідністю збереження корисного сигналу у вигляді малорозмірних примітивів і тонких ліній контурів деталей.

Відзначимо, що більшість методів шумопригнічення у напівтонових зображеннях [18, 19, 68, 84, 119, 121] мають на меті або зниження контрастності яскравих фрагментів для згладжування межі світла й тіні, або розмиття такої межі для приховування шуму. Але ж у такому підході для даної предметної області криється й головна проблема. Метод видалення шуму може визнати дрібні значущі деталі зображення креслення деталі (наприклад, штрих-пунктирні лінії товщиною в 1 точку) шумом. У результаті якість зображення креслення деталі після шумопригнічення часто стає істотно гіршою, ніж в оригіналі, оскільки малорозмірні примітиви і тонкі лінії контуру деталі просто втрачаються. У даній галузі це неприпустимо.

Відзначимо також, що спотворення зображення, по-перше, спричиняють зменшення динамічного діапазону яскравості та зниження контрастності, а, по-друге, погіршують його чіткість [124]. Отже, для видалення спотворень розроблюємий метод фільтрації повинен виконувати корекцію яскравості, контрастності та чіткості зображення креслення деталі.

І, нарешті, мета попередньої обробки зображень креслень деталей - не тільки в усуненні шуму та спотворень, але й у підвищенні розрізненості великих і малих фрагментів зображення без втрати структурних особливостей примітивів контуру деталі. Тому, доцільна розробка спеціалізованого на дану предметну область комплексу методів шумопригнічення у кольорових напівтонових зображеннях креслень деталей. Його «інтелектуальність» визначається тим, наскільки добре методи комплексу відрізняють шум (що треба видалити) від значущих дрібних фрагментів контуру деталі (що треба залишити).

2.1.2 Метод компенсації спотворень малорозмірних примітивів при підвищенні чіткості контуру деталі

Одним із факторів, що визначає повноту відтворення контуру деталі, є чіткість зображення, яку необхідно збільшувати для підвищення локальної розрізнюваності малорозмірних примітивів контуру деталі, враженого шумами $\Pi_{\text{РГ}}$ та $\Pi_{\text{ТФ}}$.

Зазвичай із цією метою застосовуються просторові рангові фільтри підвищення чіткості [18, 32, 117, 119], що замінюють яскравості точок зображення оціночними значеннями $\{r_{ij}^{(F)}\}$ згортки (2.5) на основі малорозмірних 3×3 ($w = 3$) 8-зв'язкових ядер $H_k \in \{H_i\}_1^3$ застосовуваних фільтрів [67, 125].

$$H_1 = 1/9 \cdot \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, H_2 = 1/10 \cdot \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, H_3 = \begin{vmatrix} -0.1 & -0.1 & -0.1 \\ -0.1 & 2 & -0.1 \\ -0.1 & -0.1 & -0.1 \end{vmatrix}$$

$$r_{ij}^{(F)} = \sum_{k=i-w}^{i+w} \sum_{l=j-w}^{j+w} r_{kl} \cdot H_*(k, l) \quad (2.5)$$

Однак, вплив таких ядер на малорозмірні примітиви (у тому числі тонкі лінії) контуру деталі призводить до їх локальних геометричних спотворень із втратою діагональних елементів. Приклад таких спотворень показано на рис. 2.5, де у результаті підвищення чіткості фільтром з ядром H_1 горизонтальні й вертикальні лінії контуру збережені, а діагональні - втрачені.

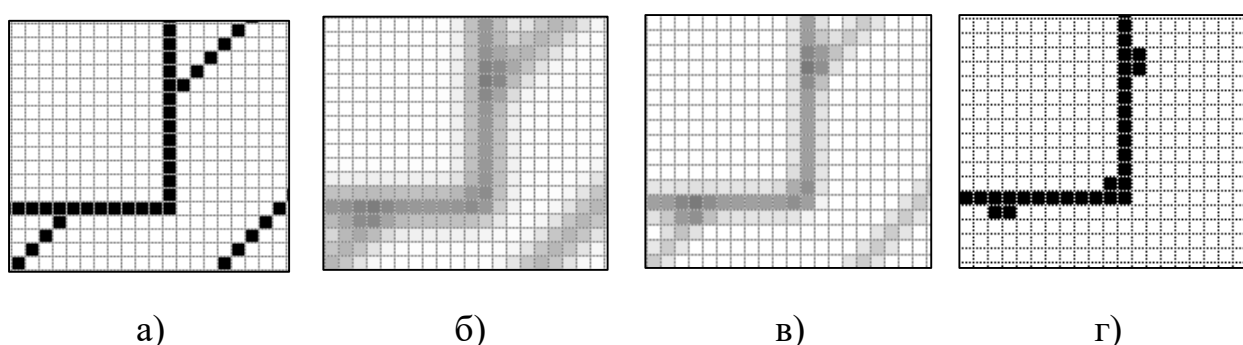


Рисунок 2.5 - Результат підвищення чіткості тонких ліній контуру деталі:

- а) растровий фрагмент зображення оригіналу креслення деталі;
- б) фрагмент (а), що спотворено 10% розмиттям за Гауссом з радіусом 2;
- в) напівтоновий результат підвищення чіткості фрагменту (б) (ядро H_1);
- г) бінарний результат підвищення чіткості фрагменту (б) (ядро H_1).

Це зумовлено тим, що вплив малих ядер на зображення не ізотропне, оскільки в евклідовій метриці відстань між центральним елементом ядра і вертикальними/горизонтальними елементами дорівнює 1, а між центральним елементом і діагональними елементами - $\sqrt{2}$.

Запропонований метод розв'язання цієї проблеми є розвитком ідей застосування розріджених матриць згортки до телевізійних кадрів [32, 125]. Метод передбачає підвищення ізотропності ядра фільтра, що застосовується, за раху-

нок збільшення його розміру, із заповненням нулями відсутніх коефіцієнтів (рис. 2.6).

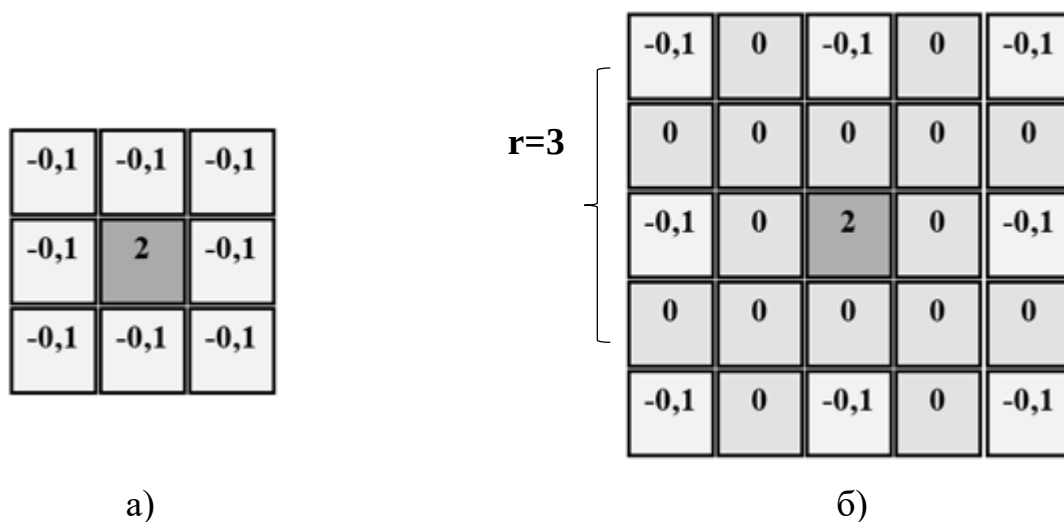


Рисунок 2.6 – Розрідження матриці згортки (а) з $r = 3$ (б)

При збільшенні розміру матриці згортки підвищується її ізотропність в евклідовій метриці, що візуально сприймається як зменшення локальних геометричних спотворень зображення (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 - Напівтоновий (зліва) і бінарний (справа) результати компенсації спотворень тонких ліній контуру деталі (рис. 2.5 а) при розрідженні з радіусом 4 ядра H_1 фільтра підвищення чіткості

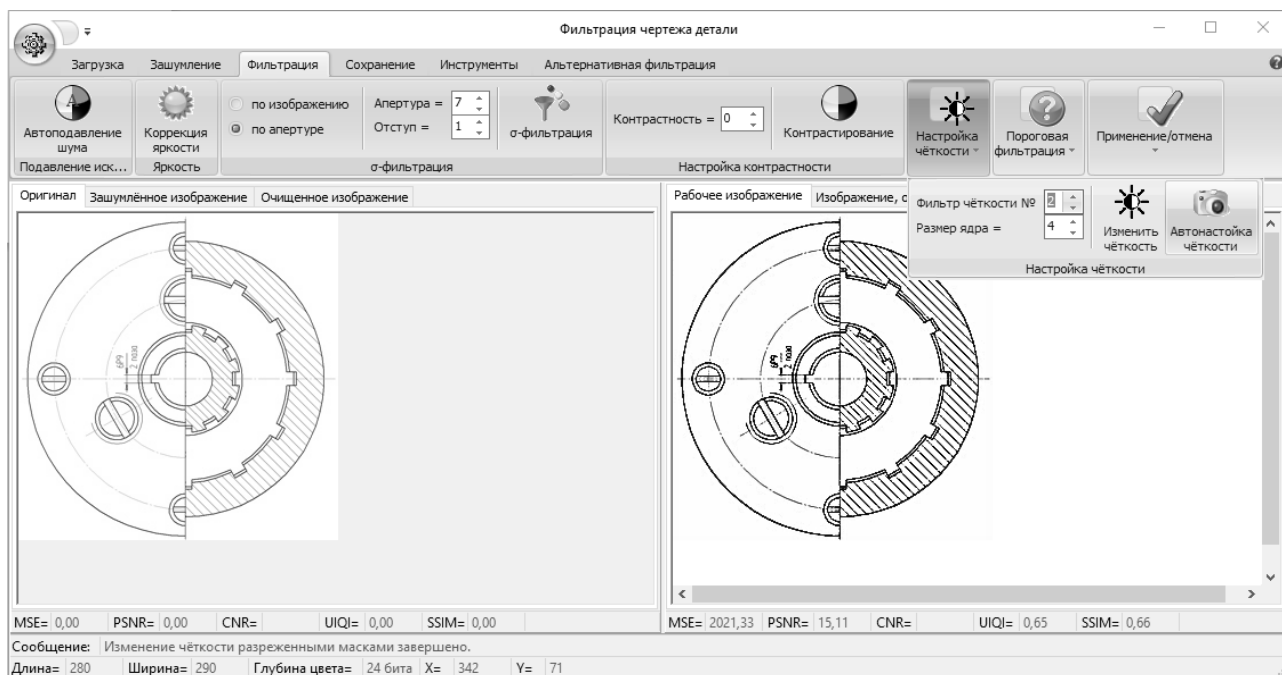
При цьому яскравість кожної точки формується на основі яскравостей точок її околиці з різними вагами і радіусами.

В основі запропонованого методу лежить адаптивна апертурна просторова автокорекція зображень креслень деталей розрідженими ядрами фільтрів підвищення чіткості з прив'язкою виду і ступеня розрідження ядра до рівня шуму. Метод дозволяє пригнічувати спотворення зображень креслень деталей гаусовим розмиттям ($Ш_{РГ}$) і тональністю фону ($Ш_{ТФ}$), тим самим підвищувати розрізняюваність елементів контуру зі збереженням топології малорозмірних примітивів контурів деталей.

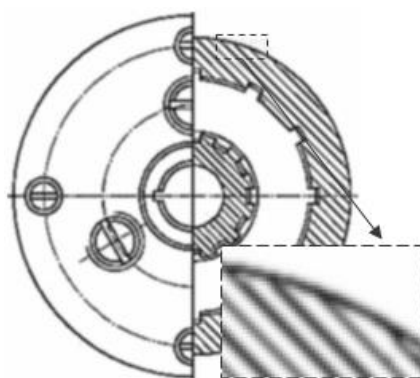
Метод передбачає виконання таких дій:

1. Вважається $k = 1$ (k - номер ядра), $SSIM_{\max} = 0$ (тут $SSIM_{\max}$ - оптимальне значення $SSIM$), $k_{\text{opt}} = 1$ (k_{opt} - номер ядра, що забезпечує $SSIM_{\max}$), $r_{\text{opt}} = 0$ (r_{opt} - оптимальний радіус розрідження ядра).
2. Вважається радіус розрідження ядра $r = 1$ (ядро не розріджене).
3. До вихідного зображення креслення деталі застосовують фільтр $H_k \in \{H_i\}_1^3$ підвищення чіткості зображення [67, 125] з розрідженням r ядра.
4. Розраховують $SSIM_i$ поточного зображення (в якості зображення для порівняння виступає спотворене зображення). Якщо $SSIM_i > SSIM_{\max}$, то $SSIM_{\max} = SSIM_i$, $k_{\text{opt}} = k$, $r_{\text{opt}} = r$.
5. Вважається $r = r + 1$. Якщо $r \leq 4$, то керування передається п. 3.
6. Вважається $k = k + 1$. Якщо $k \leq 3$, то керування передається п. 2.
7. До вихідного спотвореного зображення застосовують фільтр із номером k_{opt} і радіусом r_{opt} розрідження ядра.

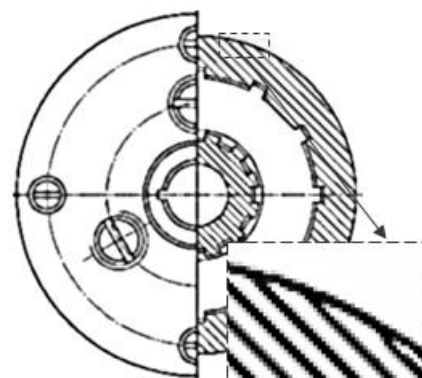
Приклади результатів тестування вищеописаного методу наведені на рис. 2.8. При цьому тонкі штрих-пунктирні лінії контуру збережені, спотворення $Ш_{РГ}$ пригнічене, а метрика $SSIM$ покращена на 5,43%.



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 - Приклади пригнічення спотворення кольорового напівтонового зображення креслення деталі гаусовим розмиттям ($\mathcal{I}_{\text{РГ}}$):

- а) результат підвищення чіткості зображення розрідженою матрицею згортки фільтру №3 з радіусом розрідження 4;
- б) зображення, спотворене шумом $\mathcal{T}_{\text{РГ}}$ (радіус ядра = 2, $\text{SSIM}=0,87$);
- в) очищене зображення (б) (радіус розрідження = 9, $\text{SSIM}=0,95$).

Аналіз результатів застосування методу в даній предметній області на тестових зображеннях (Додаток В) зі спотвореннями $\mathcal{I}_{\text{РГ}}$, $\mathcal{I}_{\text{ТФ}}$ різної інтенсивності показав (рис. 2.9), що:

– розрідження ядра фільтру підвищення чіткості, до розміру 9×9 , призводить не тільки до підвищення розрізняюваності тонких ліній, але й до руйнування шуму навколо них без спотворень навіть при великих перепадах яскравості);

– радіус ядра має бути, принаймні, удвічі більшим товщини примітиву креслення; тому, метод має застосовуватися локально з ітеративним підбором радіуса і ступеня розрідження ядра.

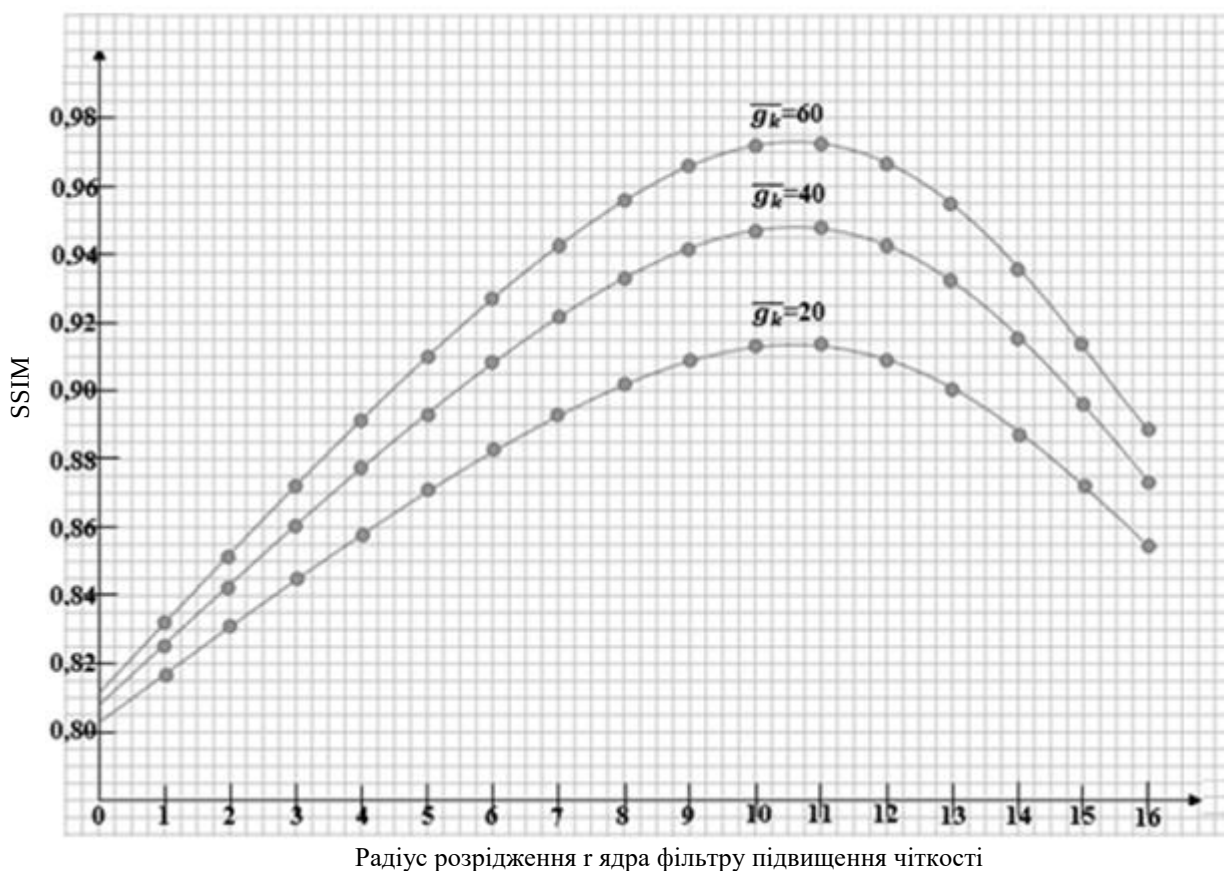


Рисунок 2.9 – Залежність індексу структурного подібності (SSIM) малорозмірних примітивів від радіуса розрідження r ядра фільтру підвищення чіткості й усередненого контрасту зображення $\overline{g_k}$.

Результати тестування цього методу у складі комплексу методів пригнічення спотворень у напівтонових зображеннях креслень деталей наведені у розділі 4.3 і показали його ефективність у даній предметній області.

2.1.3 Гібридний адаптивний метод пригнічення напівтонових спотворень, що зберігає топологію контуру деталі

Дослідженнями встановлено (методика проведення експериментів щодо усунення спотворень кольорових напівтонових зображень креслень деталей описана у розділі 4.3), що найбільш ефективно пригнічити типові шуми дозволяє гібридний адаптивний метод фільтрації, який передбачає виконання заходів щодо підвищення розрізнюваності контуру шляхом адаптивного підвищення контрасту зображення.

Аналіз гістограм контрастності зашумлених зображень креслень деталей показав, що для них характерна погана розрізнюваність контуру й фону, оскільки контрастність має невиражені піки (див. рис. 2.4). Можливість відрізнити корисний сигнал від шуму в області інтересу погіршується через перекриття тонових діапазонів контуру й шуму на інтервалі невизначеності гістограм яскравості таких зображень (див. рис. 2.3) і, як наслідок, невеликого розходження між корисним сигналом і зашумленим фоном.

Формування виражених мод світла й тіні на гістограмах можна досягти контрастуванням зображення. Контрастність зображення визначається відношенням яскравостей найбільш яскравих і найбільш темних його фрагментів, що представляє динамічний діапазон за яскравістю. Підвищення контрастності підвищує розрізнюваність великих фрагментів зображення креслення: робить темні точки контуру темнішими, а світлі точки фону й шуму - більш світлими, що дуже важливо для збереження топології контуру деталі.

Спроби використовувати контрастування зображення для пригнічення у ньому шуму шляхом балансування або збільшення контрастності зашумленого зображення здійснювалися й раніше [18, 67, 143, 144]. Однак, розроблені для цього методи дають ефект послаблення шуму з високою яскравістю і посилення шуму з низькою яскравістю, що у даній предметній області:

– з одного боку, призводить до порушення зв'язності контуру деталі внаслідок видалення при контрастуванні, разом із шумом, дрібних елементів контуру, в тому числі тонких ліній;

– з іншого боку, призводить до появи в області інтересу темних артефактів шуму (до того ж великих, якщо шум комбінований), що складно видаляються.

Таким чином, для нівелювання шуму необхідно послабити (розмити) шум, не порушивши при цьому топологію контуру деталі, після чого зменшити інтенсивність ослабленого шуму автоматичним контрастуванням зображення. У розвиток ідей адаптивного контрастування [67] така стратегія прийнята у поданому тут ітеративному методі пригнічення напівтонових спотворень.

Основна проблема у згладжуванні просторового шуму полягає в отриманні оптимального співвідношення між осередненими шумом і сигналом. При цьому перед осередненням необхідно розділити компоненти шуму й корисного сигналу. Найбільш прийнятним для ослаблення (розмиття) цифрового шуму зі збереженням контуру деталі є метод σ -фільтрації [145], оскільки у σ -фільтрі компоненти зображення креслення деталі поділяються за контрастністю. У цьому методі для кожної точки зображення оцінюється середнє значення яскравості та його середньоквадратичне відхилення за яскравістю σ_{Ω} (2.6) у межах допуску ξ по ковзній Ω -околиці (апертурі) розміром $\omega \times \omega$, в якій яскравості осереднюються.

$$\sigma_{\Omega} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\sum_{k=i-\omega}^{i+\omega} \sum_{l=j-\omega}^{j+\omega} (r_{kl} - \bar{r})^2}, \quad \bar{r} = \frac{1}{\omega^2} \cdot \sum_{k=i-\omega}^{i+\omega} \sum_{l=j-\omega}^{j+\omega} r_{kl}, \quad (2.6)$$

де r_{kl} – значення яскравості у точці (k, l) околиці Ω зображення;

$\bar{r}$ – середнє значення яскравості зображення.

Замість точки r_{ij} з яскравістю вище допуску ξ підставляється точка $r_{kl}^{(F)}$ із середньозваженою за Ω -околицею яскравістю (2.7).

$$r_{kl}^{(F)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=i-\omega}^{i+\omega} \sum_{l=j-\omega}^{j+\omega} r_{kl} \quad \forall |r_{kl} - r_{ij}| \leq \xi, \quad (2.7)$$

де n – кількість точок у Ω -околиці, що відповідають умові $|r_{kl} - r_{ij}| \leq \xi$.

Межа між областями зображення розмивається σ -фільтром тільки, якщо стрибок яскравості на межі менше допуску ξ . Однак, допуск обирається зазвичай не настільки великим, щоб спотворити слабко зашумлені темні точки, що належать межі й дрібним фрагментам контуру деталі. У пропонуваному тут методі допуск ξ обирається, у залежності від рівня шуму, як $\xi = k \cdot \sigma$, де $k \geq 1$. Оптимальні значення параметрів ω , k підбираються автоматично за значенням $PSNR_{\max}$ (2.8, 2.9) на дискретному компактi $D = \{ \{\omega\}_3^9, \{k\}_1^5 \}$.

$$PSNR_{\max} = \max(PSNR) \quad \forall \omega, k = \text{var}; \quad \omega, k \in D; \quad D = \{ \{\omega\}_3^9, \{k\}_1^5 \}, \quad (2.8)$$

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{K}{MSE}, \quad MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left(r_{ij}^{(F)} - r_{ij} \right)^2}{M \cdot N}}, \quad (2.9)$$

де K – глибина кольору зображення.

Аналіз гістограм контрастності й яскравості σ -фільтрованих зображень креслень деталей (рис. 2.10, а) показав, що для них характерна покращена розрізняваність контуру й фону, оскільки гістограми їх контрастності мають виражені піки контрасту (рис. 2.11), а гістограми яскравості - виражені моди світла (рис. 2.12).

Однак, мода тіні в них не виражена, - тінь «розмазана» по всьому інтервалу невизначеності, оскільки на зображенні присутній ослаблений фоновий шум (див. рис. 2.10, а).

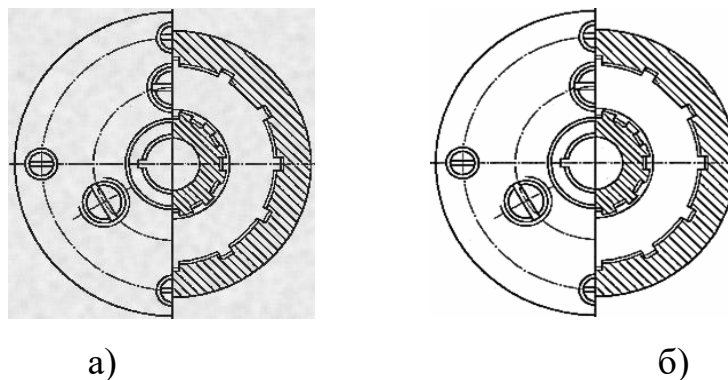


Рисунок 2.10 - Фільтроване зображення креслення деталі:

- а) σ -фільтроване зображення креслення деталі;
- б) результат збільшення на 6% глобальної контрастності зображення (а) креслення деталі (PSNR = 18,73dB).

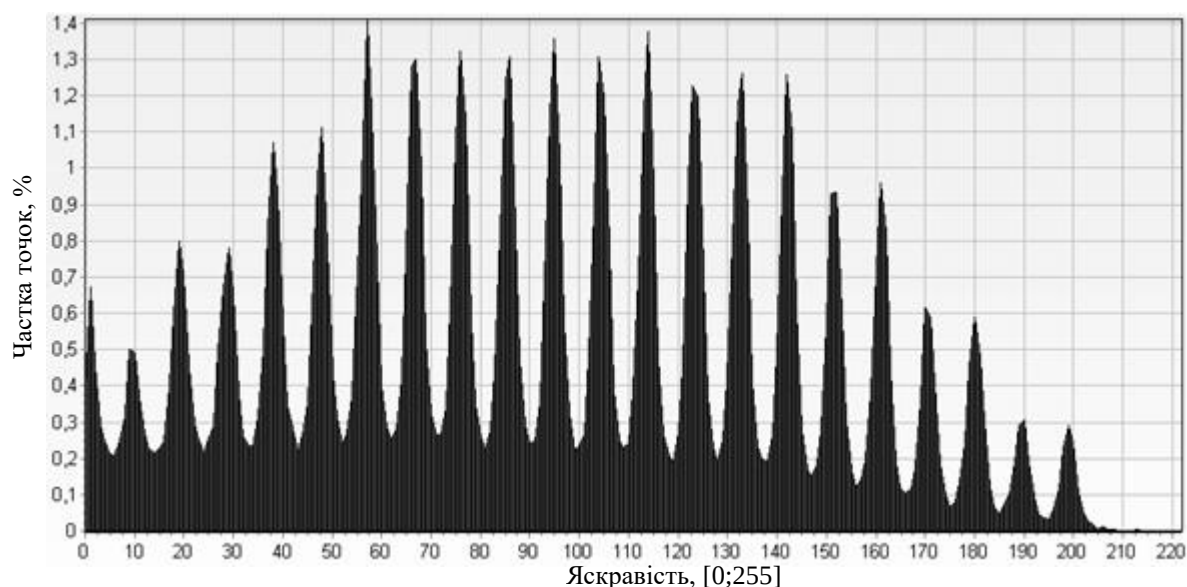


Рисунок 2.11 - Гістограма контрастності σ -фільтрованого зображення креслення деталі

Формування виражених зон світла й тіні можна добитися контрастуванням зображення (рис. 2.13, а). Це, до того ж, призводить до суттєвого пригнічення шуму зі збільшенням PSNR по відношенню до зашумленого зображення.

Контрастзоване зображення має виражені моди тіні (точки контуру) і світла (точки фону) на гістограмі яскравості при майже повній відсутності точок шуму з яскравістю в інтервалі невизначеності (рис. 2.13, б).

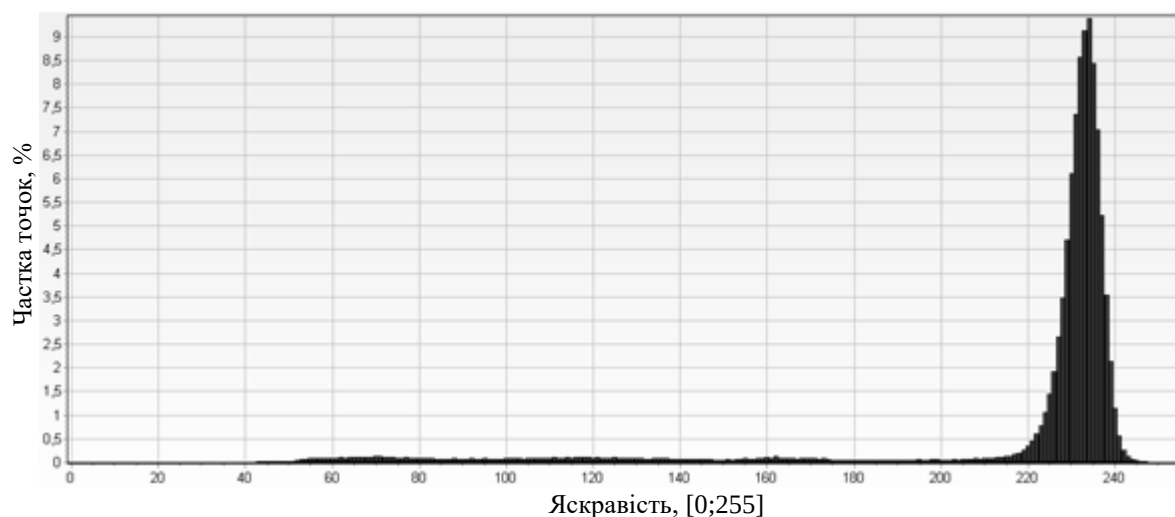


Рисунок 2.12 - Гістограма яскравості σ -фільтрованого зображення креслення деталі

Гібридне пригнічення спотворень кольорового напівтонового зображення креслення деталі розробленим комплексом методів зручно описати поетапно.

Етап 1. Виконується лінійна корекція яскравості кольорового напівтонового зображення креслення деталі [82], оскільки воно може бути вражене спотворенням типу Ш_{ня} (нерівномірна яскравість).

Етап 2. Послаблюється (розмивається) фоновий шум без спотворення контуру деталі. Для цього зображення креслення деталі піддається ітеративній σ -фільтрації з підбором розміру апертури з [3; 9] і відступу з [1; 5] так, щоби максимізувати метрику PSNR (оскільки при цьому змінюється співвідношення корисного сигналу та шуму).

Етап 3. Виконується ітеративне підвищення контрастності зображення з метою найбільшого пригнічення послабленого шуму. Для оцінки якості фільтрації при цьому можна використовувати метрику PSNR або усереднену по зображенню метрику CNR (2.10) [121] - співвідношення контрастності області інтересу до рівня шуму.

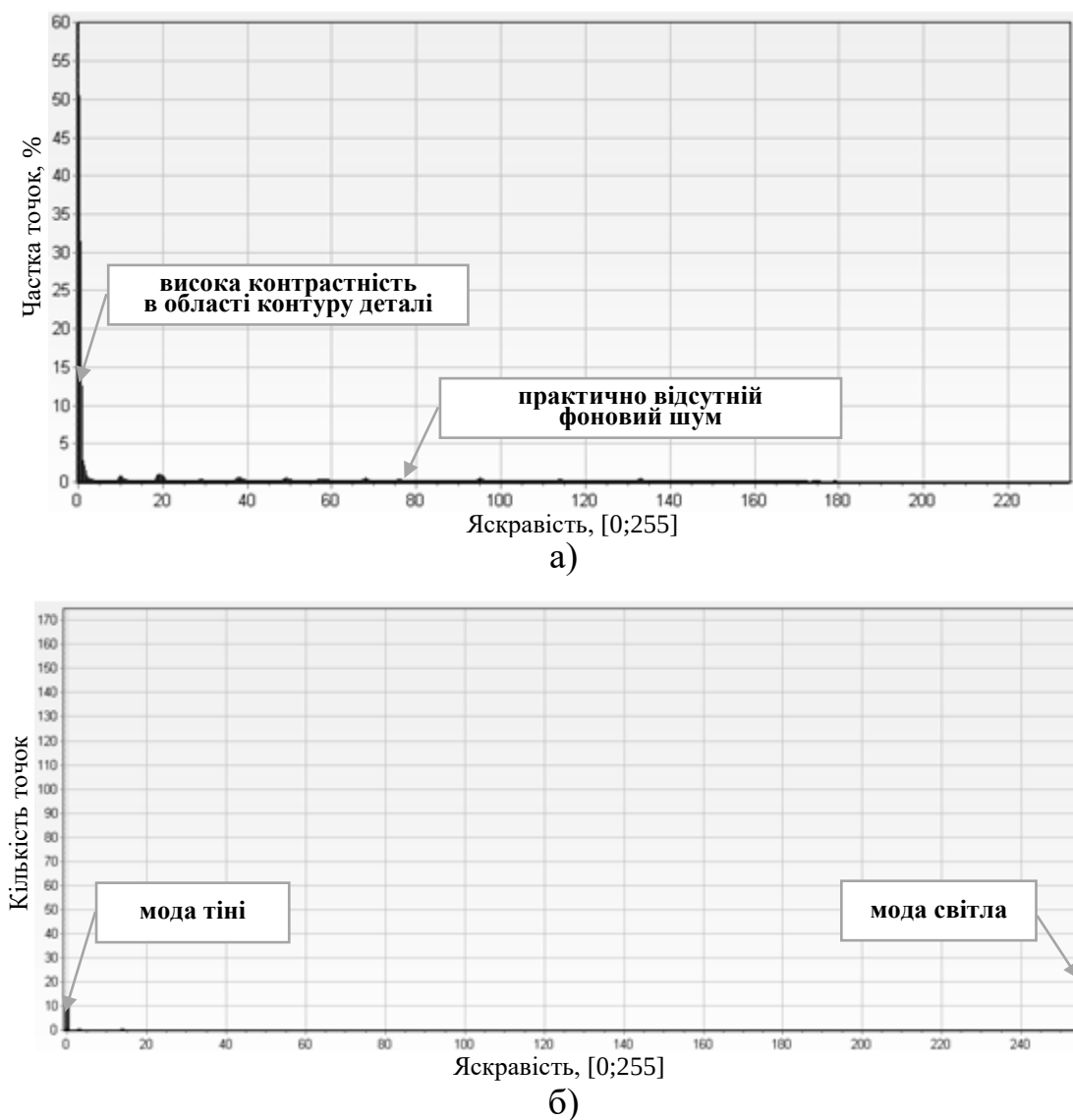


Рисунок 2.13 - Гістограми контрастності (а) та яскравості (б) фільтрованого зображення креслення деталі зі збільшеною на 6% контрастністю

$$CNR = \frac{|\bar{r}_{\Omega} - \bar{r}|}{\sqrt{|\sigma_{\Omega}^2 - \sigma^2|/2}}, \quad (2.10)$$

де $\bar{r}_{\Omega}, \bar{r}$ - середні яскравості точок у локальній Ω -околиці точки (області інтересу) та в усьому зображенні,

σ_{Ω}, σ – середньоквадратичні відхилення яскравості точок у локальній Ω -околиці точки та в усьому зображенні.

Дослідження показали, що при рівномірній яскравості зображень креслень деталей максимальне пригнічення шуму, що оцінюється метриками PSNR та CNR, досягається при максимальному збільшенні контрастності (рис. 2.14). Однак, підвищення контрастності до максимальної у зображеннях з неоднорідним хроматичним фоном, що мають завищену або нерівномірну яскравість, призводить до порушення зв'язності частини його контуру та руйнування мало-розмірних примітивів (рис. 2.15); з огляду на необхідність дотримання базового обмеження задачі фільтрації - збереження топології контуру - це не припустимо.

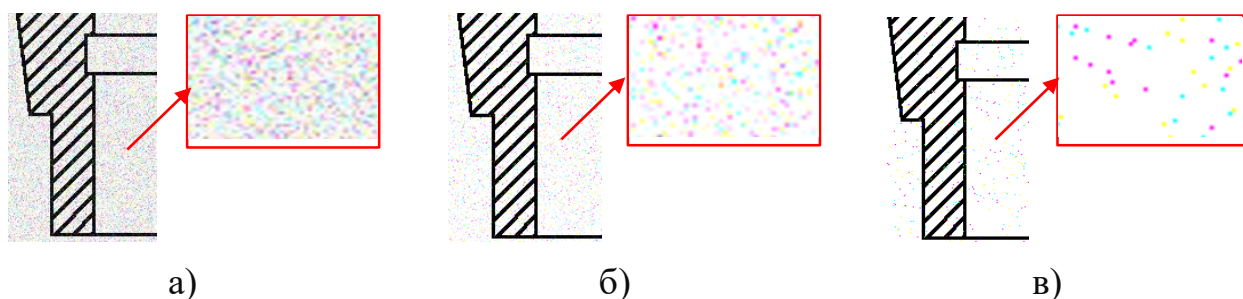


Рисунок 2.14 - Результат контрастування зображення креслення деталі з рівномірною яскравістю фону, що спотворене 20% гаусовим шумом:

- а) вихідне зображення (PSNR = 17,09 dB, CNR = 2,06 dB);
- б) результат збільшення контрастності зображення (а) на 50 % (PSNR = 21,69 db, CNR = 6,43 dB);
- в) результат максимального контрастування зображення (а) (PSNR = 22,47dB, CNR = 10,12 dB).

Аналіз залежності метрик PSNR і CNR оцінки об'єктивної якості зображення креслення деталі від рівня його контрастності показав, що вони представлені унімодальними функціями (рис. 2.16).

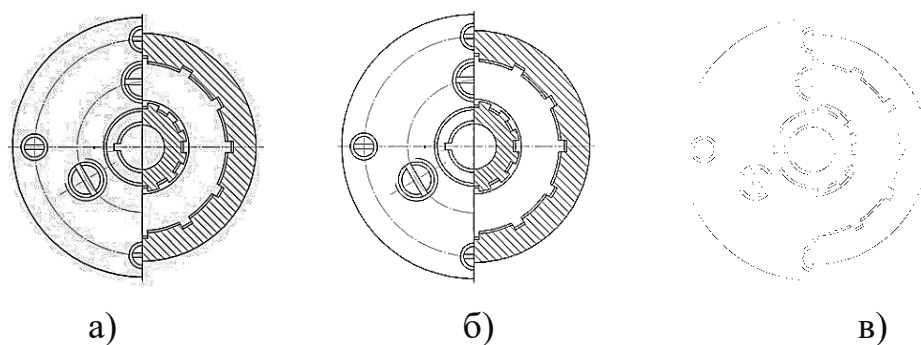


Рисунок 2.15 - Результат контрастування зображення креслення деталі з підвищеною яскравістю фону, що спотворене 20% високочастотним шумом:
 а) вихідне зображення (PSNR = 10,23 dB, CNR = 2,15 dB);
 б) результат збільшення контрастності зображення (а) на 50% (PSNR = 17,78 dB, CNR = 8,54 dB);
 в) результат максимального контрастування зображення (а) (PSNR = 3,02 dB, CNR = 1,12 dB).

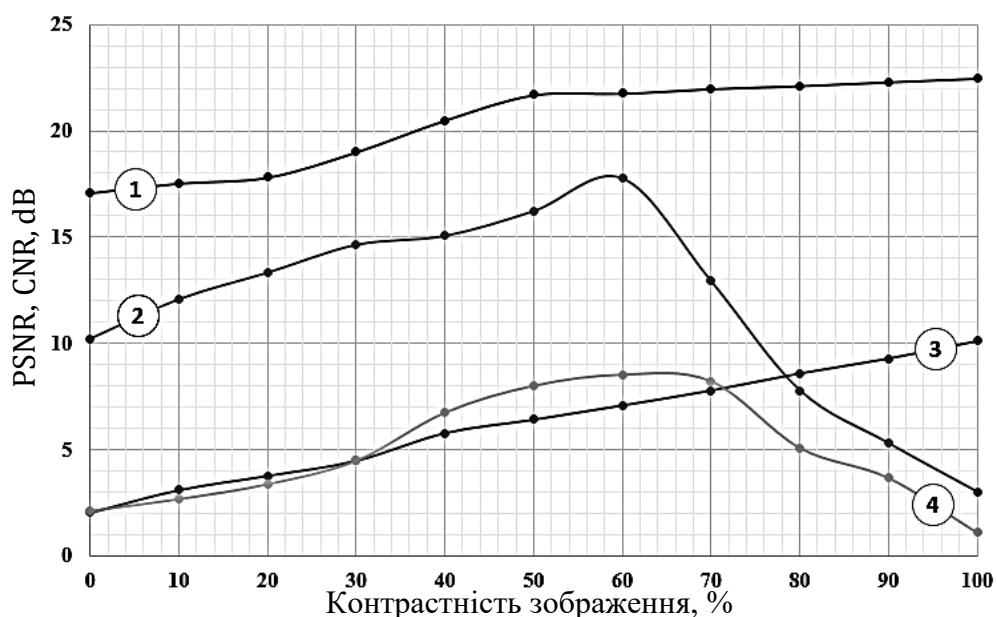


Рисунок 2.16 – Графіки залежності метрик PSNR та CNR від рівня контрастності зображення креслення деталі:

- 1- PSNR зображення креслення деталі з рівномірною яскравістю;
- 2- PSNR зображення креслення деталі з нерівномірною яскравістю;
- 3- CNR зображення креслення деталі з рівномірною яскравістю;
- 4- CNR зображення креслення деталі з нерівномірною яскравістю.

Це дозволяє звести задачу усунення шуму у зображеннях креслень деталей до задачі пошуку оптимальних значень функцій мети - метрик PSNR і CNR на дискретному компакт $\{g_k\}$ (див. формулу 2.4) значень контрастності зображення. Нескладно помітити, що функції мети $PSNR = f(\{g_k\})$ і $CNR = f(\{g_k\})$ мають однаковий тренд (див. рис. 2.16). Тому, доцільно виділити найбільш характерну в даній предметній області функцію мети, - $CNR = f(\{g_k\})$. CNR безпосередньо характеризує залежність інтенсивності шуму від контрастності зображення й носить виражений характер для зображень креслень деталей, які, внаслідок зашумлення і дефектів контрастності, можуть мати високу PSNR-метрику, але низький показник CNR.

Враховуючи аналітичну залежність $CNR = f(\{g_k\})$ від характеристик яскравості конкретного зображення та дискретний унімодальний характер цієї функції мети, можливою стратегією пошуку екстремуму функції мети є ітеративне припасування рівня контрастності на крок із порівнянням значень функції мети на сусідніх ітераціях із наперед заданою похибкою ε . Якщо $CNR_{i+1} - CNR_i \geq \varepsilon$, то ітерації продовжуються, в іншому випадку екстремум вважається пройденим. Як показали експерименти, при кроці зміни контрастності в 1% похибка ε визначення екстремуму функції мети не перевищує 0,5dB, - мінімальної величини, що дозволяє візуально розрізнити два зображення [67].

Етап 4. Виконується ітеративне підвищення чіткості зображення. Для цього зображення креслення деталі піддається фільтрації розрідженими масками підвищення чіткості з підбором маски та розрідженості її ядра із [1; 9] так, щоби максимізувати метрику SSIM (оскільки при цьому може змінюватися топологія малорозмірних примітивів контуру деталі).

Етап 5. Оскільки результуюче зображення характеризується вираженою контрастністю, то остаточний шум можна усунути методом порогової класифікації точок зображення [86]. Поріг встановлюється на рівні, при якому сума підпорогових яскравостей точок відповідає їх ймовірностям. Для цього діапазон яскравості поділяється на три рівні частини ([0; 85] - темна, [86; 170] -

середня, [171; 255] - світла) та розраховується частка темних точок зображення. Так, наприклад, якщо ця частка становить 20%, то поріг автоматично встановлюється таким, щоб яскравість $1/5$ точок зображення була нижчою за поріг ($256/5 \approx 51$).

Приклад застосування цього методу показано на рис. 2.17.

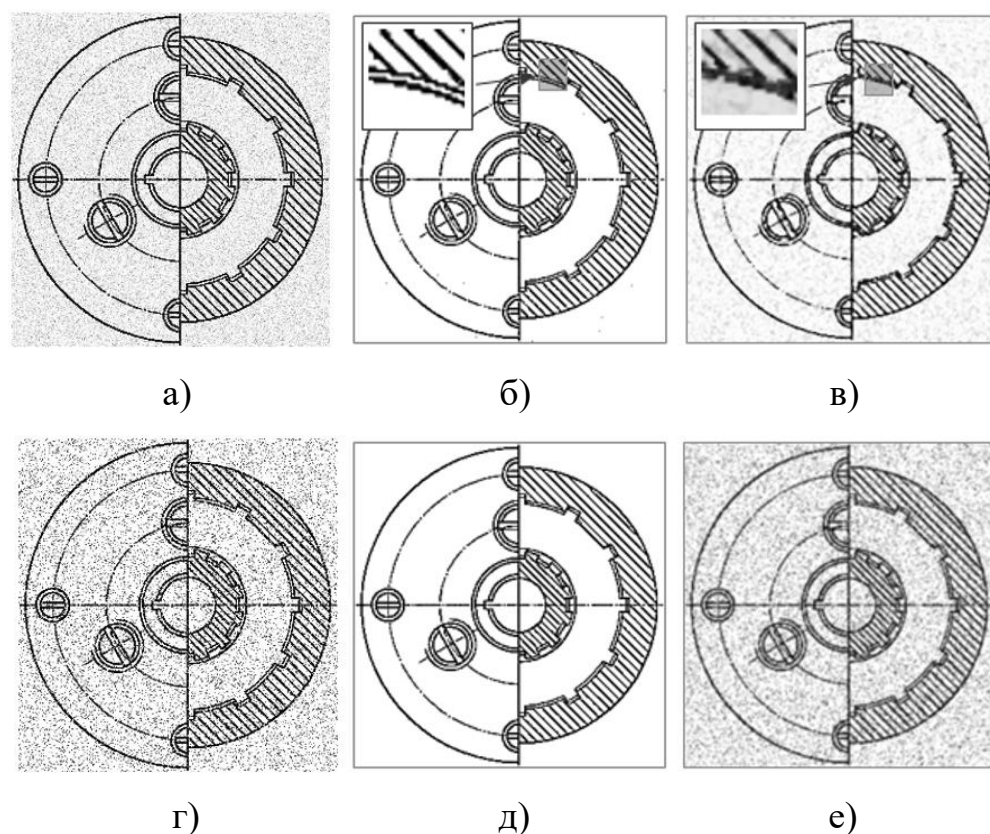


Рисунок 2.17 - Приклади застосування гібридного комплексу методів усунення спотворень растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі:

- а) оригінал, спотворений 20% гаусовим шумом;
- б) результат фільтрації зображення (а) розробленим методом;
- в) результат фільтрації зображення (а) медіанним методом;
- г) оригінал, спотворений 20% високочастотним імпульсним шумом;
- д) результат фільтрації зображення (г) розробленим методом;
- е) результат фільтрації зображення (г) методом низькочастотної фільтрації.

Аналізом результатів тестування методу встановлено (розділ 4.3), що представлений комплекс методів дозволяє ефективно усувати спотворення, характерні для кольорових напівтонових зображень креслень деталей, зі збереженням їх топологічних особливостей за рахунок адаптації параметрів методів до індивідуальних характеристик зображень креслень деталей.

Адаптивність описаного вище комплексу методів забезпечується:

- до виду спотворення - дією на різні групи спотворень різними методами;
- до інтенсивності шуму - ітеративною оптимізацією значень метрик: PSNR, CNR та SSIM;
- до розподілу шуму - ітеративним налаштуванням параметрів методів фільтрації.

2.2 Комплекс методів бінаризації растрових кольорових напівтонових фільтрованих зображень креслень деталей

Доцільність бінаризації кольорового напівтонового зображення креслення деталі пояснюється тим, що обробка бінарного зображення потребує менших обчислювальних ресурсів, а класифікація його точок на контурні й фонові простіша з точки зору теоретичної складності застосовуваних методів (див. розділ 1). Успішне розв'язання задачі векторизації растрових зображень креслень деталей залежить від збереження топологічних особливостей контурів деталей під час їх бінаризації й відсутності шуму у бінарних зображеннях деталей. Тому, доцільні вдосконалення і комплексування методів бінаризації та бінарної фільтрації кольорових напівтонових зображень креслень деталей із урахуванням їх специфіки: характеристик яскравості, особливостей зашумлення, необхідності збереження топології контурів деталей.

2.2.1 Аналіз задачі бінаризації растрового кольорового напівтонового фільтрованого зображення креслення деталі

Растрове зображення креслення деталі зручно представити двовимірною матрицею $R^{(*)}$ растрових точок (2.1) (див. розділ 2.1.1). При цьому для фільтрованого кольорового напівтонового растрового зображення креслення $R^{(CF)}$ кольорова гамма $C^{(C)} = \{c_k\}_0^{K-1}$ складається з K кольорів, для монохромного напівтонового зображення $R^{(M)}$ палітра $C^{(M)} = \{c_k\}_0^{255}$ включає 256 градацій яскравості сірого кольору [31], а для бінарного зображення $R^{(B)}$ палітра двоколірна: $C^{(B)} = \{c_k\}_0^1 = \{0, 1\}$, де білий колір з кодом «0» - колір фону, а чорний з кодом «1» - колір контуру деталі.

Метою задачі бінаризації кольорового напівтонового фільтрованого зображення креслення деталі $R^{(CF)}$ є його гомотопне відображення: $\varphi: R^{(CF)} \xrightarrow{\varepsilon} R^{(B)} \xrightarrow{\varepsilon} R^{(BF)}$ послідовно у:

- бінарне зображення $R^{(B)}$ з допустимою похибкою ε шляхом перетворення кольорових точок $\{r_{ij}\}_{i=0, j=0}^{M-1, N-1}$ у двоколірну палітру $C^{(B)}$ відповідно до методу їх класифікації на фонові та контурні;

- бінарне фільтроване зображення $R^{(BF)}$ з допустимою похибкою ε шляхом усунення остаточного бінарного напівтонового шуму і шуму, привнесеного під час бінаризації зображення.

В якості узагальненого критерія якості бінаризації доцільно обрати мінімальну відстань Хемінга між результуючим бінаризованим ($R^{(B)}$) й еталонним бінарним ($R^{(0)}$) зображеннями (2.11) креслення деталі [131, 132].

$$\rho(R^{(B)}, R^{(0)}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (r_{ij}^{(B)} \wedge r_{ij}^{(0)}) \leq \varepsilon \rightarrow 0, \quad (2.11)$$

Мірами цієї відстані виступають загальноприйняті уніфіковані показники якості: MSE, PSNR, CNR, SSIM [82, 90, 119, 121].

Зазвичай спотворення зображення кількісно оцінюються спектральною щільністю розподілу ймовірностей. Однак, оскільки для аналізу доступні лише спотворені зображення креслень деталей, то оцінки спотворень (а, отже, і функції мети) можна отримати на основі аналізу гістограм яскравості та контрастності зображень креслень деталей.

Як було відзначено в розділі 2.1.1, гістограми яскравості типових напівтонових зображень креслень деталей, фільтрованих розробленими методами (див. розділ 2.1), характеризуються:

- сильною виразністю моди світла у гістограмах яскравості й мізерно малою модою тіні;
- вузькими вираженими тоновими діапазонами світла й тіні у тоновому діапазоні зображення;
- наявністю безлічі локальних екстремумів на інтервалі невизначеності (де точки зображення можуть належати або контуру, або фону), що істотно менші за екстремуми обох мод.

Внаслідок вищевикладеного, у модель бінаризації кольорових напівтонових зображень креслень деталей доцільно ввести обмеження, що враховують графічні особливості розглянутої предметної області:

- характеристики яскравості кольорового напівтонового зображення креслення деталі залежать від заздалегідь невизначеного виду носія («синька», калька, ватман) і можуть варіюватися, залежно від просторових координат фрагмента зображення;
- до методу бінаризації кольорових напівтонових зображень креслень деталей висувається базова вимога - необхідність збереження топологічних особливостей контурів деталей, у тому числі малорозмірних примітивів і тонких ліній контуру.

2.2.2 Метод двохстадійної адаптивної бінаризації растрового кольорового напівтонового фільтрованого зображення креслення деталі

Виходячи з викладеного у розділі 2.2.1, розроблено метод двохстадійної адаптивної бінаризації, спеціалізований на особливості даної предметної області. З огляду на обмеження, накладені на модель бінаризації, в якості базових методів використано методи мультипорогової й адаптивної бінаризації [125, 128-130], які припускають розрахунок глобальних й локальних адаптивних порогів бінаризації задля класифікації точок зображення на контурні й фонові.

Враховуючи типову форму гістограм яскравості фільтрованих напівтонових зображень креслень деталей (див. розділ 2.2.1), пропонується наступна двох-стадійна схема їх бінаризації:

1. На першій стадії виконується оцінка глобальних порогів бінаризації, виходячи з таких розумінь. Гістограма яскравості, показана на рис. 2.18, відповідає типовому зображенню, що містить темний контрастний контур деталі на світлому фоні носія. Тому, яскравості точок контуру і фону зосереджені поблизу двох домінуючих значень $r_{\max}^{(H)}$ (для точок контуру деталі) і $r_{\max}^{(B)}$ (для точок фону). У цьому випадку традиційний спосіб виділення точок об'єкту інтересу з оточуючого фону полягає у виборі значення глобального порогу T , що розмежовує моди розподілу яскравостей. Тоді будь-яка точка зображення, яскравість якої $r_{ij} < T$, є точкою об'єкту інтересу, а в іншому випадку - точкою фону [67]. Однак, у даній предметній області (див. рис. 2.18), поріг T , що розмежовує моди тіні та світла, «розмазано» по інтервалу $[T^{(H)}; T^{(B)}]$. Тому, керуючись ідеєю, покладеною в основу технології GMT (Global Multi-stage Thresholding) [146], необхідно розрахувати оцінки нижнього ($T^{(H)}$) та верхнього ($T^{(B)}$) глобальних порогів бінаризації, на основі яких сегментувати гістограму яскравості на:

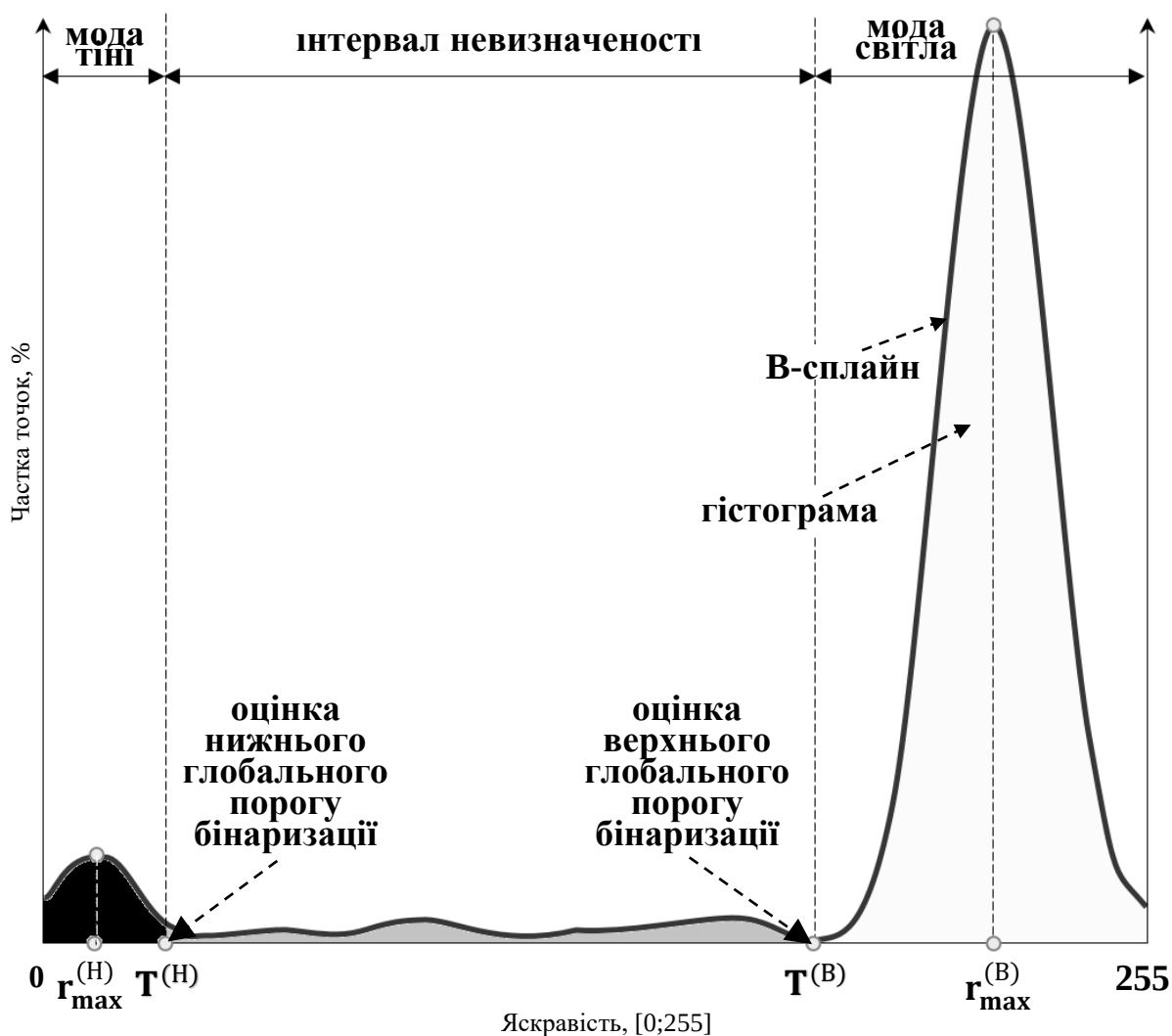


Рисунок 2.18 – Секціонування гістограми яскравості монохромного напівтонового зображення креслення деталі

- моду тіні (точки цієї моди з яскравостями $g_{ij} < T^{(H)}$ заздалегідь належать контуру деталі);
- моду світла (точки цієї моди з яскравостями $g_{ij} > T^{(B)}$ заздалегідь належать фону);
- інтервал невизначеності (точки цього інтервалу з яскравостями $T^{(H)} \leq g_{ij} \leq T^{(B)}$ можуть належати як контуру, так і фону).

2. На другій стадії виконується додатковий аналіз локальних околиць точок із яскравостями з інтервалу невизначеності $[T^{(H)}; T^{(B)}]$. Для цих точок роз-

раховуються локальні адаптивні пороги бінарizaції $\{t_m\}$, що служать основою їх класифікації на контурні та фонові.

Оцінки глобальних порогів бінарizaції зображення креслення деталі можна отримати статистичним аналізом розподілу яскравостей його точок із адаптацією до виду носія креслення:

1. Кольорове напівтонове зображення креслення деталі монохроматизується, для нього розраховується гістограма яскравості $H(n, r_{ij})$ [67] й апроксимується кубічним В-сплайном для ліквідації незначних флуктуацій яскравості точок зображення креслення [122].

2. Оцінку яскравості зображення креслення деталі можна виконати аналізом розподілу яскравостей його точок за відносними розмірами мод тіні та світла у діапазоні його яскравості. Як було показано раніше, для гістограм фільтрованих контрастованих зображень креслень деталей характерна наявність виражених мод світла й тіні з вузькими тоновими діапазонами й інтервалу невизначеності з безліччю локальних екстремумів, істотно менших екстремумів обох мод. З огляду на цю обставину, при оцінюванні нижнього ($T^{(H)}$) та верхнього ($T^{(B)}$) порогів бінарizaції по гістограмі яскравості пропонується розраховувати характеристики яскравості як зображення у цілому, так і окремо його частин - для лівої (H) і правої (B) половин гістограми яскравості, з метою усунення взаємовпливу мод тіні та світла (2.12-2.17).

$$\lim_{i \rightarrow 0} h_i = L_{\min} : h_i = 0, \quad \lim_{i \rightarrow 255} h_i = L_{\max} : h_i = 0, \quad \bar{L} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{255} i \cdot h_i, \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{(\bar{L} - L_{\min})}{(L_{\max} - L_{\min})}, \quad \gamma = 1 - \beta, \quad (2.13)$$

$$\lim_{i \rightarrow 0} h_i = L_{\min}^{(H)} : h_i = 0, \quad \lim_{i \rightarrow 127} h_i = L_{\max}^{(H)} : h_i = 0, \quad \bar{L}^{(H)} = \frac{1}{n^{(H)}} \cdot \sum_{i=0}^{127} i \cdot h_i, \quad (2.14)$$

$$\beta^{(H)} = \frac{(\bar{L}^{(H)} - L_{\min}^{(H)})}{(L_{\max}^{(H)} - L_{\min}^{(H)})}, \quad \gamma^{(H)} = 1 - \beta^{(H)}, \quad (2.15)$$

$$\lim_{i \rightarrow 128} h_i = L_{\min}^{(B)} : h_i = 0, \quad \lim_{i \rightarrow 255} h_i = L_{\max}^{(B)} : h_i = 0, \quad \bar{L}^{(B)} = \frac{1}{n^{(B)}} \cdot \sum_{i=128}^{255} i \cdot h_i, \quad (2.16)$$

$$\beta^{(B)} = \frac{(\bar{L}^{(B)} - L_{\min}^{(B)})}{(L_{\max}^{(B)} - L_{\min}^{(B)})}, \quad \gamma^{(B)} = 1 - \beta^{(B)}, \quad (2.17)$$

де h_i – бін кольору «i» у гістограмі яскравості зображення;

$n^{(H)}, n^{(B)}$ – кількості точок зображення;

$[L_{\min}; L_{\max}]$, $[L_{\min}^{(H)}; L_{\max}^{(H)}]$ и $[L_{\min}^{(B)}; L_{\max}^{(B)}]$ - діапазони яскравості;

$\bar{L}, \bar{L}^{(H)}, \bar{L}^{(B)}$ - середні яскравості;

$\beta, \beta^{(H)}, \beta^{(B)}$ - оцінки відносних розмірів моди тіні;

$\gamma, \gamma^{(H)}, \gamma^{(B)}$ - оцінки відносних розмірів моди світла.

3. Тоді оцінки нижнього ($T^{(H)}$) та верхнього ($T^{(B)}$) порогів бінаризації можна розрахувати за формулами (2.18-2.19)

$$T^{(H)} = \alpha^{(H)} \cdot (\beta^{(H)} \cdot \bar{L}^{(H)} + \gamma^{(H)} \cdot L_{\min}^{(H)}), \quad \alpha^{(H)} = 1 - k \cdot \beta^{(H)}, \quad (2.18)$$

$$T^{(B)} = \alpha^{(B)} \cdot (\beta^{(B)} \cdot \bar{L}^{(B)} + \gamma^{(B)} \cdot L_{\min}^{(B)}), \quad \alpha^{(B)} = 1 - k \cdot \beta^{(B)}, \quad (2.19)$$

де $\alpha^{(H)}, \alpha^{(B)}, k$ – конфігураційні коефіцієнти.

За допомогою коефіцієнтів $\alpha^{(H)}, \alpha^{(B)}$ можна змінювати чутливість методу до тональності фону зображення креслення деталі на трьох рівномірних носіях («синька», калька, ватман) (рис. 2.3). Враховуючи пригнічення більшої частини тона фону зображення під час його фільтрації (див. розділ 2.1) та визначальний вплив на порогові бінаризації (що витікає з (2.18-2.19)), значення $\alpha^{(H)}$ і $\alpha^{(B)}$ слід обирати з $[0,95; 1,00]$. При цьому, оскільки бінаризація має на меті виділення темних об'єктів (точок контуру) на світлому фоні, то при збільшенні

$\alpha^{(H)}$ і $\alpha^{(B)}$ чутливість методу до зміни яскравості падає, а ступінь деталізації точок зменшується, та навпаки, що впливає з (2.18-2.19). Таким чином, для темного носія «синька» з вираженим тоном фону зміни яскравості мають враховуватися повністю, для носія калька зі слабо-вираженою тональністю фону середньої яскравості - частково, а для світлого носія ватман з практично відсутнім забарвленням фону - мінімально. Саме тому оцінки $\alpha^{(H)}$ і $\alpha^{(B)}$ розраховуються за формулами (2.18-2.19) при $k = 1,00 - 0,95 = 0,05$.

У результаті, точки $\{r_{ij}\}$ зображення креслення деталі класифікуються на:

- точки бінарного контуру деталі ($r_{ij}^{(b)} = 0$)), яскравість яких не подолала нижнього глобального порогу (тобто $r_{ij} < T^{(H)}$);
- точки бінарного фону зображення ($r_{ij}^{(b)} = 1$)), яскравість яких подолала верхній глобальний поріг (тобто $r_{ij} > T^{(B)}$).

Решта точок зображення поки залишається в інтервалі невизначеності.

Як відзначалося у [130], класифікація точок зображення креслення деталі з використанням гістограм яскравості тільки за глобальними порогоми бінаризації проблематична, якщо мода тіні мала у порівнянні з модою світла. А саме ця особливість властива гістограмам яскравості зображень креслень деталей (див. розділ 2.2.1). У цьому випадку бімодальність гістограм виражена слабо. Однак, у локальних областях інтересу зображення креслення деталі бімодальність може бути більш виразною, якщо такі області містять відмінні контур і фон. Тому, у розвиток раніше запропонованого варіанту методу [138] для класифікації точок зображення креслення деталі з інтервалу невизначеності на контурні та фонові, у розгляд введені локальні пороги бінаризації $\{t_m = f(\omega_m, L_{\omega_m})\}$ з їх адаптацією до локального розподілу яскравостей L_{ω_m} та виду носія креслення у межах ω_m -околиці аналізованої точок із варійованим розміром d_{ω} :

1. Для виділення локальних областей із квазі-бімодальними гістограмами у ω_m -околиці аналізованої точки r_{ij} зображення креслення деталі виділяються

точки, рівновіддалені й центровані відносно точки r_{ij} (рис. 2.19). В основу такого виділення покладено принцип взаємозв'язку значень сигналу у межах «кліків» при описі дискретних зображень розподілом ймовірностей Гібса [127]. При цьому навколо кожної точки r_{ij} формується 4 групи точок - «кліків» (див. рис. 2.19), і вважається, що аналізована точка r_{ij} ймовірносно взаємопов'язана з елементами «кліків», розташованими вздовж 8 базових растрових векторів у межах її розріджених ω_k -околиць із радіусом $d_\omega = \text{var}$).

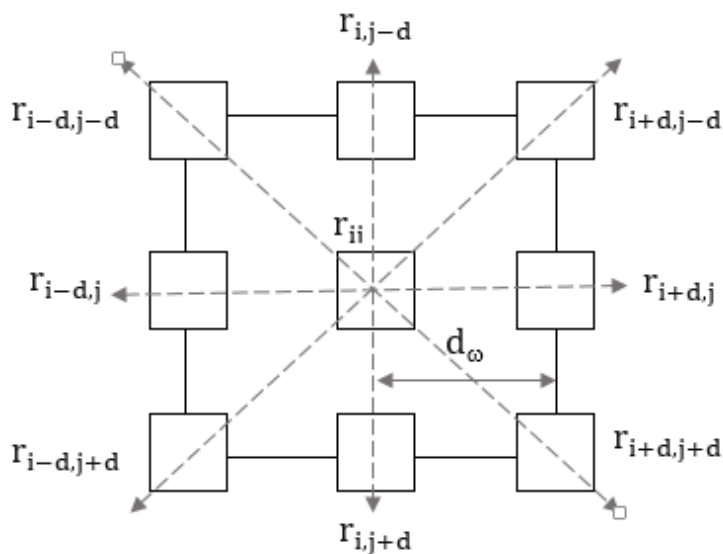


Рисунок 2.19 - ω_m -околиці точки r_{ij} з $d_\omega = \text{var}_1^4$

2. Виконується статистичний аналіз розподілу яскравостей локальних точок ω_m -околиці у межах «кліків». Мінімальна ($L_{\min}^{(\omega)}$), максимальна ($L_{\max}^{(\omega)}$) й середня ($\bar{L}^{(\omega)}$) оцінки яскравості точок зображення креслення деталі у межах «кліків» розраховуються за формулами (2.20 - 2.22).

$$L_{\min}^{(\omega)} = \min \begin{pmatrix} \min(r_{k+i,l}) & \forall k \in [-d_\omega, d_\omega], l = 0, \\ \min(r_{k,l+j}) & \forall l \in [-d_\omega, d_\omega], k = 0, \\ \min(r_{k+i,l+j}) & \forall k, l \in [-d_\omega, d_\omega], \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

$$L_{\max}^{(\omega)} = \max \begin{pmatrix} \max(r_{k+i,l}) & \forall k \in [-d_{\omega}, d_{\omega}], j = 0, \\ \max(r_{k,l+j}) & \forall l \in [-d_{\omega}, d_{\omega}], i = 0, \\ \max(r_{k+i,l+j}) & \forall k, l \in [-d_{\omega}, d_{\omega}], \end{pmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\bar{L}^{(\omega)} = \frac{1}{9 \cdot d_{\omega}} \left(\sum_{k=-d_{\omega}}^{d_{\omega}} r_{k+i,l} + \sum_{l=-d_{\omega}}^{d_{\omega}} r_{k,l+j} + \sum_{k,l=-d_{\omega}}^{d_{\omega}} r_{k+i,l+j} \right) \quad (2.22)$$

3. Виконується оцінка розподілу яскравостей локальних точок у межах ω_k -околиці точки r_{ij} . Нехай $\beta^{(\omega)}$ і $\gamma^{(\omega)}$ - оцінки відносних розмірів мод тіні і світла у діапазоні яскравості $[L_{\min}^{(\omega)}; L_{\max}^{(\omega)}]$ (у даному випадку ω_m -околиці точки r_{ij}) (2.23).

$$\beta^{(\omega)} = \frac{\bar{L}^{(\omega)} - L_{\min}^{(\omega)}}{L_{\max}^{(\omega)} - L_{\min}^{(\omega)}}, \quad \gamma^{(\omega)} = \frac{L_{\max}^{(\omega)} - \bar{L}^{(\omega)}}{L_{\max}^{(\omega)} - L_{\min}^{(\omega)}} = 1 - \beta^{(\omega)}, \quad (2.23)$$

Тоді можна виділити два варіанти оцінки балансу яскравостей світла й тіні у ω_m -околиці точки r_{ij} :

Варіант 1. Якщо розміри мод тіні й світла різні, то ω_m -околиця аналізованої точки r_{ij} найбільш вірогідно містить точки з локально низьким або високим значеннями яскравості. Тоді розрахунок локального порогу бінаризації t_m виконується за формулою (2.24).

$$t_m = \alpha \cdot (\beta^{(\omega)} \cdot \bar{L}^{(\omega)} + \gamma^{(\omega)} \cdot L_{\min}^{(\omega)}), \quad \alpha = 1 - k \cdot \beta, \quad (2.24)$$

де α – глобальний настроюваний коефіцієнт.

Варіант 2. Якщо розміри мод світла й тіні однакові, то локальна ω_m -околиця точки r_{ij} , що аналізується, рівноймовірно містить точки різної яскравості. У такому випадку локальний поріг бінаризації обрати важко, і

потрібна адаптація локального порогу бінаризації до розміру ω_m -околиці точки r_{ij} . Для цього за допомогою ітераційної процедури визначається радіус $d_\omega \in [d_{\min}; d_{\max}]$ ω_m -околиці, у залежності від розподілу яскравостей точок ω_m -околиці:

- починаючи з радіусу $d_\omega = (d_{\min} = 1)$ ω_m -околиці, локальна область ітеративно розширюється збільшенням d_ω на крок 1, і перевіряється можливість розрахунку t_m за формулою (2.24) аналізом варіанту 1;

- якщо у результаті ітерацій радіус локальної області збільшено до $d_{\max}$, а значення t_m не розраховане, то воно розраховується за спрощеною формулою $t_m = \alpha \cdot \bar{L}^{(\omega)}$; при цьому середній рівень яскравості $\bar{L}^{(\omega)}$ локальної області зображення є добрим наближенням до t_m , бо розміри зон світла і тіні однакові.

Експериментально встановлено, що при малому d_ω тонкі лінії контуру деталі бінаризуються успішно, але товсті деформуються, і навпаки. Це пояснюється особливостями побудови згладжених растрових ліній контуру за Брезенхемом [34]: для зменшення ступінчатості лінії зображуються не тільки чорним кольором, але і відтінками сірого кольору, що можуть подолати поріг бінаризації й будуть зараховані до фонових (втрачені). При $d_\omega > 9$ істотно зростає чутливість методу до $L_{\min}^{(\omega)}$; тому параметр d_ω доцільно обирати з $[1; 9]$. Керуючись позицією яскравості r_{ij} аналізованої точки у сегменті $[L_{\min}; L_{\max}]$, початкове значення d_ω пропонується розраховувати, відповідно до виразу (2.25).

$$d_\omega = \left\lfloor 9 \cdot \frac{L_{\max} - r_{ij}}{L_{\max} - L_{\min}} \right\rfloor + 1 \quad (2.25)$$

Таким чином, якщо точка, що бінаризується, - темна, то значення d_ω має бути максимальним, а якщо світла - мінімальним. Зворотна залежність d_ω від яскравості аналізованої точки r_{ij} пояснюється необхідністю збереження при бінаризації тонких ліній контуру деталі.

Приклад результатів тестування описаного вище методу наведено на рис. 2.20; у результуючому зображенні тонкі лінії вихідного контуру збережені (при значенні індексу структурної подібності з оригіналом $SSIM = 99,41\%$).

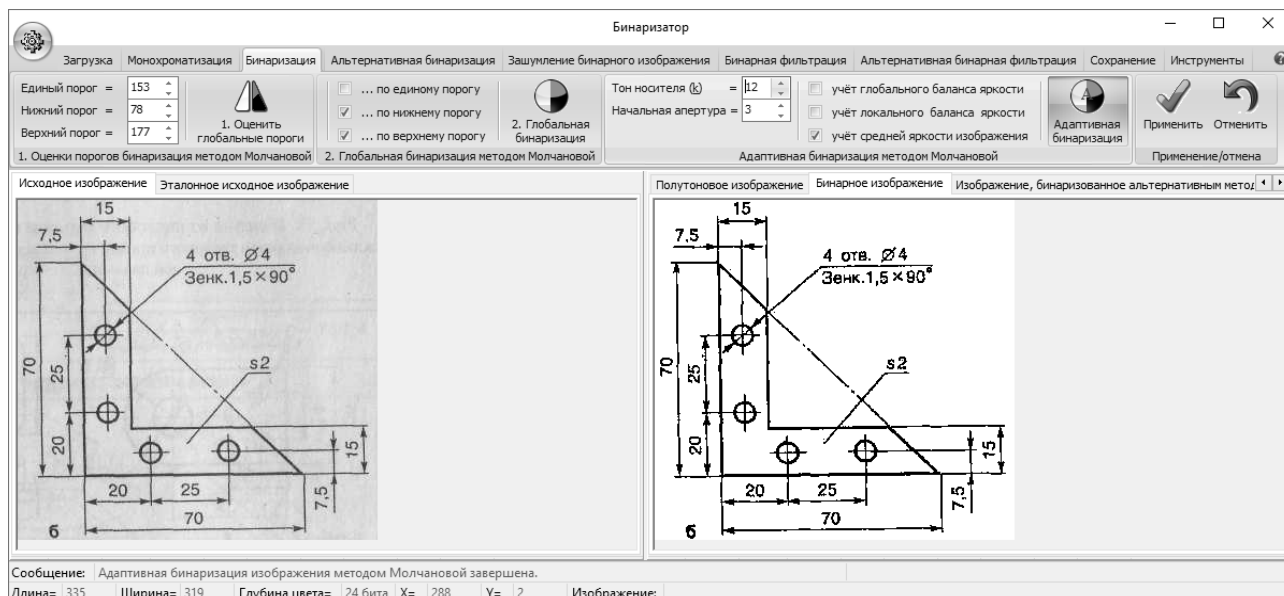


Рисунок 2.20 – Приклад застосування методу двохстадійної адаптивної бінаризації растрового кольорового напівтонового фільтрованого зображення креслення деталі

Аналіз результатів тестування методу двохстадійної адаптивної бінаризації кольорового напівтонового растрового зображення креслення деталі (розділ 4.4) підтверджує якість бінаризації, достатню для збереження топологічних особливостей контурів деталей.

2.2.5 Аналіз задачі усунення спотворень растрового бінарного зображення креслення деталі

Оскільки фільтрація і монохроматизація напівтонового зображення креслення деталі виконуються з похибкою ε , то відсутність шуму у результуючому зображенні не гарантовано. Остаточний світловий і хроматичний шум присут-

ній як у модах тіні й світла, так і у зоні невизначеності. Крім того, під час бінаризації до зображення додатково привноситься бінарний шум. Аналіз випадкової репрезентативної вибірки бінарних зображень креслень деталей показав, що типовими спотвореннями в них є (рис. 2.21):

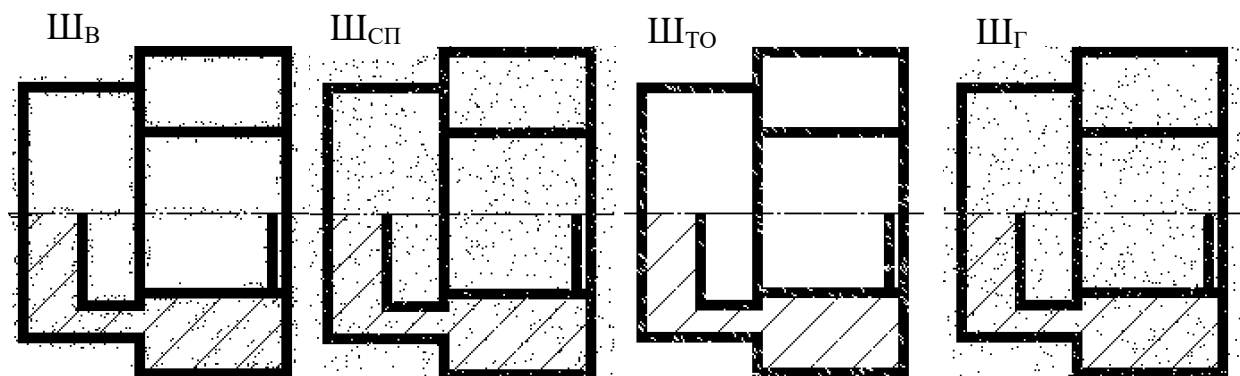


Рисунок 2.21 - Приклади типових спотворень бінарного зображення креслення деталі

– високочастотний імпульсний шум заміщення ($\text{Ш}_\text{В}$) [35] зі спектральною щільністю розподілу ймовірностей, що може бути записано з використанням дельта-функції Дірака [68, 117]: $p(z) = P_0 \cdot \delta(z - 0) + P_1 \cdot \delta(z - 1)$ (z - випадкова величина, що визначає рівень яскравості шуму, з діапазону яскравостей зображення); значення яскравості кожної точки: з ймовірністю P_0 замінюється на «0» (фон), з ймовірністю P_1 - на «1» (контур), з ймовірністю $(1 - P_0 - P_1)$ залишається незмінним; при $P_0 = 0$ шум уніполярний та концентрується у вигляді чорних артефактів навколо контуру; при $(P_0 \neq 0, P_1 \neq 0)$ шум стає схожим на «сіль та перець» ($\text{Ш}_\text{СП}$), що розсіпані по зображенню (тому, його так і називають);

– шум заміщення «твердого олівця» ($\text{Ш}_\text{ТО}$) зі спектральною щільністю розподілу ймовірностей [120]: $p(z) = (P_0 = P_1 = 0 \ \forall z = 0), (P_1 = 0, P_0 = 3 \cdot P(\beta > z^*) \ \forall z = 1)$, де $z^* \in [1; 100] = \text{const}$ - поріг, P_0, P_1 - ймовірності виникнення

шуму яскравості «0» (білий) і «1» (чорний); шум концентрується у контурі у вигляді конгломератів білих точок; β - випадкове число з $[0; 100]$;

– адитивний гаусів шум (Π_{Γ}) зі спектральної щільністю розподілу ймовірностей [18, 67]: $p(z) = (\sqrt{2\pi D})^{-1} \cdot e^{-(z-\mu)^2/2D}$ і нормальним розподілом амплітуди яскравості.

Враховуючи випадковий характер спотворення бінарного зображення креслення деталі, функцією мети задачі його відновлення є гомотопне відображення $\varphi: R^{(B)} \xrightarrow{\varepsilon} R^{(BF)}$ зашумленого зображення $R^{(B)}$ в оригінал $R^{(0)}$ з допустимою похибкою ε шляхом усунення шуму заміщення Π_3 та адитивних спотворень Π_A (2.26).

$$R^{(B)} = H_{\Pi_3}^{-1}[R^{(0)}] - H_{\Pi_A}[R^{(0)}] : \Pi_3 = \{\Pi_B (\Pi_{СП}), \Pi_{ТО}\}, \quad \Pi_A = \Pi_{\Gamma}, \quad (2.26)$$

де $H_{\Pi_3}^{-1}[R^{(0)}]$ – матричний оператор відновлення зображення, що є зворотнім до оператору його зашумлення $H_{\Pi_3}[R^{(0)}]$ імпульсним шумом заміщення.

Відповідно до мети задачі фільтрації бінарних зображень креслень деталей, в якості узагальненого критерія якості фільтрації доцільно обрати мінімальну відстань Хемінга між результуючим (тут фільтрованим, $R^{(BF)}$) та еталонним (неспотвореним, $R^{(0)}$) бінарними зображеннями (2.27) [131, 132].

$$\rho(R^{(BF)}, R^{(0)}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (r_{ij}^{(BF)} \wedge r_{ij}^{(0)}) \leq \varepsilon, \quad (2.27)$$

Мірами цієї відстані виступають загальноприйняті уніфіковані показники якості: MSE, PSNR, CNR, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy [82, 90, 119, 121]. Інтегральний вплив шумів Π_B ($\Pi_{СП}$), $\Pi_{ТО}$, Π_{Γ} на бінарне зображення креслення деталі представлено хаотично розташованими на зображенні чорними точками та їх конгломератами на білому фоні, а також білими точками та їх конгломератами на чорному контурі.

До моделі усунення спотворень бінарних зображень креслень доцільно ввести обмеження: мінімальна довжина примітиву контуру деталі становить 3 точки; конгломерати точок меншого розміру будуть вважатися бінарним шумом.

Виходячи з викладеного вище, розроблено комплекс методів усунення спотворень бінарних зображеннях креслень деталей, спеціалізованих на особливості даної предметної області; комплекс містить просторові апертурні методи фільтрації:

- метод контурних масок;
- метод усунення контурних спотворень.

2.2.6 Метод контурних масок

Ідея методу контурних масок полягає в імітації двофазного розпізнавання людиною об'єктів зображення не тільки на основі їх кольору, а й на основі їх форми. У піксельному масштабі, в одиничній 8-околиці точки $P \equiv r_{ij}$ точки $\{P_k\}_0^7$ контуру деталі утворюють між собою або форму у вигляді прямого куту (форма «L», наприклад, утворена точками $\{P_0, P, P_2\}$), або форму у вигляді відрізка прямої «—» (наприклад, $\{P_6, P, P_2\}$), на відміну від артефактів шуму, що таких форм не утворюють (рис. 2.22).

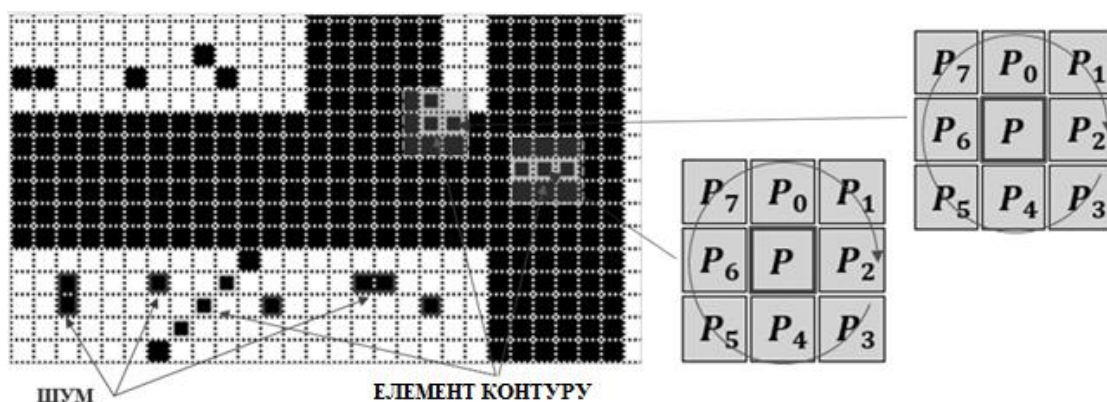


Рисунок 2.22 - Контурні форми

Можливі варіанти контурних форм {« $\neg$ », « $\neg$ », « $\neg$ », « $\neg$ », « $\neg$ », ...} моделюються обертанням базової форми на кути, що кратні $\pm 45^\circ$. Отже, ці контурні форми можна використовувати в якості масок для впізнавання приналежності точки контуру деталі. Так, якщо точка P в її 8-околиці не утворює зі своїми сусідами, принаймні, одну контурну форму, то вона класифікується як точка шуму.

Але, якщо точка P в одиничній 8-околиці має всього одну сусідню чорну точку, то вона може бути і точкою шуму, і кінцевою точкою контуру. Тому, обмежуватися аналізом тільки одиничної 8-околиці точки P не можна. Для розв'язання цієї проблемної ситуації пропонується розглянути 4 ситуації сусідства точок у 8- і 24-околиці точки P (рис. 2.23), а також 4 ситуації, що виходять з їх симетрування.

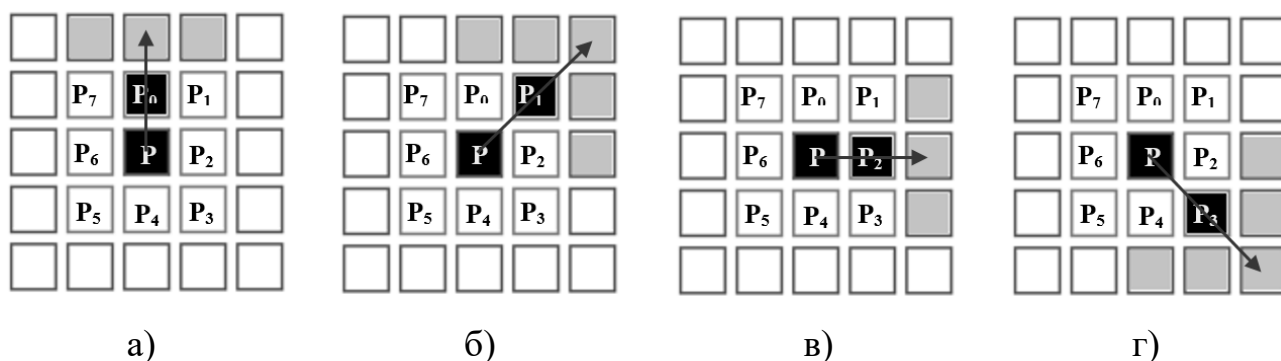


Рисунок 2.23 – Аналіз 24-околиці точки зображення креслення деталі

Неважко помітити, що у разі наявності у точки P одного сусіда у 8-околиці у вертикальному або горизонтальному напрямку, необхідно й достатньо проаналізувати три додаткових точки з 24-околиці точки P (на рис. 2.23, а, в вони показані сірим кольором). Якщо хоча б одна з цих точок є чорною, то точка P має вважатися кінцевою точкою контуру і фільтруватися не буде; в іншому випадку точка P вважається точкою шуму і фільтрується (перекрашується у білий колір). Аналогічно, у разі наявності у точки P одного сусіда у 8-околиці у діагональному напрямку, необхідно й достатньо проаналізувати п'ять додаткових то-

чок у 24-околиці точки Р. Якщо хоча б одна з цих точок є чорною, то точка Р фільтруватися не повинна і навпаки - в іншому випадку. Безумовною ознакою утворення контурних форм в одиничній 8-околиці точки Р є наявність у неї принаймні двох сусідів чорного кольору.

Приклад ефективності описаного вище методу показано на рис. 2.24, де очищене зображення має незначну кількість поодиноких конгломератів більш ніж двох точок (див. обмеження задачі).

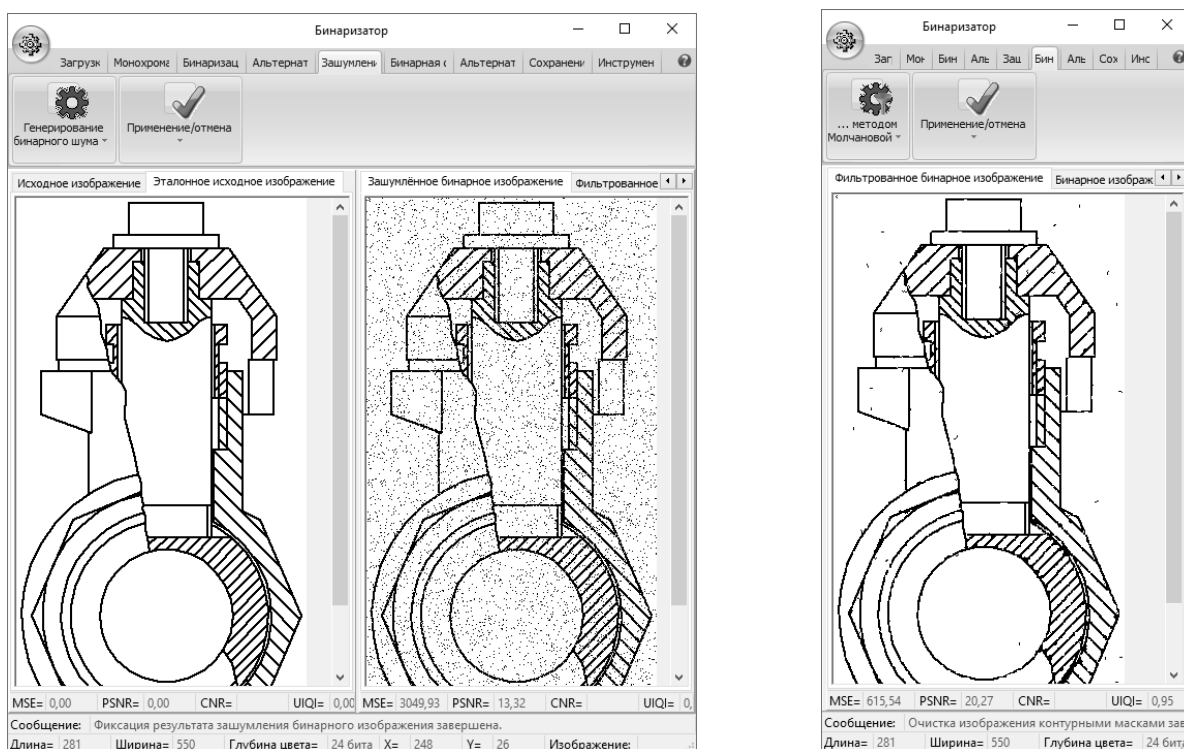


Рисунок 2.24 – Приклад усунення бінарного шуму методом контурних масок

2.2.7 Метод усунення контурних спотворень

Внаслідок впливу на зображення креслень деталей бінарного шуму типів: Ш_Г, Ш_В и Ш_{ТО} (див. розділ 2.2.3) на контурах деталей з'являються чорні й білі артефакти розміром в 1-2 точки, - контурна «бахрома» (рис. 2.25).

Для видалення контурної «бахроми» розроблено оригінальний апертурний метод просторової фільтрації, що базується на застосуванні масок

$\{Z\}^{(0^0-270^0)}$ з асиметричними ядрами, з можливістю повороту на $40^0 - 4270^0$ і симетрування.



Рисунок 2.25 - Фрагменти контуру деталі, що уражені чорною (а) і білою (б) контурною «бахромою»

Маски містять чотири типи точок (рис. 2.26): чорні ($z_{kl}^{(b)} \mid k, l \in [1; 5]$), білі ($z_{kl}^{(w)}$), точки, колір яких не має значення ($z_{kl}^{(b|w)}$) (забарвлені сірим кольором) і чорні точки, що аналізуються ($z_{kl}^{(b*)}$) (виділені контуром або символом X).

$z_{1,1}^{(b w)}$	$z_{1,2}^{(b w)}$	$z_{1,3}^{(b w)}$	$z_{1,4}^{(b w)}$	$z_{1,5}^{(b w)}$
$z_{2,1}^{(b w)}$	$z_{2,2}^{(w)}$	$z_{2,3}^{(w)}$	$z_{2,4}^{(w)}$	$z_{2,5}^{(b w)}$
$z_{3,1}^{(b w)}$	$z_{3,2}^{(w)}$	$z_{3,3}^{(b*)}$	$z_{3,4}^{(w)}$	$z_{3,5}^{(b w)}$
$z_{4,1}^{(b w)}$	$z_{4,2}^{(b)}$	$z_{4,3}^{(b)}$	$z_{4,4}^{(b)}$	$z_{4,5}^{(b w)}$
$z_{5,1}^{(b w)}$	$z_{5,2}^{(b w)}$	$z_{5,3}^{(b w)}$	$z_{5,4}^{(b w)}$	$z_{5,5}^{(b w)}$

Рисунок 2.26 – Приклад структури ядра маски

Для видалення чорної контурної «бахроми» - наростів у вигляді артефактів з чорних точок біля меж примітивів - зображення фільтрується масками $\{Z^{(b)}\}^{\{0^0, 45^0, \dots, 270^0\}}$ з ядрами розміром $d_1 \times d_2$ (рис. 2.27). Якщо при скануванні зображення апертура поточної точки g_{ij} збігається з будь-яким ядром з $\{Z^{(b)}\}$, то

точки зображення, відповідні точкам $z_{kl}^{(b*)}$, фарбуються у білий колір фону (2.28).

$$r_{mn}^{(F)} = 0 \forall \langle d(r_{ij}) \in \{Z^{(b)}\} : r_{mn}^{(F)} \equiv z_{kl}^{(b*)} \rangle \begin{cases} m = i - k + 1, n = j - l + 1, \\ k \in [1; d_1], l \in [1; d_2], \end{cases} \quad (2.28)$$

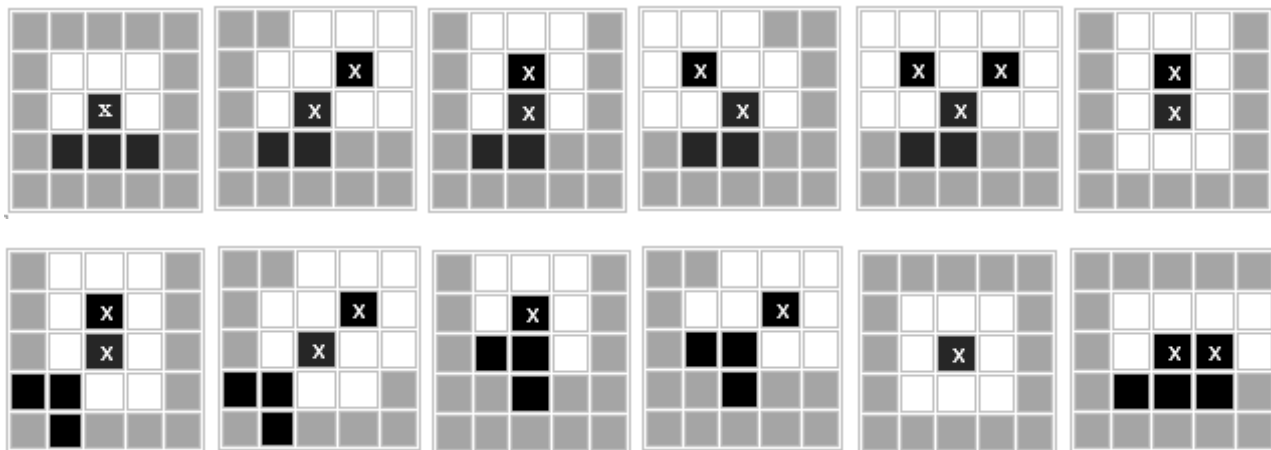


Рисунок 2.27 - Ядра $\{Z^{(b)}\}_{\{0^0, 45^0, \dots, 270^0\}}$ масок фільтрації чорної «бахроми»

Для видалення білої контурної «бахроми» - ерозії меж примітивів і внутрішнього простору контурів - зображення фільтрується масками $\{Z^{(w)}\}_{\{0^0, 45^0, \dots, 270^0\}}$ з ядрами розміром $d_1 \times d_2$ (рис. 2.28).

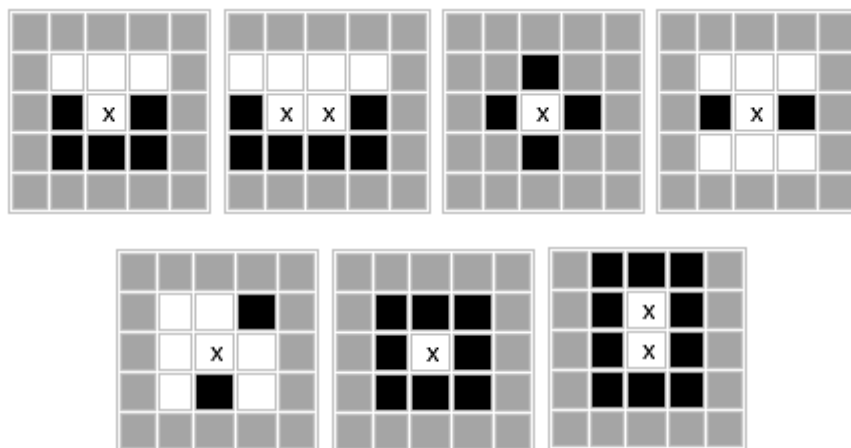


Рисунок 2.28 - Ядра $\{Z^{(w)}\}_{\{0^0, 45^0, \dots, 270^0\}}$ масок фільтрації білої «бахроми»

Якщо при скануванні зображення апертура поточної точки r_{ij} збігається з будь-яким ядром з $\{Z^{(w)}\}$, то точки зображення, відповідні точкам $z_{kl}^{(b*)}$, фарбуються у чорний колір контуру (2.29).

$$r_{mn}^{(F)} = 1 \vee \langle d(r_{ij}) \in \{Z^{(w)}\} \mid r_{mn}^{(F)} \equiv z_{kl}^{(w*)} \rangle \begin{cases} m = i - k + 1, n = j - l + 1, \\ k \in [1; d_1], l \in [1; d_2], \end{cases} \quad (2.29)$$

Приклад ефективності описаного вище методу показано на рис. 2.29.

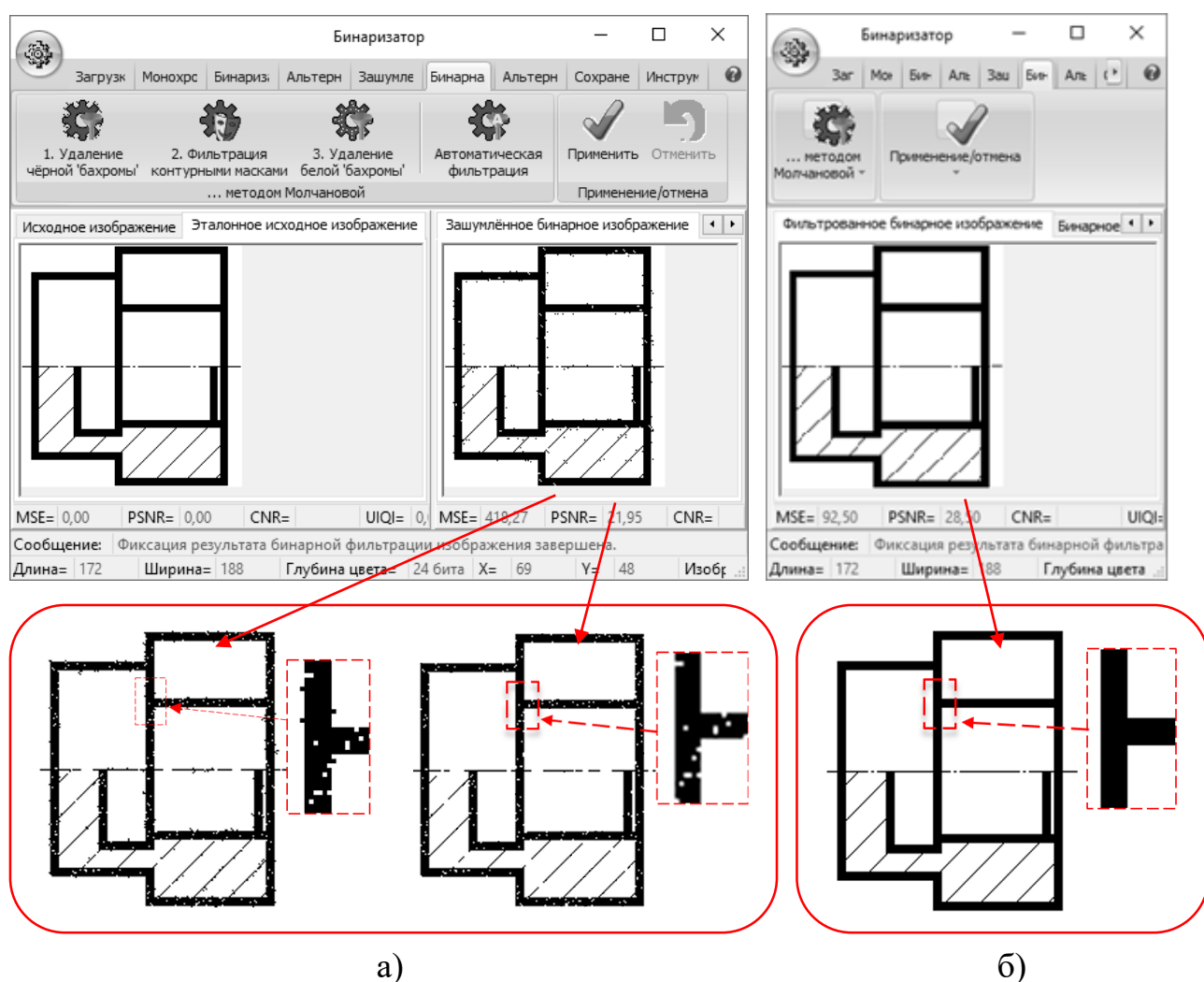


Рисунок 2.29 - Результат усунення бінарного шуму «бахрома»:

- а) результат ураження контуру деталі 10% чорною і білою «бахромою»;
- б) контур деталі, очищений від «бахроми».

Повнота вищеописаних наборів масок $\{Z^{(b,w)}\}$ визначається аналізом всіх можливих конгломератів не більше ніж 2-х (див. обмеження моделі) чорних або білих точок шуму у всіх орієнтаціях 8-зв'язкової рози напрямків.

2.3 Комплекс методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень

Розпізнавання в контурі геометричних примітивів виконується на основі контурного аналізу бінарних зображень. Але, внаслідок площадкового характеру і варіативності товщини контуру деталі, контурний аналіз доцільно виконувати на основі попередньо відокремленої скелетної лінії, - композиції серединних ліній (товщиною в одну точку) площадкового контуру. При цьому суттєво спрощуються методи векторизації растрових зображень.

2.3.1 Аналіз задачі скелетизації контуру деталі

Керуючись поняттями, що використовуються у науковій літературі, присвяченій аналізу зображень і машинній графіці [6, 8, 10], під контуром G растрового бінарного фільтрованого зображення $R^{(BF)}$ креслення деталі, будемо розуміти лінію, що задана двомірною кінцевою множиною растрових точок $\{g_{ij}\} \in (G = R^{(BF)} \setminus \Psi)$ (тут Ψ - фон зображення креслення деталі), з обраним з палітри $C = \{c_k\}_0^1$ значенням кольору контуру (зазвичай це чорний колір з кодом «1») (2.30).

$$G = \{g_{ij}\} : G = R^{(BF)} \setminus \Psi, \quad g_{ij} \in (C = \{c_k\}_0^1 = \{0, 1\}). \quad (2.30)$$

З точки зору цифрової топології контур деталі - це, з одного боку, агрегат графічних примітивів (розділ 1.1), з іншого - площадкова ступінчаста лінія з ва-

ріативної товщиною W ($W \geq 1$), що обмежує деталь, тобто відокремлює деталь від фону з одиничною дистанцією [66].

Топологія контуру деталі визначається координатами x -зв'язкових точок $\{g_{ij}\}$ і матрицею зв'язності, елементи $\{b_k\}$ якої задані структурами одиничних околиць $N_{g_{ij}}^{(x)}$:

– $N_{a \equiv g_{ij}}^{(4)} = \{b_k\}_0^3 : \rho_{a(b_k)}^{(M)} = 1$ - у 4-зв'язковій «манхетенській» метриці;

– $N_{a \equiv g_{ij}}^{(8)} = \{b_k\}_0^7 : \rho_{a(b_k)}^{(III)} = 1$ - у 8-зв'язковій «шаховій» метриці.

Точка $g_{ij}^{(r)} \in G$ називається граничною [98], якщо вона межує у своїй одиничній x -околиці хоча б з однією точкою f_{kl} фону Ψ (2.31).

$$\{g_{ij}^{(r)}\} \subset G : \exists (f_{kl} \in \Psi) \in N_{g_{ij}^{(r)}}^{(x)}, \quad k, l \in [0; x], \quad x \in \{4; 8\} \quad (2.31)$$

В [98] точка $g_{ij}^{(n)} \in \{g_{ij}^{(r)}\}$ названа простою, якщо її видалення не порушує топології контуру G . Властивістю простих точок є можливість їх розпізнавання у зображенні креслення деталі незалежно одна від одної, шляхом аналізу їх x -околиці; це робить методи топологічного стоншення (розділ 1.5) ефективними.

Товщиною W примітиву контуру назвемо відстань між його граничними точками, яка вимірюється у напрямку перпендикуляра до лінії, що визначає форму примітиву контуру.

Скелетом контуру G назвемо плаский граф $G^{(S)} = \{\vec{V}\}$ з ребрами одиничної товщини, утворений x -зв'язною множиною $G^{(-\Pi)} = \{g_{ij}^{(-\Pi)}\}$ не простих межових точок, що отримані у результаті дискретного гомотопного відображення $\varphi: G \xrightarrow{\varepsilon} G^{(S)}$ (що не порушує топологічної подібності контуру і скелету ні за кількістю ребер графа, ні за їх зв'язністю) (2.32).

$$G^{(S)} = G \setminus G^{(\Pi)} : G^{(\Pi)} = \{g_{ij}^{(\Pi)}\}, \quad G^{(S)} = \{\vec{V}\}, \quad W = 1. \quad (2.32)$$

Відображення $\varphi: G \xrightarrow{\varepsilon} G^{(S)}$ називається топологічним стоншенням (скелетизацією) зображення креслення деталі й являє собою ітераційне зменшення товщини W геометричних примітивів контуру від довільної ($W \geq 1$) до мінімальної, в ідеалі одиничної ($W=1$), шляхом видалення всіх простих точок $\{g_{ij}^{(\Pi)}\}$ [3, 4, 31, 40, 49]. Необхідність скелетизації товстого контуру деталі зумовлена необхідністю подальшої його векторизації (розпізнавання у ньому геометричних примітивів та їх параметризації), що виконується на основі аналізу контуру. Внаслідок того, що товщина W контуру деталі варіативна у різних сегментах креслення деталі (див. розділ 1.1), контурний аналіз легше виконувати на основі попередньо відокремленої тонкої (товщиною в одну точку) скелетної лінії контуру. Для цього контур деталі скелетизується, тобто трансформується у зв'язний граф тонких серединних ліній примітивів контуру.

Виходячи з викладеного вище, функція мети задачі скелетизації визначається виразом (2.33).

$$\varphi: G \xrightarrow{\varepsilon} G^{(S)} \mid \begin{cases} G = \{g_{ij}\} \mid G = R^{(BF)} \setminus \Psi, \quad g_{ij} \in (C = \{c_k\}_0^1), \\ G^{(S)} = G \setminus (G^{(\Pi)} = \{g_{ij}^{(\Pi)}\}) : G^{(S)} = \{\vec{V}\}, \quad W = 1, \\ \rho(G^{(S)}, G^{(S_0)}) \rightarrow \varepsilon \rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Узагальненим критерієм якості скелетизації служить $\rho(G^{(S)}, G^{(S_0)})$ – відстань Хемінга між результуючим $G^{(S)}$ й еталонним $G^{(S_0)}$ скелетами контуру деталі [131, 132] (2.34).

$$\rho(G^{(S)}, G^{(S_0)}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{ij}^{(S)} \wedge g_{ij}^{(S_0)}), \quad (2.34)$$

В якості його міри виступають уніфіковані показники: MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy [82, 90, 119, 121]. Ці показники відпові-

дають кількісній оцінці евклідової відстані $D(G^{(S)}, G^{(S_0)})$ між точками контурів деталі результуючого й еталонного скелетів (2.35, 2.36).

$$D(G^{(S)}, G^{(S_0)}) = \frac{1}{L^{(S)}} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{d(g_{ij}^{(S)}, G^{(S_0)})} + \frac{1}{L^{(S_0)}} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{d(g_{ij}^{(S)}, G^{(S_0)})}, \quad (2.35)$$

$$d(g_{ij}^{(S)}, G^{(S_0)}) = \begin{cases} 0 & \forall r_{ij} \in \Psi, \begin{cases} u \in [1; M] \\ v \in [1; N] \end{cases} \\ \min_{\{u,v\}} \{(u-i)^2 + (v-j)^2\} & \forall r_{ij} \notin \Psi, \end{cases} \quad (2.36)$$

де $L^{(S)}, L^{(S_0)}$ – кількості точок у результуючому й еталонному зображеннях креслення деталі.

Основним обмеженням задачі скелетизації контуру деталі є забезпечення еквідистантності (серединного розташування) продукovanого скелету по відношенню до меж контуру деталі, що необхідно для збереження його топології (рис. 2.30).

Коректність моделі й розробляємих методів скелетизації мають бути зумовлені допустимою похибкою ε скелетизації внаслідок нееквівалентності контуру деталі та графу, що утворює скелет, через фундаментальну невідповідність властивостей контуру деталі у дискретному і безперервному просторах [126]. Слід врахувати, що, внаслідок чутливості скелету до растрових спотворень контуру, серединне розташування скелету у контурі не завжди можна забезпечити у принципі, наприклад, при парній товщині контуру (рис. 2.30, в). Тому, точне центрування скелету у контурі не потрібне; досить наближеного центрування з похибкою ε , наприклад, у 1 точку у «шаховій» метриці.

Аналіз результатів роботи перерахованих у розділі 1.5 методів за продуктивністю й якістю продуктованих скелетів показав, що найбільш придатними для операції $\varphi: G \xrightarrow{\varepsilon} G^{(S)}$ є ітераційні методи топологічної скелетизації.

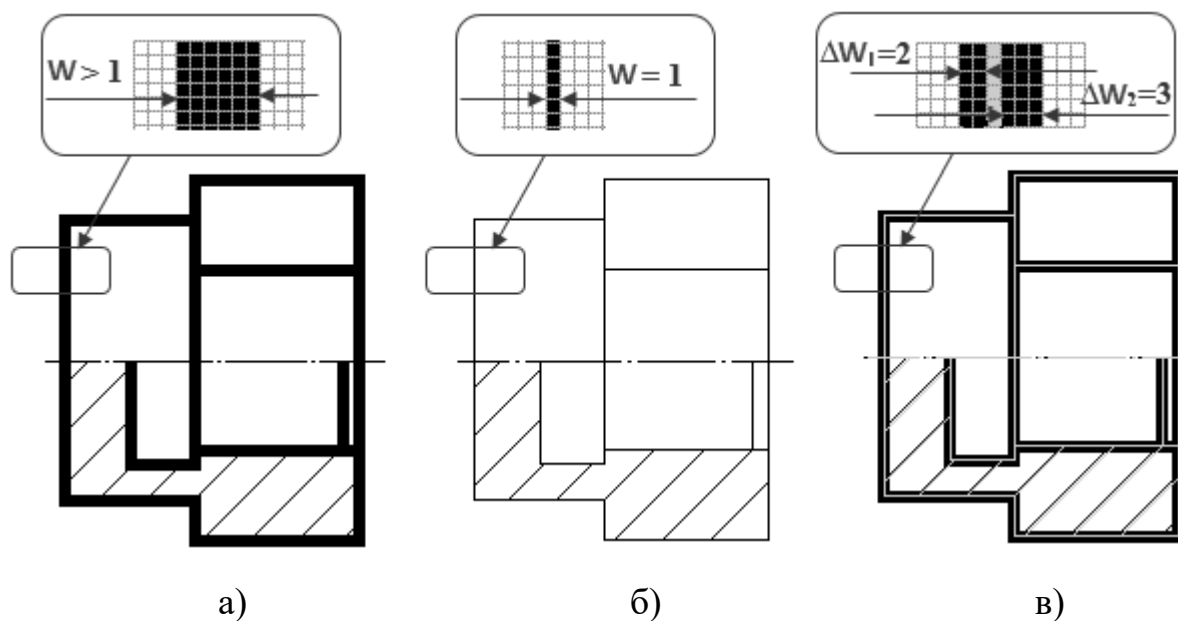


Рисунок 2.30 - Скелетизація контуру деталі:

- а) контур деталі;
- б) скелет контуру деталі;
- в) результат скелетизації контуру деталі з похибкою $\varepsilon = 1$.

У цих методах на кожній ітерації точки контуру перевіряються на належність множині простих точок зіставленням їх околиць (апертур) з ядрами заданих розмірів зумовленого набору масок. Так, наприклад, в одному з найбільш досконалих методів топологічного стоншення об'єктів (з точки зору забезпечення гомотопності скелету і контуру) - методі Wu R.Y. & Tsai W.H. (далі Wu & Tsai) [41, 136, 137] - перевірка належності граничної точки контуру деталі множині простих точок виконується зіставленням її апертури з ядрами зумовленого набору асиметричних базових масок $\{Z\}_A^K$: десяти масок $\{Z\}_{(A-J)}^{(40^\circ)}$ стоншення й однієї $\{Z\}_{(K)}^{(40^\circ-4270^\circ)}$ - видалення чорної контурної «бахроми» (з можливістю обертання на кути, що кратні 490°) (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Маски базового методу

Індекс	Маска	Індекс	Маска	Індекс	Маска
A		E		I	
B		F		J	
C		G		K	
D		H			

Для цього бінарне растрове зображення креслення сканується поточною. На граничну точку $g_{ij}^{(r)}$ контуру деталі накладаються маски $\{Z\}_A^J$ з центром ядра «Ц», і точка $g_{ij}^{(r)}$ вважається простою, якщо її апертура відповідає хоча б однієї з цих масок.

Символом «?» у масках позначено точки, щонайменше одна з яких має бути білою. Асиметричність масок забезпечує збереження скелету одиничної товщини при парній товщині ліній контуру. Так точка класифікується як проста для горизонтальних і вертикальних ліній контуру, якщо її околиця відповідає маскам $\{Z\}_A^D$. Наприклад, фрагмент перетину вертикальної й горизонтальної ліній на рис. 2.31 стоншується застосуванням тандему масок $\{Z\}_{A,C}$. При цьому зі східного боку контуру видаляються граничні точки 1, 3, 4, оскільки їх околиці відповідають масці $\{Z\}_A$, а з західного боку - гранична точка 2, оскільки її околиця відповідає масці $\{Z\}_C$.

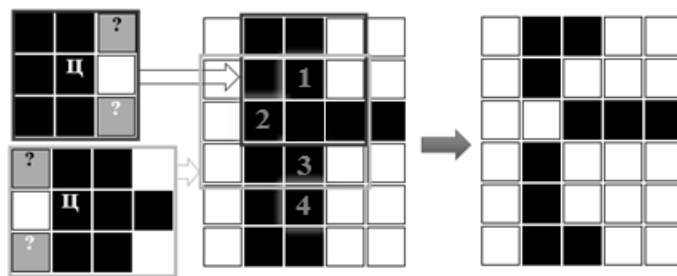


Рисунок 2.31 - Приклад стоншення фрагменту перетину примітивів

З точки зору розглянутої предметної області, існуючі методи скелетизації [3, 4, 31, 40, 49] мають загальний істотний недолік, який виявляється у типових викривленнях скелетів; це призводить до неприйнятних порушень їх гомотопності контурам деталей.

Суттєве зниження спотворень скелету досягається застосуванням розробленого комплексу методів двоетапного покращення скелету контуру деталі:

- на першому етапі, під час ітеративного стоншення контуру деталі, коригуються ітеративні спотворення скелету;
- на другому етапі, після отримання скелету у цілому, виконується реконструкція спотворених ділянок перетину геометричних примітивів скелету.

Коригування скелету виконується за допомогою розроблених масок:

- апертура простої точки, що видалена базовим методом, зіставляється з ядрами розробленого набору коригуючих і відновлюючих масок;
- при збігу апертури точки з ядром будь-якої маски виконується коригування скелету відповідно до розроблених правил прийняття рішень, специфічних для кожного типу спотворень скелету.

Розглянемо порядок відновлення гомотопності скелету, згенерованого базовим методом, до контуру деталі на прикладі методу Wu & Tsai.

2.3.2 Метод коригування спотворень топології кутів скелету

Перший тип спотворення скелету полягає в ітеративному порушенні топології його кутів (рис. 2.32).

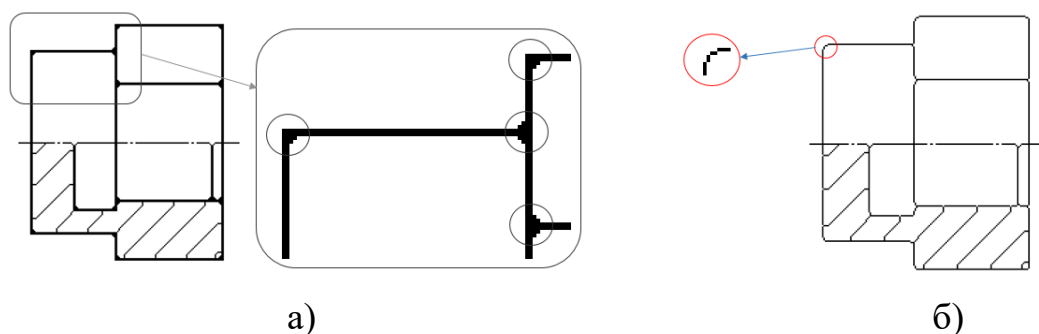


Рисунок 2.32 - Спотворення топології кутів скелету:

- а) ітеративне спотворення топології кутів скелету;
- б) спотворені кути результуючого скелету.

Для пояснення суті проблеми введемо необхідні визначення:

- вершиною опуклого куту контуру назвемо його точку «а», у 4-зв'язковій околиці $N_a^{(4)}$ якої суміжні точки b_k і b_{k+1} ($k \in [0, 3]$) належать контуру (рис. 2.3.3, а);
- вершиною ввігнутого куту контуру назвемо чорну точку «а», у 8-зв'язковій околиці $N_a^{(8)}$ якої з усіх діагональних точок $\{b_1, b_3, b_5, b_7\}$ тільки одна належить фону (рис. 2.33, г).

У базовому методі для стоншення опуклих кутів застосовуються маски, що використовують 4-зв'язну «манхетенську» метрику, в якій відстані від вершини опуклого куту контуру до фону $\rho_0^M = \rho_6^M = 1$ (рис. 2.34, а). Відповідно до покладеної в основу методу ідеї, вершина опуклого куту контуру вважається простою точкою і видаляється масками $\{Z\}_A^K$ за один прохід.

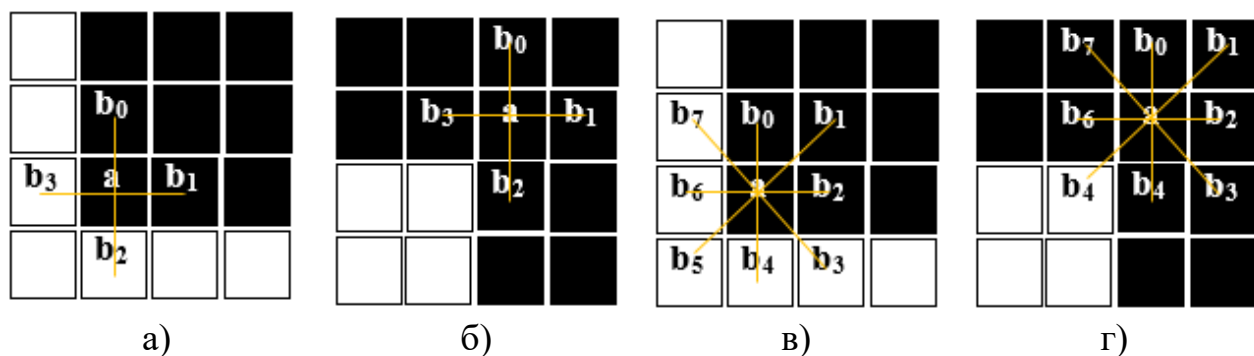


Рисунок 2.33 - X-суміжність вершин кутів контуру

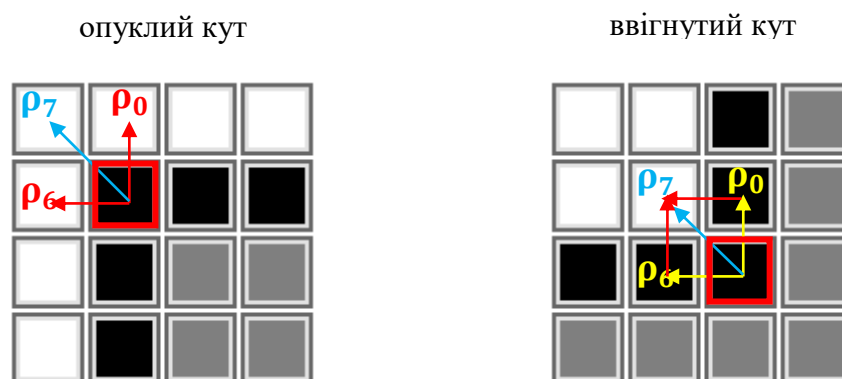


Рисунок 2.34 – Розв’язання проблеми стоншення кутів контуру

Однак, вершини ввігнутих кутів у «манхетенській» метриці не є граничними точками (рис. 2.33, б), адже відстані від вершини ввігнутого куту до фону $\rho_7^M = 2$ (рис. 2.34, а). Тому, вершини ввігнутих кутів не можуть бути видалені за один прохід із використанням масок $\{Z\}_A^K$, бо це призводить до спотворення топології кутів (див. рис. 2.32) внаслідок можливого застосування різних наборів масок на двох послідовних ітераціях й, у результаті, - до порушення гомотопності скелету до контуру.

У запропонованому покращеному методі скелетизації проблема обробки вершин кутів вирішується використанням 8-зв'язкової «шахової» метрики і для ввігнутих, і для опуклих кутів. Оскільки відстані від вершин й опуклого ($\rho_0^{\text{III}} = \rho_6^{\text{III}} = \rho_7^{\text{III}} = 1$), й ввігнутого ($\rho_7^{\text{III}} = 1$) кутів до фону однакові (рис. 2.34, б), то ці вершини можуть бути видалені за один прохід і вдвічі швидше, ніж методом-

прототипом. Для збереження топології контуру при цьому необхідно розпізнавати вершини ввігнутих кутів і визначити умови збереження зв'язності скелету при їх видаленні. Для розпізнавання вершин ввігнутих кутів розроблено маски $\{\hat{Z}\}_A^I$ (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 - Маски $\{\hat{Z}\}_A^I$

Базова маска		Розроблена маска		Базова маска		Розроблена маска	
A				E			
C				H			

В них використовуються елементи ядр базових масок, що не задіяні у базовому методі: з альтернативними кольорами (позначені як «?») й ігноровані (позначені як «X»); при цьому кандидат на вершину ввігнутого куту виділено символом «*». Оскільки вершина ввігнутого куту має рівно дві сусідні граничні точки, то точку контуру можна вважати вершиною ввігнутого куту, якщо вона позначена як така двічі. Для реалізації цього правила використовується прапор $g^{(*)} = 0$. Якщо за абиякою коригуючою маскою з $\{\hat{Z}\}_A^I$ точка $g_{ij}^{(r)}$ розпізнається як вершина ввігнутого куту, то вона позначається як кутова, а значення $g^{(*)}$ збільшується на 1. Тоді, якщо по завершенню перевірок масками $\{\hat{Z}\}_A^I$ значення $g^{(*)} = 2$, то точка $g_{ij}^{(r)}$ не видаляється для запобігання порушенню гомотопності скелету контуру деталі. На рис. 2.35 показано приклад скелетизації контуру деталі

«Гайка» (рис. 2.35, а) базовим методом, на якому видно сильні спотворення кутів (рис. 2.35, б) і поліпшеним методом із суттєво меншими спотвореннями кутів (рис. 2.35, в).

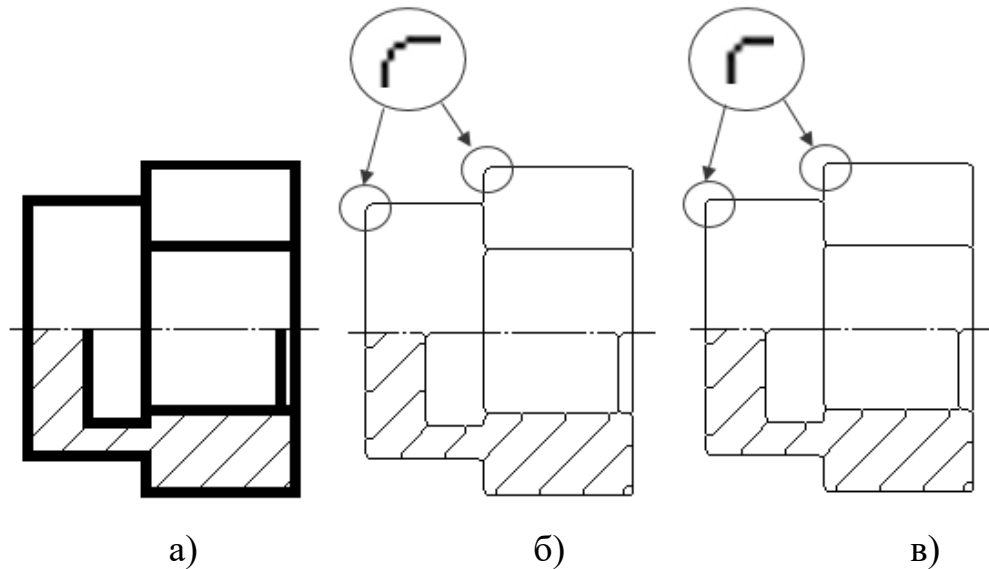


Рисунок 2.35 - Спосіб коригування порушення топології кутів скелету:

- а) стоншуємий контур деталі;
- б) скелет, отриманий базовим методом;
- в) скелет, отриманий покращеним методом.

2.3.3 Метод коригування порушень зв'язності скелету

Другий тип спотворення скелету полягає у порушенні зв'язності скелету у процесі стоншення контуру при наявності декількох ввігнутих кутів у межах околиці 4×4 точки $g_{ij}^{(r)}$, що аналізується (рис. 2.36). Точки, що виділені на рис. 2.36 контуром, будуть видалені масками $\{Z\}_A^B$ (на рис. 2.36, а вказано індекси масок, що видаляють ці точки). Це призведе до порушення зв'язності скелету (рис. 2.36, б).

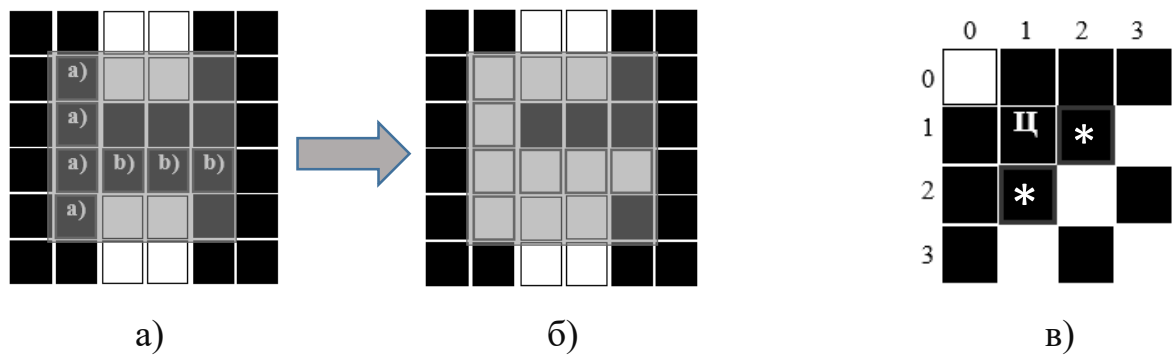


Рисунок 2.36 - Спосіб коригування порушень зв'язності скелету

Для розв'язання цієї проблеми розроблено коригуючу маску $\{\hat{Z}\}_L$ (рис. 2.36, в) з можливістю обертання на кути, кратні 490^0 , застосуванням якої розв'язується проблема стоншення ввігнутого куту контуру для різних його орієнтацій. При цьому, якщо точку $g_{ij}^{(r)}$ опізнано як вершину ввігнутого куту, то вона перевіряється маскою $\{\hat{Z}\}_L^{(40^0-4270^0)}$, і, якщо апертура точки "Ц" збігається з маскою в однієї з чотирьох її орієнтацій, то вершина ввігнутого куту може бути видалена без порушення зв'язності скелету; зв'язність забезпечується точками маски $\{\hat{Z}\}_L$ з координатами (1, 2) і (2, 1) (рис. 2.36, в).

2.3.4 Метод коригування порушень топології скелету у точках перетину геометричних примітивів

Третій тип спотворення скелету полягає у порушенні гомотопності скелету у точках перетину примітивів, адже специфіка предметної області, що розглядається, вимагає приналежності цих точок (наприклад, вершин прямих кутів скелету) контуру деталі (рис. 2.37).

Методи топологічної скелетизації чутливі до локальних властивостей контуру, що змінюються після кожної ітерації його стоншення. Так при товщині примітиву у кілька точок ($W \geq 1$) вже на першій ітерації його стоншення маскою $\{Z\}_A$ з'являється артефакт «поличка», що від ітерації до ітерації збільшує свої розміри, все більше спотворюючи скелет (рис. 2.38).

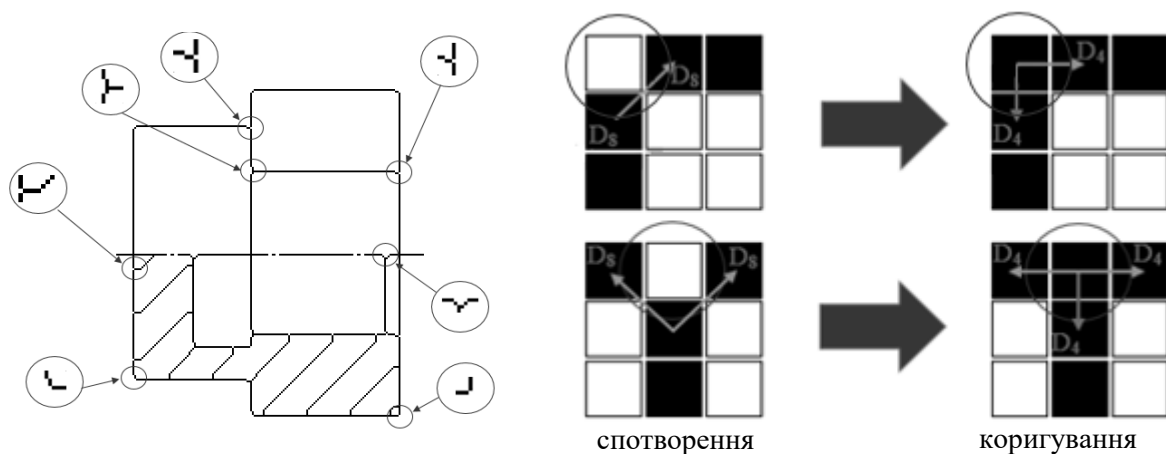


Рисунок 2.37 – Спосіб коригування спотворень скелету
у точках перетину примітивів

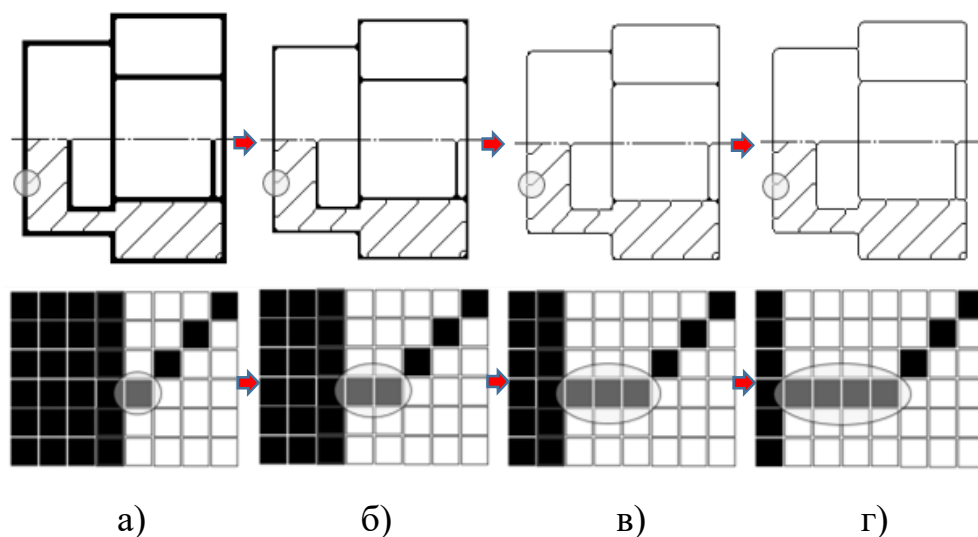


Рисунок 2.38 - Результат ітеративного стоншення сполучення
товстого і тонкого примітивів контуру

Усунення цих недоліків вимагає регенерації результуючого скелету коригуванням артефактів, що деформують його топологію. Для цього розроблені відновлюючі маски $\{\hat{Z}_{(0)-(18)}^{(40^0-4270^0)}\}$ розміром 5 x 5 (табл. 2.3) із можливістю обертання на кути, кратні 90^0 ($40^0 - 4270^0$), і можливістю їх симетрування щодо вісі ординат.

Таблиця 2.3 - Відновлюючі маски

Індекс	Маска	Індекс	Маска	Індекс	Маска
0		7		14	
1		8		15	
2		9		16	
3		10		17	
4		11		18	
5		12			
6		13			

У табл. 2.3 прийняті наступні позначення:



- фон;



- контур;



- не має значення (контур чи фон) ;

- 2 - фон, але при збігу з маскою стає контуром;
- 3 - контур, але при збігу з маскою стає фоном;
- 4 - не має значення (контур чи фон), але при збігу з маскою стає фоном;
- 5 - не має значення (контур чи фон), але при збігу з маскою стає контуром.

Маски $\{\hat{Z}\}_{(0)-(9)}^{(40^0-4270^0)}$ застосовуються до скелетів наприкінці кожної ітерації, а після завершення стоншення контуру до отриманого скелету одноразово застосовуються маски $\{\hat{Z}\}_{(0)-(18)}^{(40^0-4270^0)}$.

При розробці масок $\{\hat{Z}\}_{(0)-(18)}^{(40^0-4270^0)}$ дотримувалися такі основні принципи:

– маски охоплюють усі можливі варіанти спотворень скелету базовим методом і класифіковані за групами спотворень на:

- маски $\{\hat{Z}\}_{(0)-(1)}$ виправлення пропусків точок; маски цієї групи заповнюють точками контуру ізольовані точки фону;
- маски $\{\hat{Z}\}_{(2)-(3)}$ виправлення вигинів ліній; маски цієї групи спрямляють кутоподібні випадки, що виникають внаслідок особливостей апроксимації примітивів контуру півтонами відповідно до алгоритмів Брезенхема;
- маски $\{\hat{Z}\}_{(4)-(5)}$ виправлення викривлень перетинів примітивів; заповнюють точками контуру ізольовані фонові точки перетинів вертикальних, горизонтальних і діагональних примітивів;
- маски $\{\hat{Z}\}_{(6)-(9)}$ виправлення спотворення кутів; маски цієї групи ліквідують потовщення ввігнутих кутів і регенерують відсікання вершин опуклих кутів скелету контуру;

○ маски $\{\hat{Z}\}_{(10)-(18)}$ виправлення ступінчастих перекручень, що виникають внаслідок застосування асиметричних масок стоншення базового методу скелетизації;

– конфігурації масок не мають порушувати локальні закономірності топології скелету контуру; так, наприклад, маски 14 і 15, що описують подібні ступінчасті викривлення скелету, продукують структурнорізні виправлені фрагменти скелету контуру (рис. 2.39), що відповідають топологічній спрямованості примітивів в апертурі зображення;

– область точок (з кодами 2 ... 5), що змінена маскою, апертури 5x5 має бути оточена сусідніми фоновими точками або незмінними точками контуру; це дозволяє уникнути порушень зв'язності скелету контуру при його модифікації масками.

На рис. 2.40, 2.41 показано приклад скелетизації контуру деталі «Гайка» (рис. 2.41, а) базовим методом із сильними спотвореннями скелету (рис. 2.41, б) і покращеним методом, де ці спотворення усунуто (рис. 2.41, в).

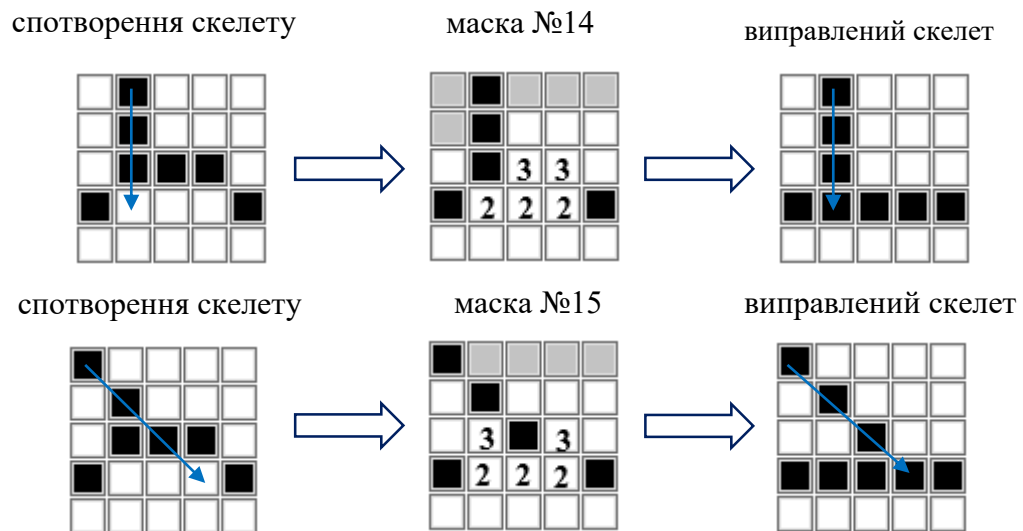


Рисунок 2.39 – Приклад залежності топології скелету контуру від конфігурації маски

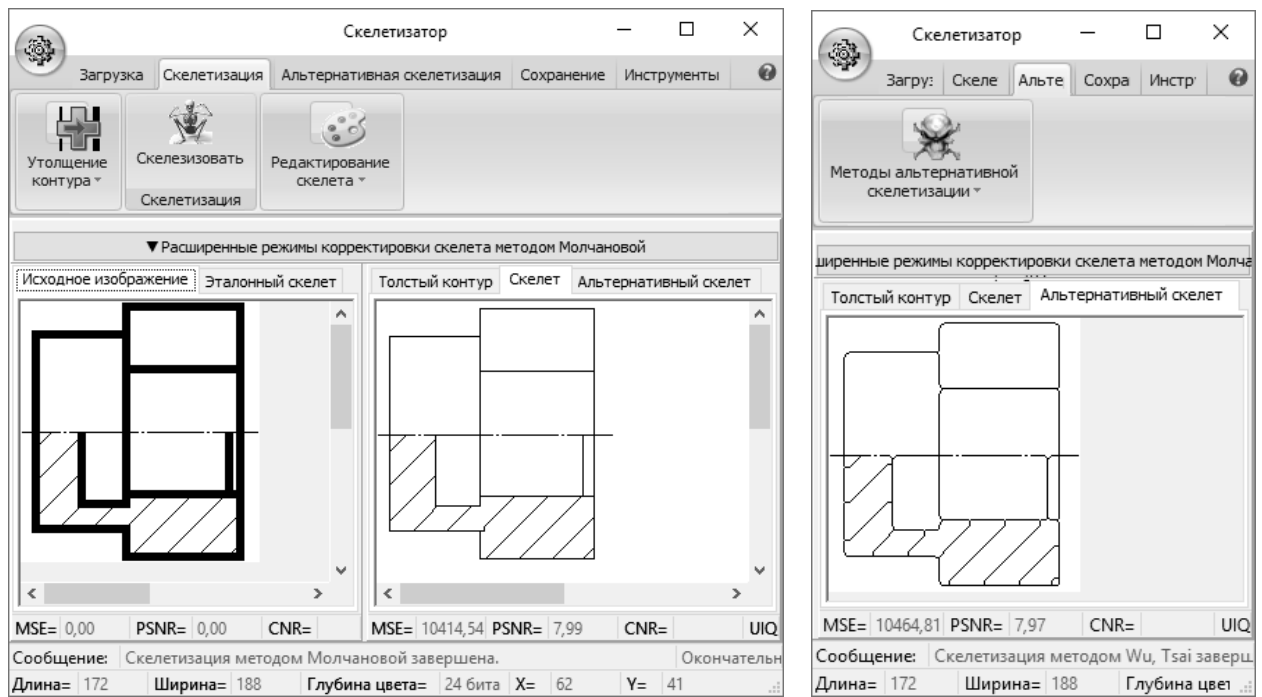


Рисунок 2.40 – Приклад коригування топології скелету

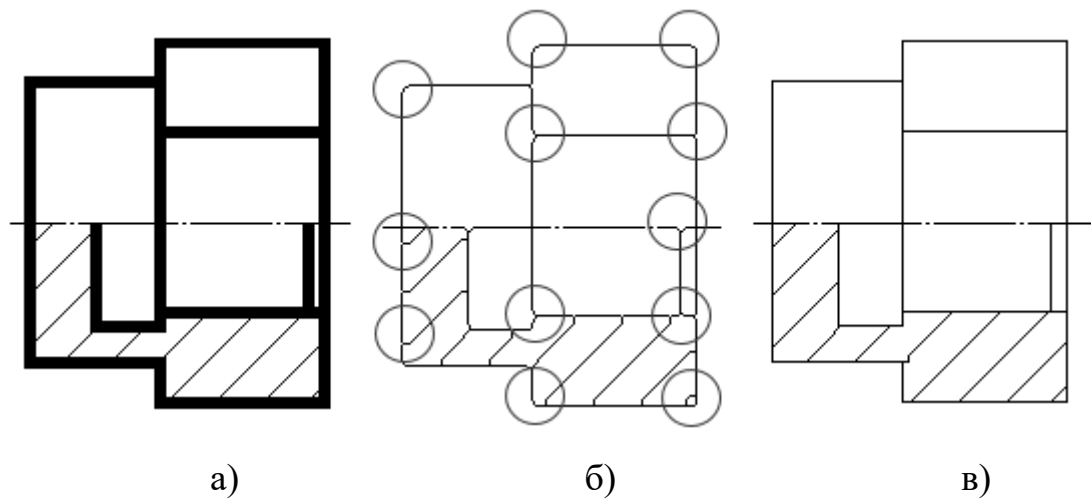


Рисунок 2.41 – Порівняльний результат коригування топології скелету:

- а) контур деталі, що стонщується;
- б) скелет, отриманий базовим методом;
- в) скелет, отриманий покращеним методом.

Аналіз результатів тестування запропонованого комплексу методів дво-етапного покращення скелету контуру деталі (розділ 4.4) підтвердив суттєве покращання якості продукуваних скелетів контурів деталей.

2.4 Висновки до розділу

1. Виходячи з особливостей задачі попередньої обробки кольорових напівтонових растрових зображень креслень деталей, встановлено, що метою задачі є гомотопне відображення:

- зашумленого зображення в його оригінал шляхом усунення шуму заміщення й адитивних спотворень;
- фільтрованого зображення у бінарне шляхом класифікації його точок на фонові й контурні з урахуванням варіації їх яскравості на різних видах носіїв;
- бінарного зображення у скелет шляхом ітераційного стоншення площадкового контуру з необхідним коригуванням викривлень скелету.

Узагальненим критерієм якості попередньої обробки доцільно обрати мінімальну відстань Хемінга між результуючим та неспотвореним зображеннями креслень деталей, а мірами цієї відстані - загальноприйняті уніфіковані показники якості: MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy. Загальним обмеженням задачі є необхідність збереження топологічних особливостей контуру деталі за кількістю, формою та зв'язністю геометричних примітивів.

2. Показано, що істотне підвищення розрізняюваності фрагментів зображень креслень деталей без втрати малорозмірних примітивів їх контурів досягається застосуванням розробленого гібридного комплексу методів за рахунок:

- ітеративного розмиття шуму σ -фільтром та подальшого зменшення інтенсивності послабленого шуму автоматичним контрастуванням зображення;

результат досягається за рахунок адаптивності параметрів σ -фільтру та рівня контрастності зображення до інтенсивності шуму;

- апертурної обробки зображення розрідженими ядрами фільтрів підвищення чіткості зображення із адаптацією виду та розміру ядра до рівня шуму; у результаті компенсуються спотворення малорозмірних примітивів;

- адаптивності методів комплексу: до виду спотворення - дією на різні групи спотворень різними методами, до інтенсивності шуму - ітеративною оптимізацією значень метрик: PSNR, CNR та SSIM, до розподілу шуму - ітеративним налаштуванням параметрів методів фільтрації.

3. Встановлено, що істотне підвищення якості бінаризації фільтрованого зображення креслення деталі досягається застосуванням розробленого двостадійного адаптивного методу, що передбачає оцінювання:

- глобальних порогів бінаризації на основі аналізу форм і співвідношення мод світла й тіні у гістограмах яскравості; це дозволяє врахувати глобальну яскравісну неоднорідність зображень креслень деталей;

- локальних адаптивних порогів бінаризації на основі аналізу балансу яскравості областей інтересу з квазі-бімодальними гістограмами; це дозволяє врахувати локальні особливості яскравості зображень креслень деталей з адаптацією до різних видів носіїв.

4. Показано, що суттєве підвищення розрізняюваності бінарних контурів деталей без втрати їх малорозмірних примітивів досягається застосуванням розробленого комплексу методів, у складі якого:

- метод контурних масок, що видаляє фонові конгломерати чорних точок за рахунок сепарації точок за формами утворених ними атомарних фігур;

- метод усунення контурних спотворень («бахроми»): чорної - навколо контуру деталі й білої - у контурі деталі на основі апертурної просторової фільтрації зображення деталі розробленими масками з асиметричними ядрами.

5. Встановлено, що суттєве зменшення структурних спотворень скелетів контурів деталей досягається застосуванням розробленого комплексу методів:

- метод коригування спотворення топології кутів скелету застосовує «шахову» метрику замість «манхетенської» та маски розпізнавання кутів контуру;

- метод коригування порушень зв'язності скелету застосовує розроблену корегуючу маску;

- метод коригування порушення топології скелету у точках перетину геометричних примітивів застосовує розроблені регенеруючі маски.

6. Аналіз результатів тестування розробленого комплексу методів попередньої обробки кольорових напівтонових растрових зображень креслень деталей підтвердив істотне покращення об'єктивних характеристик якості зображень деталей зі збереженням топологічних особливостей їх контурів.

РОЗДІЛ 3

КОМПЛЕКС МЕТОДІВ ВЕКТОРИЗАЦІЇ КОНТУРІВ ДЕТАЛЕЙ У РАСТРОВИХ БІНАРНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ КРЕСЛЕНЬ

Результатом попередньої обробки вихідного растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі є вільний від шуму бінарний растровий скелет контуру деталі, що являє собою композицію примітивів: відрізків прямих і дуг кривих другого порядку. Метою описаного у цьому розділі комплексу методів є растр-векторне перетворення, при якому результуючий векторний контур є композицією вектор-контурів геометричних примітивів зі збереженням їх топології та зв'язності.

3.1 Аналіз задачі векторизації контуру деталі

Нехай очищене від візуальних спотворень растрове бінарне зображення багатозв'язного контуру деталі представлено його скелетом $\vec{G}^{(S)}$ (див. розділ 2.3). Під геометричним примітивом (далі просто примітивом) будемо розуміти атомарний вектор-контур геометричної фігури, що формалізує примітиви: $\vec{L}$ - відрізок прямої, $\vec{D}$ - криву другого порядку: $\vec{C}$ - еліпс, $\vec{O}$ - окружність, $\angle \vec{C}$ - дугу еліпса, $\angle \vec{O}$ - дугу окружності (зауважимо, що примітиви окружність і дуга окружності є окремими випадками примітивів еліпс і дуга еліпсу). Точки $\{T\}$, що обмежують примітиви у місцях їх перетину або сполучення, назвемо «характеристичними точками». Тоді скелет можна задати ланцюговою композицією геометричних примітивів $\{\vec{N}\}$ з параметрами $\{P_{\vec{N}}\}$ на кінцевій хмарі растрових точок $\{g_{ij}\} \equiv \vec{G}^{(S)}$, а також відносинами порядку примітивів. До параметрів примітивів включено: t - тип примітиву, T_1 і T_2 - початкову і кінцеву характеристичні точки, T_C - центр еліпсу, T_{C1} , T_{C2} - фокуси еліпсу, R_{C1} , R_{C2} - радіуси еліпсу, α - кут нахилу більшого діаметра еліпсу до осі абсцис.

Таким чином, під векторизацією скелету $\vec{G}^{(S)}$ контуру деталі (далі просто скелету) будемо розуміти його гомотопне відображення $\vec{G}^{(S)} \Rightarrow \vec{V}$ у вектор-контур $\vec{V}$, - ланцюгову композицію ранжованої множини вектор-контурів $\{\vec{N}\}$ примітивів, що означені параметрами $\{P_{\vec{N}}\}$ і з'єднані у характеристичних точках $\{T\}$. Так, наприклад, скелет зовнішнього контуру деталі, що зображено на рис. 3.1, відображується у вектор-контур $\vec{V} = \{(T_1)\vec{L}_1 \Rightarrow (T_2) \dot{\vec{C}}_1 \Rightarrow (T_3)\vec{L}_2 \Rightarrow (T_4)\vec{L}_3 \Rightarrow (T_5)\vec{L}_4 \Rightarrow (T_6) \dot{\vec{C}}_2 \Rightarrow (T_7)\vec{L}_5 \Rightarrow (T_8) \dot{\vec{C}}_3 \Rightarrow (T_9)\vec{L}_6 \Rightarrow (T_{10})\vec{L}_7 \Rightarrow (T_1)\}$.

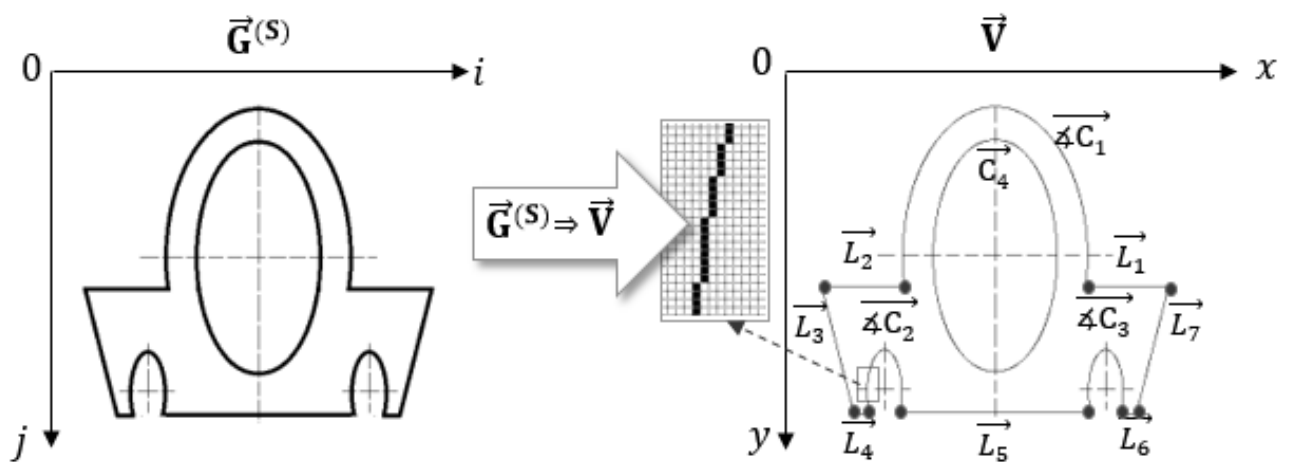


Рисунок 3.1 - Приклад векторизації скелету композицією примітивів

Вектор-контур $\vec{V}$ деталі зручно моделювати зорієнтованим графом $[\{T\}, \{\vec{N}\}]$ із вершинами $\{T\}$ і ребрами $\{\vec{N}\}$. Зауважимо, що, внаслідок растеризації, уявлення контуру деталі примітивами не однозначне; так, наприклад, дуга окружності з невеликим радіусом апроксимується 8-зв'язковим квадратом, а при великих радіусах вона локально-еквівалентна відрітку прямої (рис. 3.2). Тому, на граф $\vec{V}$ накладається обмеження: кожне його ребро має відповідати лише одному примітиву. Для цього граф має бути зваженим за допомогою вагової функції $f(\{P\}, \{\Psi_{\vec{N}}\}) \in [0; 1] : \{\vec{N}\}^{\{\vartheta_{\vec{N}}\}} \rightarrow \mathfrak{R}$ (тут $\{\Psi_{\vec{N}}\}$ - лінгвістичні правила ідентифікації $\{\vec{N}\}$, $\{\vartheta_{\vec{N}}\}$ - ваги ребер графу). При цьому більша вага ребра визначає найбільш

ймовірний тип примітиву, що формалізує фрагмент контуру між характеристичними точками (початковою і кінцевою) з найменшою похибкою ε . Графова модель дозволяє формалізувати контурний аналіз скелету (сегментуванням його на зв'язні растрові примітиви) і синтез його векторного образу $\vec{V}$ (конкатенацією вектор-контурів $\{\vec{N}^{\rightarrow}\}$ примітивів у точках $\{T\}$).

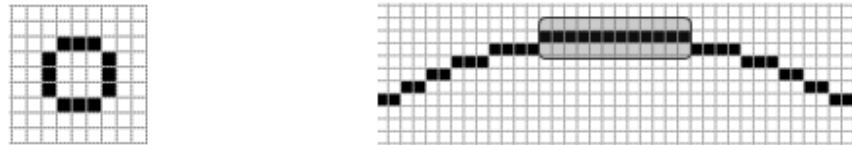


Рисунок 3.2 - Неоднозначність растрового уявлення контуру деталі примітивами

Розроблена модель векторизації $\vec{G}^{(S)} \xRightarrow{v} \vec{V}$ передбачає послідовне виконання (3.1 - 3.4):

– сегментації $\vec{G}^{(S)} \xRightarrow{sg} \{\{T\}, \{\vec{S}_k\}\}_K$ скелету шляхом розпізнавання характеристичних точок $\{T\}$ і виділення множини сегментів $\{\vec{S}_k\}_K$, таких, що $\vec{G}^{(S)} = \bigcup_{k=1}^K \vec{S}_k$.

– кодування за Фріменом [66] $\{\{T\}, \{\vec{S}_k\}\}_K \xRightarrow{fr} \{S_k\}_K$ сегментів $\{\vec{S}_k\}_K$ словами $\{S_k\}_K$.

– контурного аналізу $\{S_k\}_K \xRightarrow{\Omega} (\{\vec{N}\} \xRightarrow{p} \{P\})$ синтаксичним розбором слів $\{S_k\}_K$ із розпізнаванням $\{\vec{N}\}$ та їх параметризацією $\{P\}$.

– синтезу $(\{\vec{N}\}, \{P\}) \xRightarrow{vc} (\vec{V} = [T, \vec{N}])$ векторного образу $\vec{V}$ креслення деталі конкатенацією суміжних параметризованих примітивів $\{\vec{N}\}$ у характеристичних точках $\{T\}$ із подальшою його оптимізацією.

$$\vec{G}^{(S)} \xrightarrow{v} \vec{V} : \vec{G}^{(S)} \xrightarrow{sg} \left\{ \{T\}, \{\vec{S}_k\} \right\}_K \xrightarrow{fr} \{S_k\}_K \xrightarrow{\Omega} \left(\{\vec{N}\} \xrightarrow{p} \{P\} \right) \xrightarrow{vc} (\vec{V} = [T, \vec{N}]), \quad (3.1)$$

$$\{T\} = \{(T_1, T_n), (T_c, T_{c1}, T_{c2})\}, \quad \{\vec{N}\} = \{\vec{L}, \vec{D}\}, \quad \{\vec{D}\} = \{\vec{C}, \vec{O}, \pm\vec{C}, \pm\vec{O}\}, \quad (3.2)$$

$$\{P\} = \{t, T, R_{c1}, R_{c2}, \{\alpha\}_{0^0}^{360^0}\}, \quad (3.3)$$

$$\vec{V} = \bigcup_{k=1}^K [T, \vec{N}] \mid f(\{P\}, \{\Psi_{\vec{N}}\}) : \{\vec{N}\} \xrightarrow{\{\theta_{\vec{N}}\}} \mathfrak{R}, \rho(\vec{V}, \vec{G}^{(S)}) \rightarrow \varepsilon \rightarrow 0 \quad (3.4)$$

Узагальненим критерієм якості векторизації служить відстань Хемінгу $\rho(\vec{V}, \vec{G}^{(S)})$ (3.5) між візуалізованим векторним образом $\vec{V}$ і скелетом $\vec{G}^{(S)}$ контуру деталі [131, 132].

$$\rho(\vec{V}, \vec{G}^{(S)}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (v_{ij} \wedge g_{ij}^{(S)}), \quad (3.5)$$

В якості її міри виступають уніфіковані показники: MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy [82, 90, 119, 121], PCRE (додаток Г). Ці показники відповідають кількісній оцінці (2.35, 2.36) евклідової відстані між точками контурів деталі результуючого векторного образу деталі та її еталонного скелету.

У модель введені обмеження, що враховують графічні особливості розглянутої предметної області:

- примітивами контурів деталей можуть виступати: відрізок прямої, еліпс або його дуга, окружність або її дуга; відзначимо, що такий набір примітивів відповідає примітивам машинобудівельних креслень деталей;
- довжина примітивів може варіюватися у значних межах, але мінімальна довжина примітиву не може бути менше 3 точок (див. розділ 2.1);
- незв'язні примітиви (наприклад, штрихові і штрих-пунктирні лінії) представляються агрегатами відрізків прямих;

- примітиви можуть бути нахилені до осей координат під довільними кутами;
- примітиви можуть перетинатися і сполучатися довільним чином;
- дуги растрових кривих із великими радіусами кривизни у локальних областях креслення мало відрізняються від відрізків прямих; дуги растрових кривих з малими радіусами кривизни мало схожі на криві другого порядку;
- хоча зазвичай вважається, що контурна лінія несе у собі всю інформацію про форму примітиву, але для дуг другого порядку інформацію про форму несуть також центри дуг, фокуси, радіуси і піввісь, що не належать контуру;
- до комплексу методів векторизації растрових зображень креслень висувається базова вимога - необхідність збереження топологічних особливостей контурів деталей.

3.2 Комплекс методів векторизації скелетів контурів деталей

Враховуючи специфіку моделі вектор-контур деталі та її обмеження, розроблено оригінальний комплекс структурно-лінгвістичних методів векторизації топологічно-складних растрових контурів машинобудівельних креслень деталей. Методи комплексу дозволяють розпізнавати і параметризовувати топологію неідеально-промальованих примітивів контуру застосуванням сформульованих лінгвістичних правил, що описують не строгі співвідношення растрових елементів у примітиві, а тенденції зміни кодів Фрімену, характерні для примітивів із довільним кутом нахилу.

Комплекс методів векторизації містить:

- метод розпізнавання та кодування характеристичних точок скелету контуру деталі;
- метод формування зорієнтованого графу сегментів контуру деталі;
- метод кодування графу сегментів контуру деталі;

- методи розпізнавання і параметризації ребр графа типів «відрізок прямої», «еліпс» і «дуга еліпсу» з довільним кутом нахилу;
- метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру деталі;
- метод синтезу та оптимізації векторного образу контуру деталі на основі зорієнтованого зваженого графу примітивів.

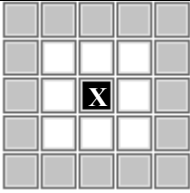
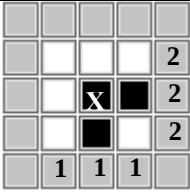
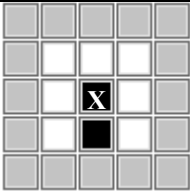
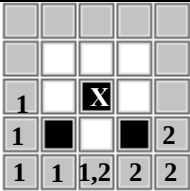
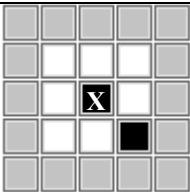
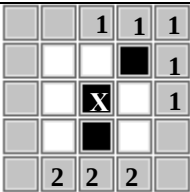
3.3 Метод розпізнавання і кодування характеристичних точок скелету контуру

Оскільки характеристична точка обмежує примітиви у місцях їх перетину або сполучення, то справедлива наступна аксіома: якщо точка контуру належить суміжним примітивам, то вона є характеристичною точкою. Отже, точки чорного кольору, у яких кількість сусідів (зв'язків) у «шаховій» метриці більше або дорівнює двом, можуть бути характеристичними. Окремими типами характеристичних точок є кінцеві точки примітиву з одним зв'язком й ізольовані точки з відсутніми зв'язками. Характеристичні точки параметризують вектор-контур суміжних сегментів скелету контуру координатами початкової та кінцевої точок, що у кінцевому результаті, надає можливість сформувати ранжовані за суміжністю ребра графа геометричних примітивів контуру.

Для розпізнавання характеристичних точок виконуються:

- однопрохідне сканування скелету спроектованими масками (табл. 3.1) з можливістю їх повороту на кут, кратний 490^0 , і симетрування щодо осі ординат;
- апертурний аналіз 8-околиць точок $\{g_{ij}\}_0^7 \in \vec{G}^{(S)}$, що надає інформацію про типи характеристичних точок.

Таблиця 3.1 - Маски і типи характеристичних точок

Індекс	Тип	Маска	Індекс	Тип	Маска
1	Ізольована (кількість зв'язків = 0)		4	Кутова (кількість зв'язків = 2)	
2	Кінцева (кількість зв'язків = 1)		5		
3			6		

У табл. 3.1 прийняті наступні позначки:

-  - контурна точка, що аналізується;
-  - фонова точка;
-  - контурна точка;
-  - контурна або фонова точка;
-  - хоча б одна з точок групи N, є контурною.

Точки контуру, що мають більше двох зв'язків можуть вважатися точками перетину примітивів тільки, якщо їх апертури не збігаються з масками, що наведені у табл. 3.2, з можливістю їх повороту на кут, кратний 490^0 , і симетрування щодо осі ординат. Маски спроектовано таким чином, щоб точки, що означені символом 'X', не могли належати більш ніж двом примітивам. Це необхідно, щоб уникнути помилкового впізнання точок, що мають більше двох

зв'язків і суміжні з характеристичною точкою, як точок перетину примітивів (рис. 3.3).

Таблиця 3.2 - Маски розпізнавання помилкових характеристичних точок

Індекс	Маска	Індекс	Маска	Індекс	Маска
1		2		3	

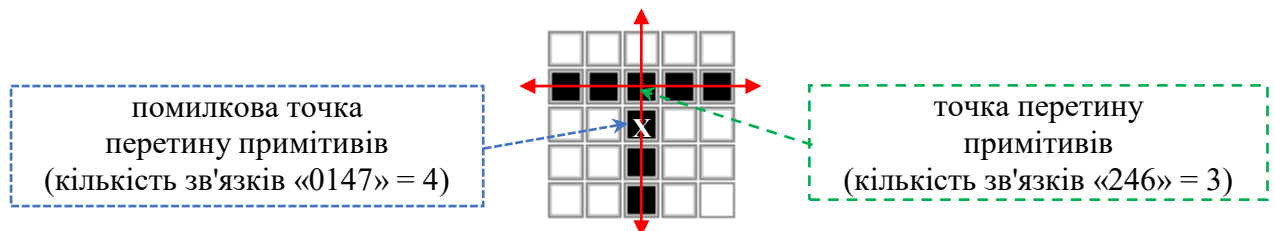


Рисунок 3.3 - Приклад помилкового впізнання точки як характеристичної

Розпізнані характеристичні точки скелету контуру кодуються структурою (рис. 3.4), що містить поля:

- порядковий номер характеристичної точки;
- тип характеристичної точки: 0 - ізолювана, 1 - кінцева, 2 - кутова, 3 - перетину;
- растрові координати характеристичної точки;
- напрямки зв'язків характеристичної точки в одиничній її 8-околиці з $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$;
- код зв'язності (рис. 5.5);
- кількість зв'язків.

Напрямки на зорієнтовані ребра графу пакуються у «код зв'язності» - ціле позитивне число з $[0; 255]$. Так, наприклад, у точки А (рис. 3.5) з 8-околицею $\{A_k\}_0^7$ код зв'язності = 138.

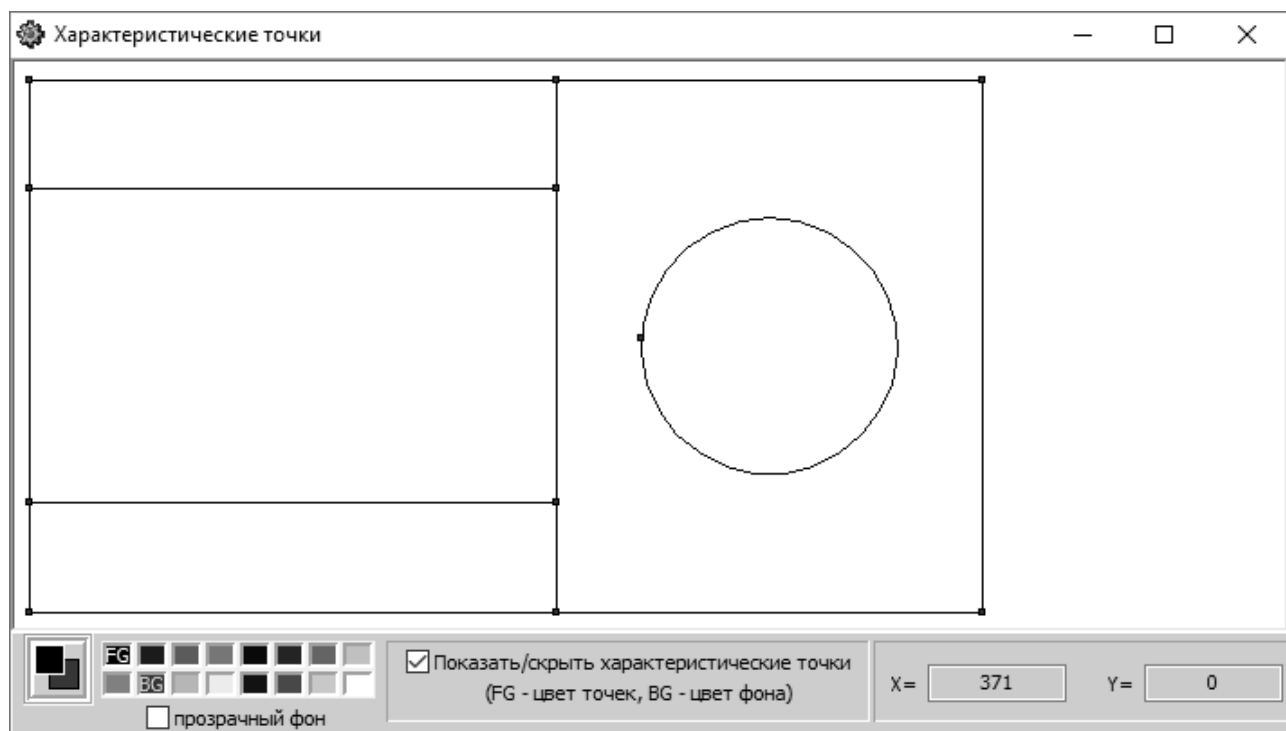
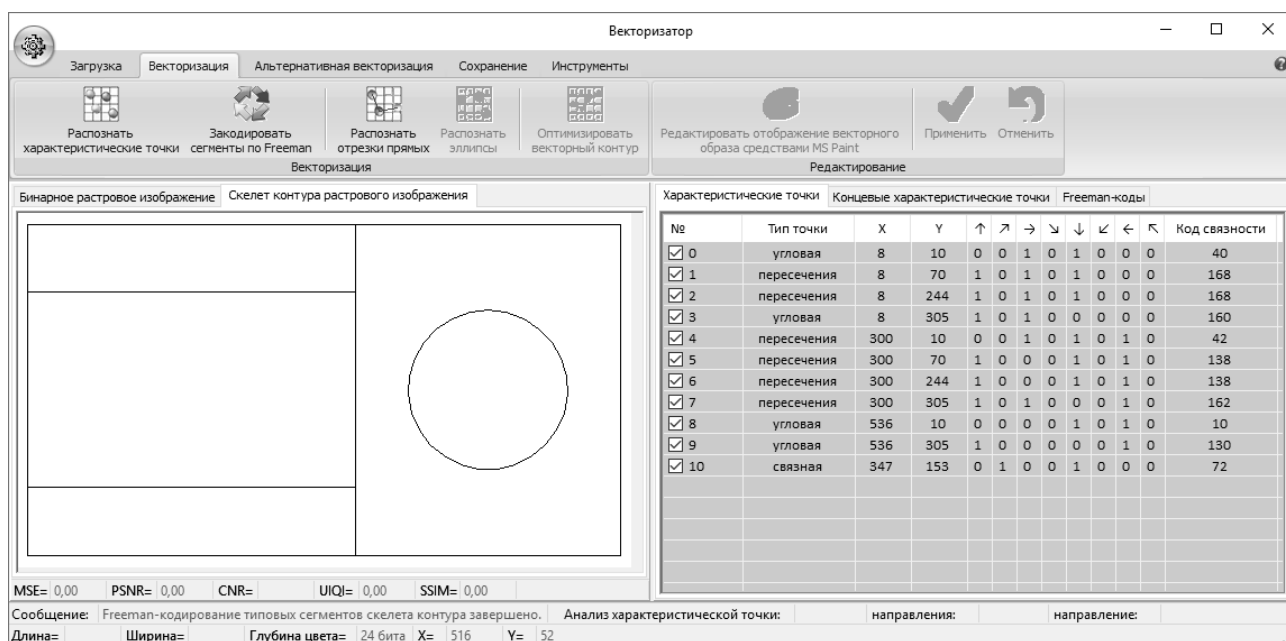


Рисунок 3.4 - Приклад розпізнавання і кодування характеристичних точок контуру деталі

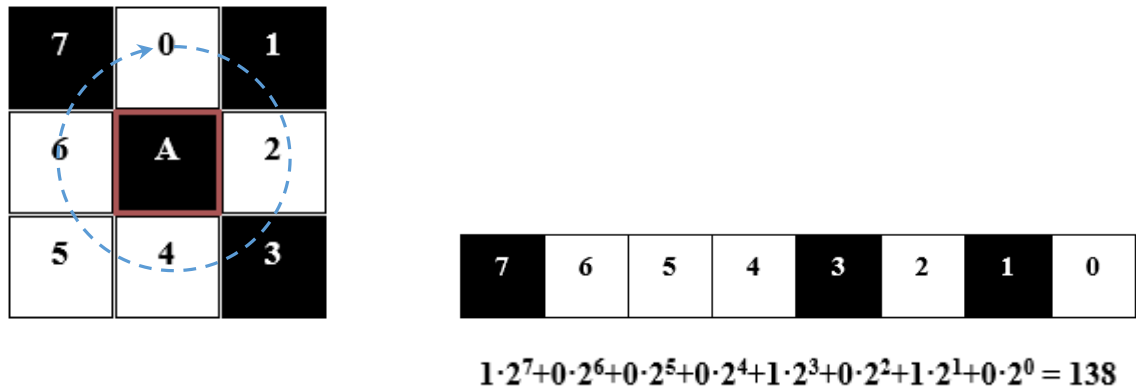


Рисунок 3.5 - Формування коду зв'язності характеристичної точки

Розпізнавання характеристичних точок замкнутих кривих (наприклад, кола) і сполучень примітивів (наприклад, відрізка прямої з дугою кола) за допомогою масок зв'язності недоцільне: достовірність його мала, оскільки вимагає попередньої типізації та параметризації примітивів. Цю проблема повністю розв'язано на етапі формування зорієнтованого графу сегментів контуру (розділ 3.2.2) і на етапі розпізнавання примітивів (розділ 3.2.6).

3.4 Метод формування зорієнтованого графу сегментів контуру

Як було відзначено у розділі 3.1, топологію скелету можна моделювати зорієнтованим графом із вершинами у характеристичних точках і ребрами, що являють собою геометричні примітиви. Розроблений метод формування зорієнтованого графу сегментів контуру передбачає сегментацію скелету контуру у характеристичних точках для подальшого розпізнавання геометричних примітивів у кожному сегменті на основі зважування ребр графу.

Сегментація скелету передбачає формування й аналіз множини відносин {«характеристична точка» ↔ «код зв'язності» ↔ «ребра графу»}. Сегментація скелету проводиться стиранням характеристичних точок разом з їх 8-околицями (рис. 3.6), після чого скануванням скелету знаходяться кінцеві точки

скелету (рис. 3.7), і за допомогою кодів зв'язності кінці сегментів відновлюються до початкового вигляду.

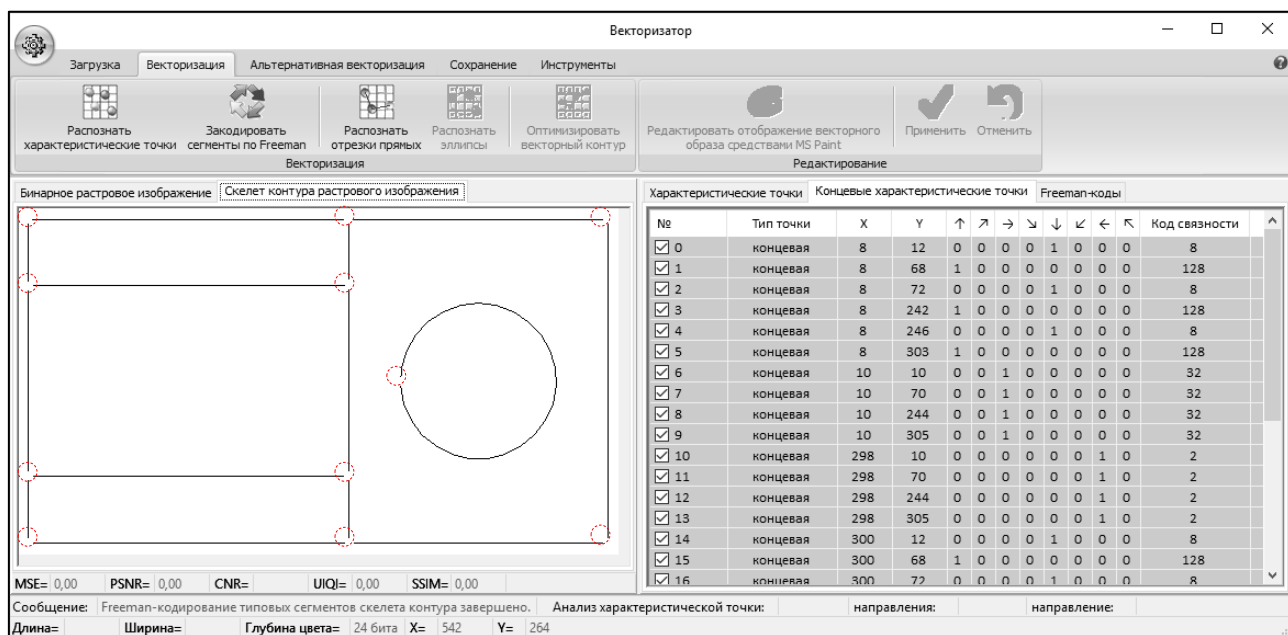


Рисунок 3.6 - Пример сегментации скелета

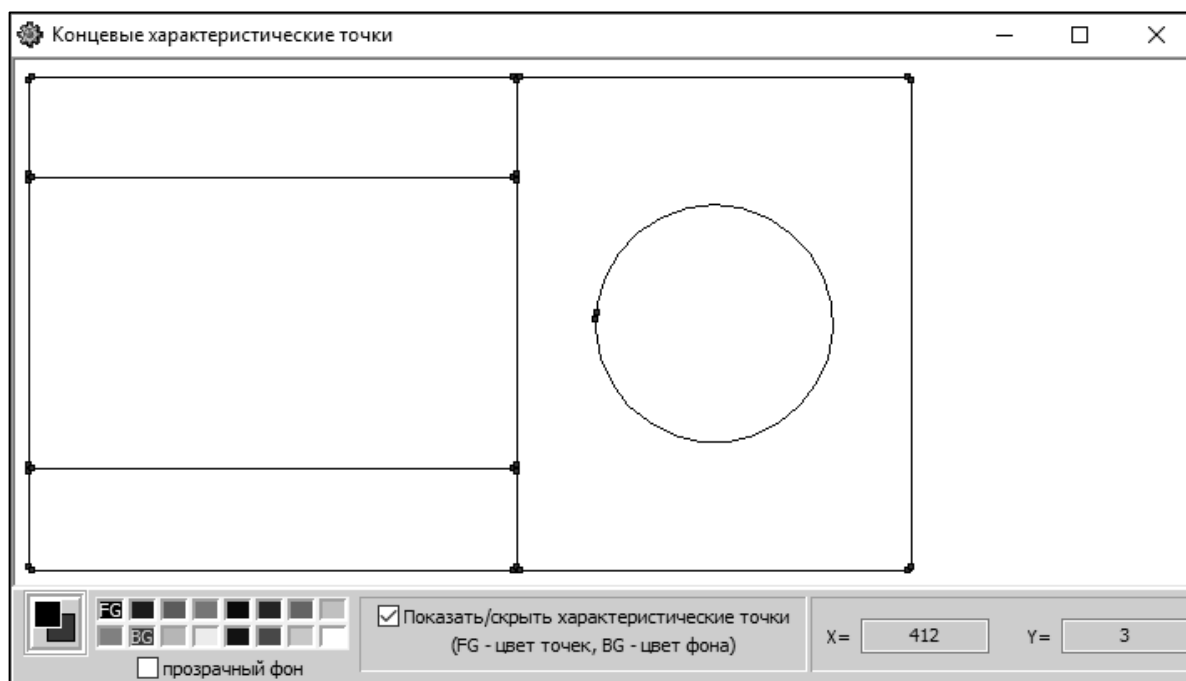


Рисунок 3.7 - Пример выделения конечных точек сегментов скелета

Таке відновлення необхідне аби не втратити топологічні особливості кінців примітивів контуру.

Тим самим скелет перетворюється на граф із вершинами у характеристичних точках, і ребрами, спрямованість яких зумовлена обраним напрямком обходу скелету.

Реконструкція скелету в «зонах розриву» по завершенні векторизації може бути виконана на основі аналізу розпізнаних примітивів і кодів їх зв'язності. Це дозволяє коректно об'єднувати сегменти в «зонах розриву» вибором пар сегментів із подібними параметрами примітивів, не сплутавши їх при цьому з близько розташованими ізольованими сегментами скелету.

3.5 Метод кодування графу сегментів контуру

Для виконання контурного аналізу скелету потрібен формальний опис, що адекватно відображує його топологію. Очевидним способом опису дискретного скелету є ланцюгове 8-зв'язне кодування за Фріменом [66], у процесі якого кожній поточній точці $(i, j)_q \in \vec{G}^{(S)}$ ставиться у відповідність одиничний вектор $\vec{v}_q \in [0; 7]$, спрямований з точки $(i, j)_q$ у наступну точку $(i, j)_{q+1}$. Ланцюговий Фрімен-код сегменту $\vec{S}_k$ з початковою $(T_1 = (i, j)_1)$ та кінцевою $(T_n = (i, j)_n)$ точками доцільно сформувати як слово $S_k = (i, j)_1 \vec{v}_0 \vec{v}_1 \dots \vec{v}_q \dots \vec{v}_n (i, j)_n$.

Обхід контуру сегмента $\vec{S}_k$ у запропонованому методі виконується вдосконаленим «методом жука» [18]:

1. Невдалий вибір напрямку огляду одиничної 8-околиці точки $((i, j)_q)$ може призвести до втрати точок скелету, неоднозначності його опису [66], і, у кінцевому рахунку, до втрати гомотопності растрового зображення і векторного образу креслення деталі. Розглянемо приклад одиничної околиці деякої точки (i, j) , в яку потрапляють точки з координатами $(i \pm 1, j \pm 1)$ (рис. 3.8).

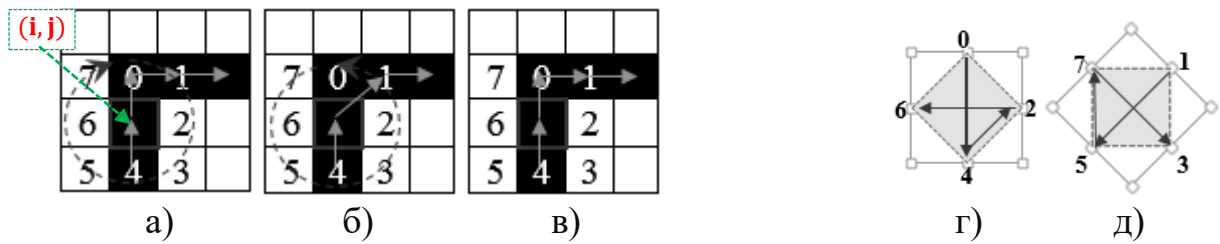


Рисунок 3.8 - Схема трасування фрагменту скелета у точці (i, j)

Якщо огляд околиці точки (i, j) виконано за годинниковою стрілкою (за схемою «0→1→...→6→7»), то точка (i, j-1) трасується (рис. 3.8, а), і код сегменту дорівнює «022», а проти годинникової стрілки (за схемою «0→7→...→2→1») – точка (i, j-1) - не трасується (рис. 3.8, б), і код сегменту дорівнює «13». Тому, пошук чергового напрямку у одиничній 8-околиці кожної точки скелету має виконуватися за запропонованою гібридною схемою напрямків: «0→4→2→6» → «1→5→7→3» (рис. 3.8, г, д), що зберігає топологію контуру. Друга частину цієї схеми (рис. 3.8, д) отримано з першої (рис. 3.8, г) поворотом на $\angle 45^\circ$, а це зберігає однозначність Фрімен-коду скелету у всіх варіантах взаєморозташування його точок [104] (рис. 3.8, в). Зауважимо також, що при звичайному Фрімен-кодуванні суттєвий вплив на код сегменту надає стартовий напрямок, а запропонована схема огляду околиці точки (i, j) дозволяє зберігати однозначність Фрімен-коду скелета при будь-яких стартових напрямках його обходу.

2. У запропонованому методі кодування графу примітивів огляд околиці кожної точки контуру (з метою пошуку шляху подальшого переміщення на контурі) починається не з напрямку «0», а з напрямку переміщення на попередній ітерації. Це доцільно, оскільки у зображеннях креслень деталей більша частина примітивів представлена лініями з постійним напрямком переміщення.

Структура Фрімен-коду сегментів контуру деталі включає у себе наступні поля (приклад показано на рис. 3.9):

- номери і растрові координати $(X, Y)_н$, $(X, Y)_к$ початкової та кінцевої характеристичних точок сегменту контуру деталі;
- Фрімен-код сегменту контуру деталі із зазначенням його довжини.

3.6 Метод розпізнавання і параметризації ребр графу типу «відрізок прямої»

Векторизація примітиву передбачає розпізнавання його типу і параметризацію - розрахунок геометричних характеристик, що дозволяють однозначно визначити примітив в евклідовій метриці.

Розроблений метод розпізнавання примітивів у сегментах $\{\vec{S}_k\}_K$ скелета контуру засновано на синтаксичному аналізі слів $\{S_k\}_K$ (S_k складається з символів $\{\vec{v}_q\}_Q \mid \vec{v}_q \in [0; 7]$ Фрімен-коду) з метою перевірки дотримання виявлених правил, характерних для примітивів; їх наявність у кодовому слові є необхідною умовою класифікації примітиву. При цьому вага ϑ_k ребра $\vec{N}_k$ графа контуру, що описується словом S_k , визначається відношенням $\vartheta_k = n_k^{(\text{true})} / n_k$ кількості $n_k^{(\text{true})}$ символів у кодовому слові, для яких правила виконуються, до довжини n_k слова. Внаслідок похибок растеризації креслення деталі, достатньою умовою інтерпретації кодового слова S_k як коду типизированного примітиву, є результат верифікації примітиву $\vec{N}_k$ на предмет задоволення геометричним властивостям типізованого примітиву.

Примітив «відрізок прямої» параметризується координатами $T_0 = (i, j)_0$ початку й $T_n = (i, j)_n$ кінця, а також кутовим коефіцієнтом $k = \text{tg} \angle \alpha = \Delta j / \Delta i = (j_n - j_0) / (i_n - i_0)$.

Нехай ланцюговий Фрімен-код деякого сегменту $\vec{S}_k$ ($k \in [1; n]$) скелета представленого непустим словом $S_k = \{\vec{v}_l\}_L$ ($L \neq 0, v_l \in \{0, \dots, 7\}$), що складається з символів (Фрімен-кодів) $\{\vec{v}_l\}_L$. Розпізнавання форми примітиву «відрізок прямої» у сегменті $\vec{S}_k$ зводиться до синтаксичного аналізу слова S_k для перевірки дотримання у ньому виявлених структурних закономірностей [104] (рис. 3.10).

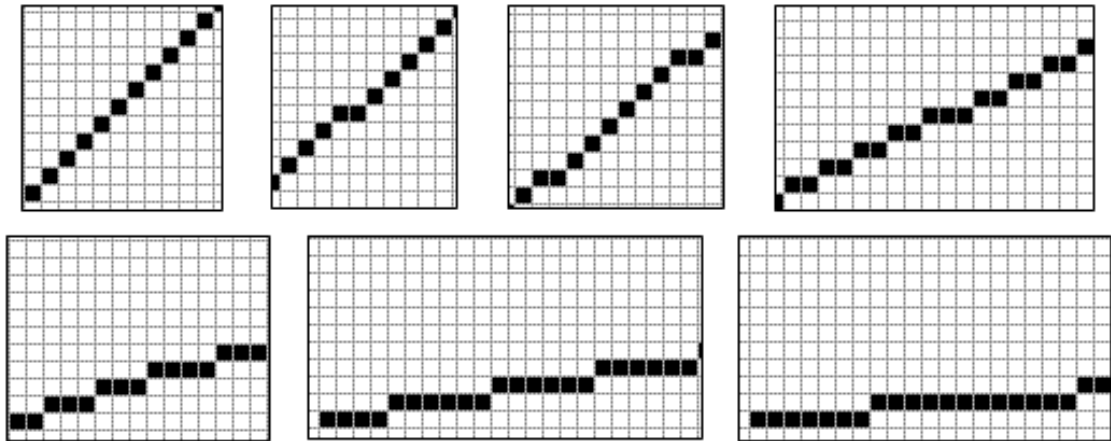


Рисунок 3.10 – Структурні закономірності форми примітиву «відрізок прямої»

На рисунку 3.10 представлена довільна вибірка відрізків прямих з кутом нахилу $\angle\alpha \in [0^\circ; 45^\circ]$, що відображує основні тенденції зміни кодів Фрімена у відповідності до їх структурних особливостей. Побудову відрізків прямих з $\angle\alpha \in (45^\circ; 360^\circ)$ може бути виконано симетруванням вихідних відрізків щодо координатних осей. Відзначимо, що будь-який відрізок прямої містить одиничний вектор $\vec{v}_q \in [0; 7]$, спрямований з точки $(i, j)_q$ у наступну точку $(i, j)_{q+1}$, який або не змінює свого напрямку протягом всього відрізка прямої, або змінює його на одну позицію, а при переході у наступну точку повертає свій початковий напрямок. Крім того, растрова пряма є періодичною; період визначається коефіцієнтом $k = \text{tg}\angle\alpha$ кута її нахилу [12].

На основі аналізу растрових зображень відрізків прямих для їх розпізнавання запропоновано такі структурно-лінгвістичні правила:

1) При $\vec{v}_q = \vec{v}_{q+1}$ відрізок прямої ($\vec{L}$) нахилено до осі абсцис під $\angle\alpha = \gamma \cdot 45^\circ$ (γ - кратність). У достовірності цієї закономірності можна переконатися, проаналізувавши ланцюгові Фрімен-коди прямих, що задані різними рівняннями:

– якщо $y = \pm x$, то ланцюговий Фрімен-код описує фрагмент діагоналі: «1111...» ($\angle\alpha = 45^\circ$), «3333...» ($\angle\alpha = 315^\circ$), «5555...» ($\angle\alpha = 225^\circ$), «7777...» ($\angle\alpha = 135^\circ$);

– якщо $x = \pm \text{const}$, то ланцюговий Фрімен-код описує фрагмент вертикалі: «0000 ...» ($\angle\alpha = 90^\circ$), «4444 ...» ($\angle\alpha = 270^\circ$);

– якщо $y = \pm \text{const}$, то ланцюговий Фрімен-код описує фрагмент горизонталі: «2222 ...» ($\angle\alpha = 0^\circ$), «6666 ...» ($\angle\alpha = 180^\circ$).

2) При $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| \leq 1$ або $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| = 7$ (причому при $\vec{v}_{q+1} \neq \vec{v}_q$ обов'язковим є дотримання $\vec{v}_q = \vec{v}_{q+2}$) $\vec{N}_k \equiv \vec{L}_k$ відрізок прямої нахилено до осі абсцис під довільним кутом $\angle\alpha \neq \gamma \cdot 45^\circ$ (γ - кратність). В іншому випадку вектори $\vec{v}_q$ і $\vec{v}_{q+1}$ утворюють трикутник і, згідно з алгоритмом Брезенхема растеризації відрізків [8], не належать одній прямій.

3) При $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| \leq 1$ символи S_k описують не більше двох сусідніх напрямків. Це правило відповідає алгоритму Брезенхему [8], згідно за яким для прямої з $\angle\alpha \in [0^\circ; 45^\circ]$ на кожній ітерації X збільшується на 1, а Y або залишається незмінним, або також збільшується на 1; це й відповідає не більше, ніж двом сусіднім напрямкам одиничних векторів Фрімена.

4) Дотримання $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| = 7$ можливе тільки для сусідніх напрямків $\vec{v}_q$ і $\vec{v}_{q\pm 1}$ з кодами «0» і «7». Це твердження є наслідком, що випливає з правила 2.

5) Якщо S_k описується двома векторами $\vec{v}_{q+1} \neq \vec{v}_q$, то один з них приймається за «основний», а другий - за «допоміжний». «Допоміжний» код напрямку обов'язково знаходиться між «основними» (іншими словами, два послідовних допоміжних коди напрямку одиничного вектора у примітиві «відрізок прямої» неприпустимі). Так, наприклад, у ланцюговому Фрімен-коді контуру на рис. 3.11 основним кодом є «2» (вправо), а допоміжним - «1» (вправо-вгору).

6) Якщо слово S_k довжиною n періодичне з довжиною періоду τ і кратністю m $|\vec{v}_{q+m\cdot\tau} - \vec{v}_q| = 0$, ($m = \text{const}$) $< n$, то $\vec{L}_k$ розташовано під $\angle\alpha$ до осі абсцис.

Оскільки безпосередній розрахунок періоду τ у слові S_k утруднений, то S_k фрагментується на частини однакової довжини (як показали експерименти, оптимальна довжина такої частини складає 20 символів), і всередині кожної частини визначається кількість основних і допоміжних кодів.

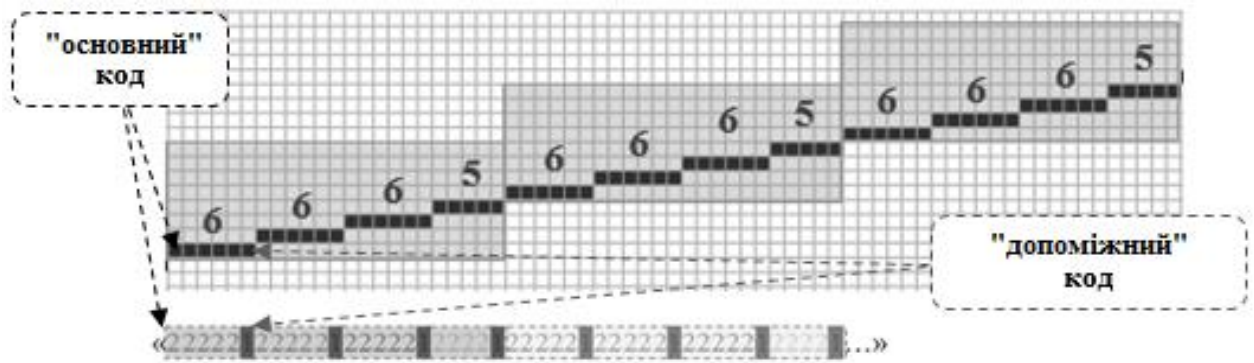


Рисунок 3.11 - Основні й допоміжні символи у слові, що описує примітив «відрізок прямої»

Враховуючи циклічний характер списку $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ значень Фрімен-кодів f в обраному напрямку обходу скелета (для циклічного списку довжиною 8 справедливо $f - n = f - n + 8$, при $0 \leq n \leq 8$), викладені вище правила розпізнавання відрізка прямої можна задати компактно (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 - Структурні закономірності примітиву «відрізок прямої»

Поточний код, v_q	Допустимий попередній код, v_{q-1}	Межні умови
f	$f - 1$	$[f + 1; f - 2] \notin S_k$
	f	$((f - 1)(f - 1) \notin S_k) \wedge ((f + 1)(f + 1) \notin S_k) \wedge ([f + 2; f - 2] \notin S_k)$
	$f + 1$	$[f + 2; f - 1] \notin S_k$

Параметризація відрізка прямої полягає у розрахунку координат $(i, j)_n$ його кінцевої точки і кутового коефіцієнту k відповідно до виразів (3.6).

$$\begin{cases} i_n = i_0 + \Delta i \mid \Delta i = |\vec{v}_1| + |\vec{v}_2| + |\vec{v}_3| - |\vec{v}_5| - |\vec{v}_6| - |\vec{v}_7|, \\ j_n = j_0 + \Delta j \mid \Delta j = |\vec{v}_3| + |\vec{v}_4| + |\vec{v}_5| - |\vec{v}_0| - |\vec{v}_1| - |\vec{v}_7|, \\ k = \Delta i / \Delta j, \end{cases} \quad (3.6)$$

де $\vec{v}_q$ - Фрімен-код з напрямком q у слові S_k ;

$|\vec{v}_q|$ – довжина вектору $\vec{v}_q$.

Достатньою умовою класифікації примітиву як відрізка прямої є перевірка (інакше верифікація) відповідності його точок абиякій геометричній властивості відрізка прямої. Наприклад: «для будь-якої точки відрізка прямої сума відстаней від будь-якої його точки $(i, j)_*$ до двох його кінців має дорівнювати довжині відрізка» (3.7)

$$\begin{aligned} \sqrt{(i_n - i_0)^2 + (j_n - j_0)^2} &= \sqrt{(i_* - i_0)^2 + (j_* - j_0)^2} + \\ &\sqrt{(i_* - i_n)^2 + (j_* - j_n)^2} \pm \varepsilon, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де ε – припустима похибка. Точки $(i, j)_*$, для яких співвідношення (3.7) не виконується, вважаються випадками. Найбільш характерна наявність випадів в околицях характеристичних точок перетину (з'єднання) примітивів, тобто на межі відрізка прямої. Внаслідок неточності растрування, похибок попередньої обробки растрового зображення креслення деталі і, як наслідок, невідповідності довжини сегменту природному періоду відрізка прямої, допускається деяка наперед задана похибка розпізнавання примітиву. Експериментально підтверджена коректність результатів розпізнавання відрізків прямих при допустимій частці випадів $\leq 5\%$ від кількості точок примітиву.

На рис. 3.12, 3.13 представлено приклад векторизації відрізків прямих скелету растрового зображення креслення деталі.

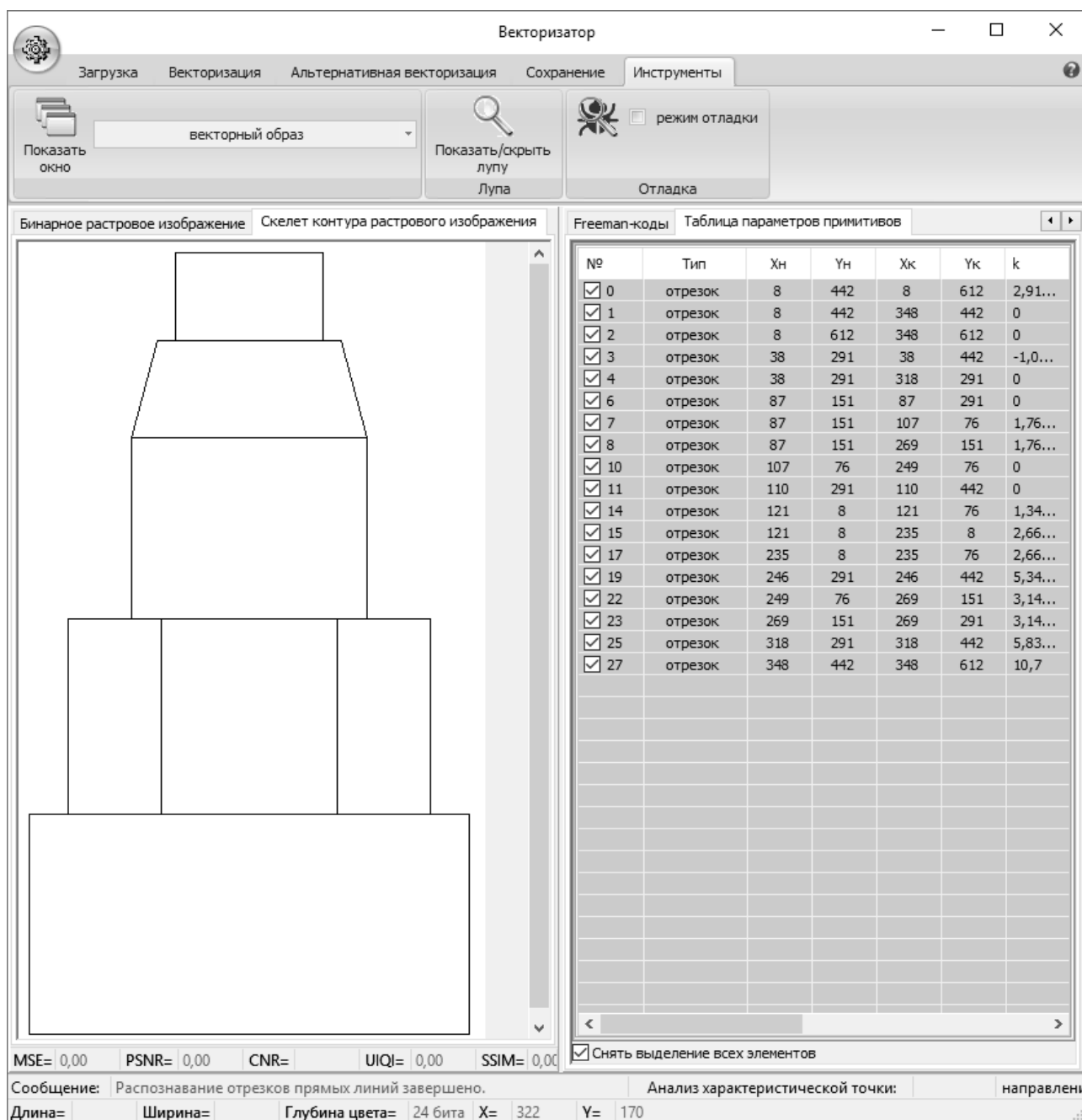


Рисунок 3.12 - Скелет растрового зображення креслення деталі і таблиця параметрів примітивів, що представляє його векторний образ

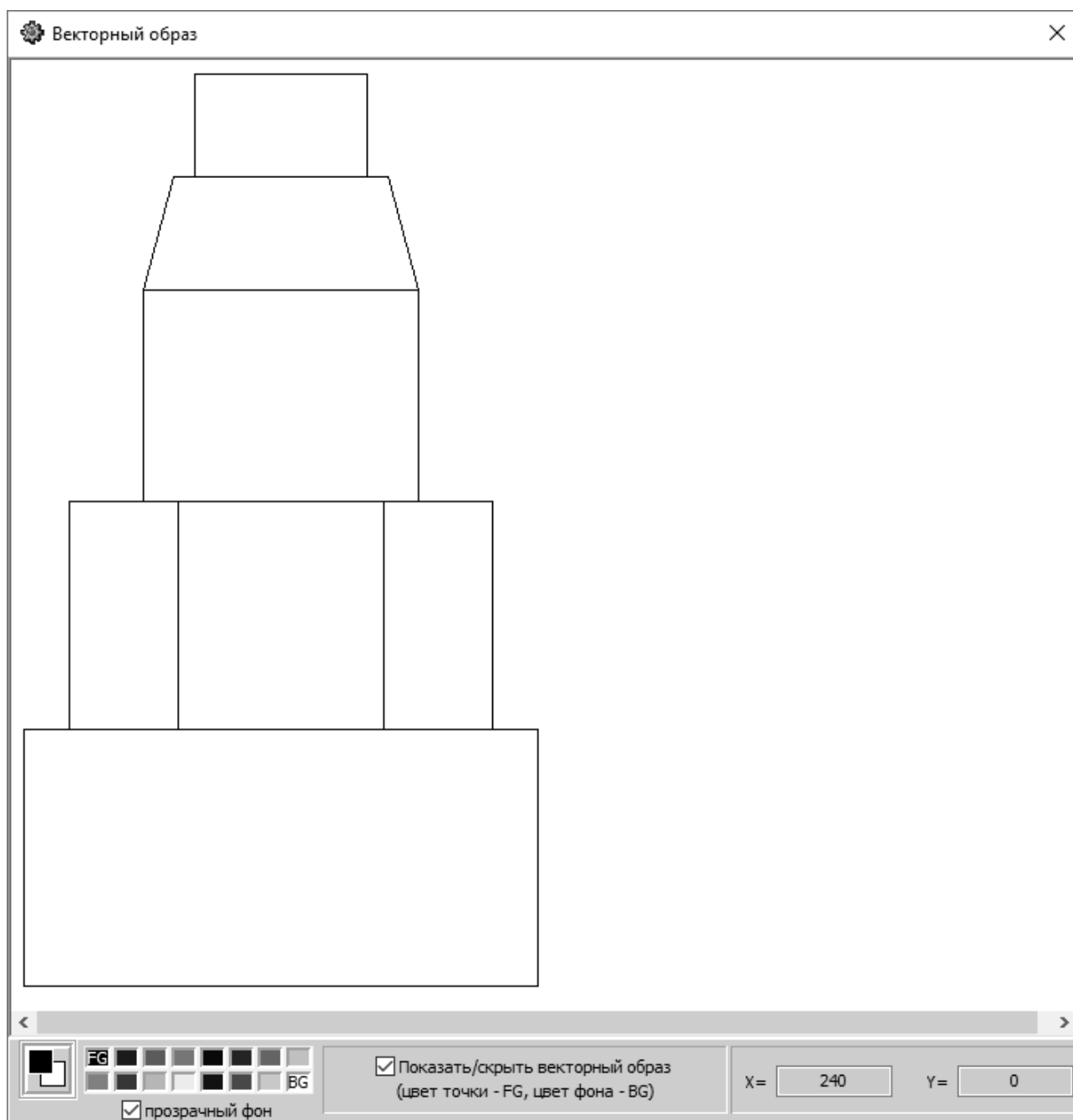


Рисунок 3.13– Результуюче векторне зображення креслення деталі

3.7 Метод розпізнавання і параметризації ребр графу типів «еліпс» і «дуга еліпсу» з довільним кутом нахилу

Еліпс параметризується: розмірами великої й малої осей, фокальною відстанню і кутовим коефіцієнтом нахилу до осі абсцис. Дуга еліпсу додатково параметризується координатами початку і кінця.

Нехай ланцюговий Фрімен-код деякого сегменту $\vec{S}_k$ ($k \in [1; n]$) скелету представлено непустим словом $S_k = \{\vec{v}_l\}_L$ ($L \neq 0, \vec{v}_l \in \{0, \dots, 7\}$), що складається з Фрімен-кодів напрямків $\{\vec{v}_l\}_L$. Розпізнавання форми примітиву «еліпс» у сегменті $\vec{S}_k$ зводиться до синтаксичного аналізу ланцюгового коду S_k з метою перевірки дотримання у ньому виявлених структурно-лінгвістичних закономірностей.

На основі аналізу растрових зображень еліпсів і їх дуг для розпізнавання примітивів запропоновано структурно-лінгвістичні правила:

1) Виходячи з того, що еліпс є замкнутою, центрально-симетричною фігурою, виявлено такі структурно-лінгвістичні закономірності:

- при $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| \leq 1$ або $|\vec{v}_{q+1} - \vec{v}_q| = 7$ два послідовних кода напрямку S кодують один або сусідні напрямки;
- при $|\vec{v}_{q+2} - \vec{v}_q| \leq 1$ або $|\vec{v}_{q+2} - \vec{v}_q| = 7$ у S_k неприпустимою є наявність двох послідовних монотонно зростаючих або спадаючих кодів напрямків за Фріменом; це є наслідком можливості апроксимації будь-якого невеликого фрагменту еліпса відрізком прямої (рис. 3.14), а для відрізка прямої співвідношення $|\vec{v}_{q+2} - \vec{v}_q| \leq 1$ виконується.

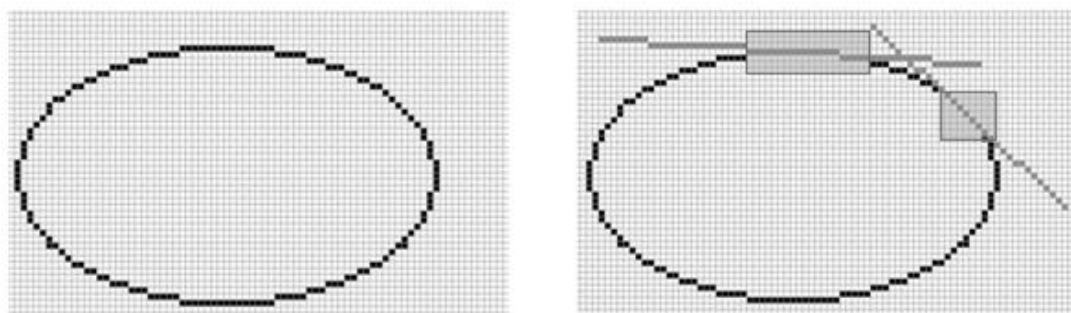


Рисунок 3.14 - Приклад апроксимації фрагментів еліпсу відрізками прямих

2) Якщо у підслові S_k дотримується $\vec{v}_{q+1} = \vec{v}_q$, то код $\vec{v}_q$ є провідним (рис. 3.15) (позначимо такий код як w_q). Це твердження є наслідком можливості апроксимації еліпсу множиною дрібних відрізків прямих, таких, що кут

нахилу до осі абсцис сусідніх відрізків відрізняється незначно; тому описи цих відрізків мають однаковий провідний код і розрізняються лише частотою появи допоміжного коду.

3) При будь-якому напрямку обходу $\vec{S}_k$ провідний код змінюється за розгою напрямків із кроком 1: $|w_{q-1} - w_q| = 1$; нехарактерні коди (випади) у S_k пояснюються похибкою растеризації примітива за Брезенхемом [8, 17].

4) Якщо кутовий коефіцієнт примітиву $k = 0$, то кількість m провідних кодів у коді S_k постійна і залежить лише від вибору початкової точки обходу: $m = 8 \forall |w_7 - w_0| \in \{1, 7\}$ і $m = 9 \forall w_8 = w_0$.

5) Внаслідок центральної симетрії еліпсу справедливо: $v_q = v_{q+4} \bmod 8$ (тут $\bmod$ - операція «залишок від ділення націло»).

6) Внаслідок замкнутості еліпсу для кодового слова, що описує еліпс справедливо: $||\vec{v}_n| - |\vec{v}_0|| \leq 1$ або $||\vec{v}_n| - |\vec{v}_0|| = 7$

Викладені вище правила розпізнавання еліпсів можна подати у компактному вигляді (табл. 3.4).

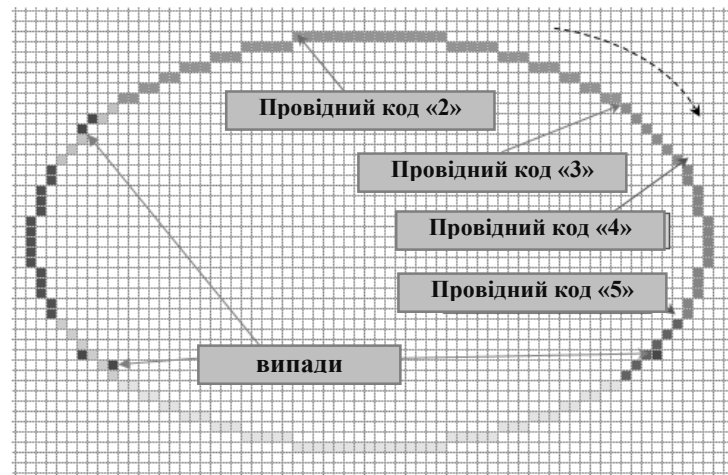


Рисунок 3.15 - Структурні закономірності примітиву «еліпс»

Таблиця 3.4 - Структурні закономірності примітиву «еліпс»

Поточний код, v_q	Допустимий попередній код, v_{q-1}	Провідний код, w_q	Межні умови	Дія
f	f - 1	-	підслово $(f + 1)(f)(f - 1) \notin S_k$	-
	f	f	-	-
		$\neg f$	$((w_q = f - 1) \wedge (w_q > w_{q-1})) \wedge ((w_q = f + 1) \wedge (w_q < w_{q-1}))$	$w_q = f$
	f + 1	-	підслово $(f - 1)(f)(f + 1) \notin S_k$	-

Правила параметризації еліпсу:

- 1) За кодом S_k сегменту $\vec{S}_k$ скелета розраховуються растрові координати його точок.
- 2) Відстані $\{d\}$ між усіма парами точок (A, B) сегменту $\vec{S}_k$ розраховуються за формулою (3.8).

$$d = \sqrt{(i_A - i_B)^2 + (j_A - j_B)^2}, \quad R_{C1} = 1/2 \cdot \max \{d\}. \quad (3.8)$$

Точки A і B, відстань між якими максимальна, визначають кінці ($T_1 = A, T_n = B$) і розмір R_{C1} більшого радіусу еліпса.

- 3) Коефіцієнти k і b рівняння прямої $j = k \cdot i + b$, що задає більшу вісь еліпсу, розраховуються відповідно до виразів (3.9).

$$k = (j_B - j_A) / (i_B - i_A), \quad b = j_A + k \cdot i_A. \quad (3.9)$$

- 4) Координати $(i, j)_C$ центру T_C еліпсу розраховуються за формулами (3.10).

$$i_C = (i_A + i_B) / 2, \quad j_C = (j_A + j_B) / 2 \quad (3.10)$$

5) Для розрахунку координат $(i, j)_{T_{C1}}$ і $(i, j)_{T_{C2}}$ фокусів еліпсу застосовується ітераційна процедура:

Крок 1. Нехай точки $(i, j)_{T_{C1}}^*$ і $(i, j)_{T_{C2}}^*$ (T_{C1} і T_{C2} симетричні щодо центру T_C еліпсу) є потенційними фокусами еліпсу.

Крок 2. Для кожної точки з $\{(i, j)_k\} \in \vec{S}_k$ розраховується сума відстаней від неї до потенційних фокусів за формулою (3.11)

$$\sqrt{(i - i_{T_{C1}}^*)^2 + (j - j_{T_{C1}}^*)^2} + \sqrt{(i - i_{T_{C2}}^*)^2 + (j - j_{T_{C2}}^*)^2} = 2 \cdot R_{C1} \pm \varepsilon \quad (3.11)$$

Крок 3. Якщо поточна точка (i, j) не задовольняє (3.11), то фокуси T_{C1} і T_{C2} зміщуються на 1 точку ближче до T_C і виконується перехід до кроку 1. В іншому випадку фокуси вважаються знайденими: $(i, j)_{T_{C1}} = (i, j)_{T_{C1}}^*$, $(i, j)_{T_{C2}} = (i, j)_{T_{C2}}^*$.

Якщо у результаті виконання цієї ітераційної процедури фокуси знайти не вдалося, то вважається, що слово S_k не описує еліпс.

Достатньою умовою класифікації примітиву як «еліпсу» є результат верифікації точок, що утворюють його контур, на відповідність геометричним властивостям еліпсу:

– довжина більшої осі дорівнює відстані між двома найбільш віддаленими одна від одної точками (i_{t1}, j_{t1}) і (i_{t2}, j_{t2}) еліпсу з похибкою ε (3.12).

$$2 \cdot R_{C1} = \max_{t1, t2 \in [1, n]} \{ \sqrt{(i_{t1} - i_{t2})^2 + (j_{t1} - j_{t2})^2} \} \pm \varepsilon, \quad (3.12)$$

– сума відстаней від будь-якої точки (i_t, j_t) еліпсу до його фокусів $F_1(i_{F1}, j_{F1})$ і $F_2(i_{F1}, j_{F1})$ постійна і дорівнює довжині більшої його осі з похибкою ε (3.13).

$$\sqrt{(i_t - i)^2 + (j_t - j_{F1})^2} + \sqrt{(i_t - i_{F2})^2 + (j_t - j_{F2})^2} = 2a \pm \varepsilon, \quad (3.13)$$

Точки $(i, j)_*$, для яких співвідношення (3.13) не виконується, вважаються випадками. Внаслідок неточності растровання, похибок попередньої обробки растрового зображення креслення деталі допускається деяка наперед задана похибка розпізнавання примітиву. Експериментально підтверджена коректність результатів розпізнавання еліпсів і окружностей при допустимій долі випадів меншій 5% від кількості точок примітиву.

Крок 4. Розраховується менший радіус R_{C2} еліпсу за формулою (3.14).

$$R_{C2} = \sqrt{(2 \cdot R_{C1})^2 - ((i_{T_{C1}} - i_{T_{C2}})^2 + (j_{T_{C1}} - j_{T_{C2}})^2)} \quad (3.14)$$

Описаний вище метод векторизації примітиву «еліпс» заснований на розрахунку параметрів осей еліпсу і може бути застосований для примітиву «дуга еліпсу», що охоплює більшу ось (рис. 3.16, а). Відзначимо, що дуга може й не дозволяти отримувати явну інформацію про більшу ось еліпсу (рис. 3.16, б). Однак, оскільки еліпс симетричний щодо центру і осей, то інформації про форму однієї його чверті достатньо для реконструкції інших його частин симетруванням. Тому, задача векторизації такої дуги еліпсу у сегменті $\vec{S}_k$ зводиться до задачі векторизації еліпсу і передбачає: пошук у сегменті $\vec{S}_k$ точки перетину дуги еліпсу з півосями і формування слова S_k , що описує еліпс.

Розглянемо, наприклад, порядок розпізнавання дуги еліпсу (рис. 3.16, а, б), у якого для наочності напрямки осей збігаються з напрямками осей координат (рис. 3.17).

У слові S_k , що описує сегмент, визначається максимальна за тривалістю послідовність $L_{\max}^{(2)}$ Фрімен-кодів «2» (вправо) ($L_{\max}^{(2)}=16$ на рис. 3.17) і $L_{\max}^{(6)}$ Фрімен-кодів «6» (вліво) ($L_{\max}^{(6)} = 14$ на рис. 3.17); нехай така послідовність починається з позиції n_1 і закінчується у позиції k_1 .

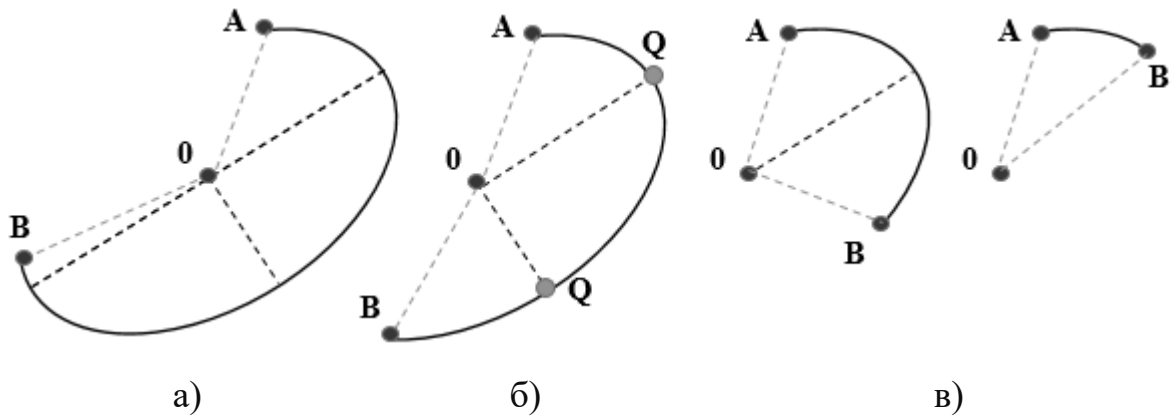


Рисунок 3.16 - Дуги еліпсу:

- а) дуга еліпсу, що охоплює більшу ось (дві чверті);
- б) дуга еліпсу, що охоплює дві піввісі (одна чверть);
- в) дуги еліпсу: що охоплює одну піввісь і що не охоплює піввісь.

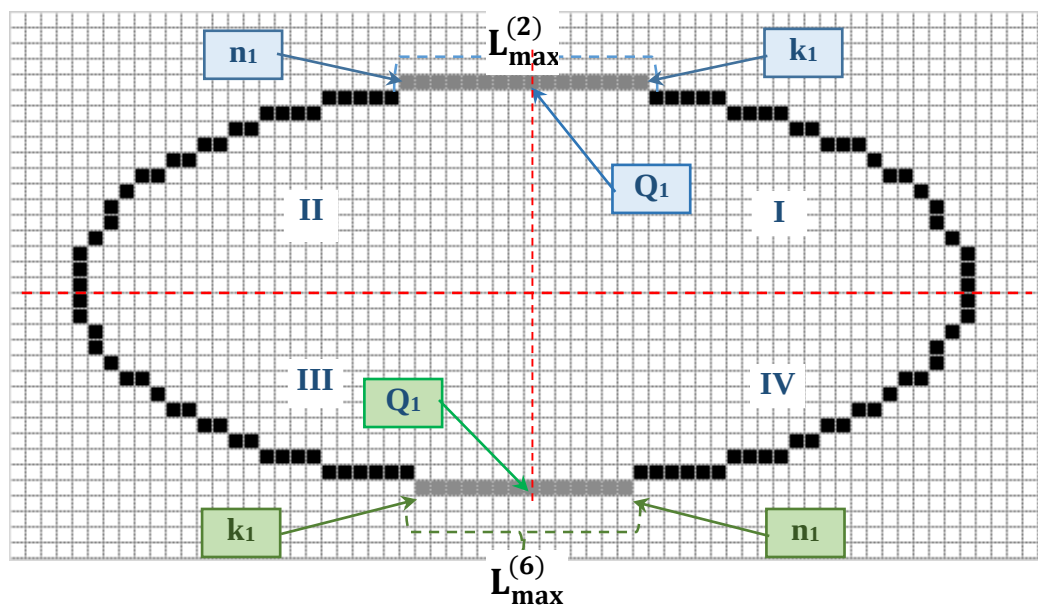


Рисунок 3.17 - Розпізнавання дуги еліпсу

Далі за формулою $s_1 = (n_1 + k_1) / 2$ розраховується індекс точки $Q_1 = (i, j)_1$ перетину з меншою віссю як середина підслова, утвореного максимальною за тривалістю послідовністю $L_{\max}^{(2)}$ і $L_{\max}^{(6)}$, і розраховуються координати точки Q_1 , що відповідають Фрімен-коду з індексом s_1 . Аналогічним чином для Фрімен-

кодів «0» (вгору) і «4» (вниз) визначається точка $Q_2 = (i, j)_2$ перетину з більшою віссю. Підслово, що обмежене індексами s_1 і s_2 , описує чверть еліпса.

Верифікація отриманих результатів полягає у перевірці кількості взаємно-різних Фрімен-кодів, що потрапили у дане підслово (для еліпсу вона дорівнює 3). Крім того, ці Фрімен-коди мають розташовуватися у Фрімен-кодів скелету послідовно, згідно з «розою напрямків».

Далі визначається чверть еліпсу, у якій розташована дана частина дуги еліпсу. У табл. 3.5 наведено: Фрімен-коди, що відповідають кожній чверті, напрямком обходу і спосіб реконструкції частини еліпсу з інших його частин (символ « $\leftrightarrow$ » означає операцію дзеркального відображення слова, що кодує дугу еліпсу у чверті).

Таблиця 3.5 - Правила реконструкції коду примітива «еліпс»

Чверть	Напрямок обходу							
	за годинниковою стрілкою				проти годинникової стрілки			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I	2, 3, 4	$\leftrightarrow$ 6 $\rightarrow$ 2 5 $\rightarrow$ 3	6 $\rightarrow$ 2, 7 $\rightarrow$ 3, 0 $\rightarrow$ 4	$\leftrightarrow$ 0 $\rightarrow$ 4, 1 $\rightarrow$ 3	0, 7, 6	$\leftrightarrow$ 2 $\rightarrow$ 6, 1 $\rightarrow$ 7	2 $\rightarrow$ 6, 3 $\rightarrow$ 7, 4 $\rightarrow$ 0	$\leftrightarrow$ 4 $\rightarrow$ 0, 5 $\rightarrow$ 7
II	$\leftrightarrow$ 2 $\rightarrow$ 6, 3 $\rightarrow$ 5	$\leftrightarrow$ 4,5,6	0 $\rightarrow$ 4, 7 $\rightarrow$ 5	0 $\rightarrow$ 4, 1 $\rightarrow$ 5, 2 $\rightarrow$ 6	$\leftrightarrow$ 6 $\rightarrow$ 2, 7 $\rightarrow$ 1	2, 1, 0	$\leftrightarrow$ 4 $\rightarrow$ 0, 3 $\rightarrow$ 1	4 $\rightarrow$ 0, 5 $\rightarrow$ 1, 6 $\rightarrow$ 2
III	2 $\rightarrow$ 6, 3 $\rightarrow$ 7, 4 $\rightarrow$ 0	$\leftrightarrow$ 4 $\rightarrow$ 0, 5 $\rightarrow$ 7	6, 7, 0	$\leftrightarrow$ 2 $\rightarrow$ 6, 1 $\rightarrow$ 7	6 $\rightarrow$ 2, 7 $\rightarrow$ 3, 0 $\rightarrow$ 4	$\leftrightarrow$ 0 $\rightarrow$ 4, 1 $\rightarrow$ 3	4, 3, 2	$\leftrightarrow$ 6 $\rightarrow$ 2, 5 $\rightarrow$ 3
IV	$\leftrightarrow$ 4 $\rightarrow$ 0, 3 $\rightarrow$ 1	4 $\rightarrow$ 0, 5 $\rightarrow$ 1, 6 $\rightarrow$ 2	$\leftrightarrow$ 6 $\rightarrow$ 2, 7 $\rightarrow$ 1	0, 1, 2	$\leftrightarrow$ 0 $\rightarrow$ 4, 7 $\rightarrow$ 5	0 $\rightarrow$ 4, 1 $\rightarrow$ 5, 2 $\rightarrow$ 6	$\leftrightarrow$ 2 $\rightarrow$ 6, 3 $\rightarrow$ 5	6, 5, 4

У стовпчиках табл. 3.5 позначені чверті еліпсу, Фрімен-код яких відомий повністю, а у рядках - спосіб реконструкції частини Фрімен-коду еліпсу з існуючого Фрімен-коду.

Подальші дії зводяться до реконструкції Фрімен-коду повного еліпсу за існуючим Фрімен-кодом його чверті, розпізнаванню отриманого Фрімен-коду як еліпсу (використовуючи вищеописаний метод розпізнавання примітива

«еліпс») і верифікації дуги еліпсу (при цьому, на відміну від повного еліпсу, використовуються лише точки, що належать цій дузі).

Винятком у даній ситуації є випадок, коли дуга охоплює $\frac{1}{4}$ частину еліпсу, але кінці дуги А і В не знаходяться на початку (кінці) горизонтального (вертикального) фрагментів із максимальною за тривалістю послідовністю $L_{\max}^{(2)}$ і $L_{\max}^{(6)}$ (рис. 3.18).

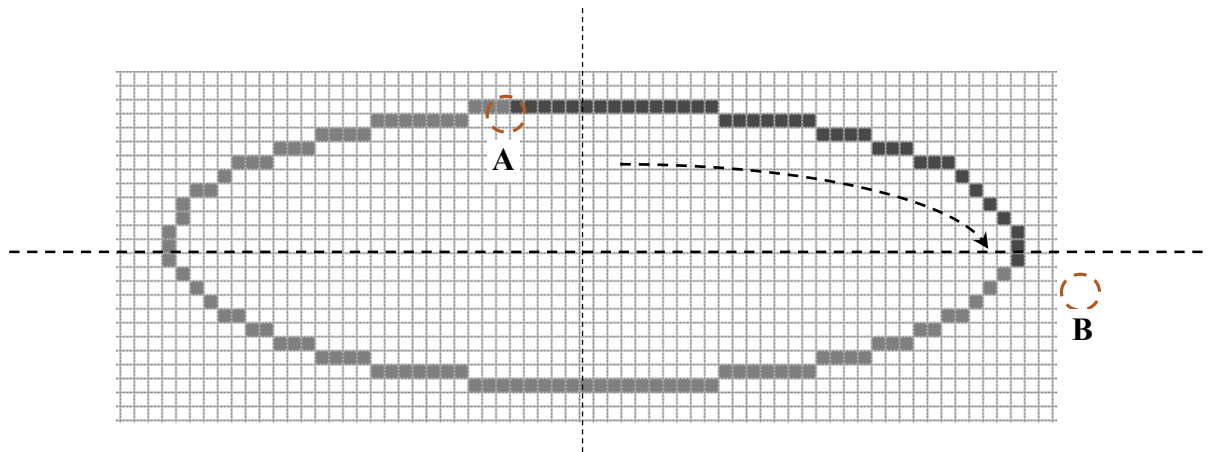


Рисунок 3.18 - Окремий випадок дуги еліпсу

Така ситуація може виникнути, якщо першим символом у Фрімен-коді кривої є коди $\{0, 2, 4, 6\}$. У такому випадку необхідно виконати глибокий лінгвістичний аналіз слова, що описує примітив. Для цього визначається розташування $P^{(L)}$ у слові максимальної за довжиною послідовності $L_{\max}^{(0|2|4|6)}$, відповідно до правил:

- при $P^{(L)} = 1$ перший Фрімен-код у слові опису примітива належить чверті ймовірного еліпсу;
- при $P^{(L)} > 2$ перший Фрімен-код у слові опису примітива не належить чверті ймовірного еліпсу;
- при $P^{(L)} = 2$ перевіряються Фрімен-коди попередньої і наступної послідовностей; якщо вони ідентичні, то перший Фрімен-код у слові опису належить чверті ймовірного еліпсу.

Подальші дії зводяться до розрахунку координат центру еліпса раніше описаним способом і побудови інших чвертей ймовірного еліпсу. Якщо отримана фігура не розпізнається як еліпс, то у початок слова додається символ з $\{0,$

2, 4, 6}, і вищеописані дії повторюються доки створена фігура або буде визначена як еліпс, або буде перевищено допустимий ліміт операцій додавання Фрімен -коду до початку слова опису сегмента, який становить $L_{\max}^{(0|2|4|6)}$.

Запропонований метод дозволяє розпізнавати дуги, що охоплюють більшу ось еліпсів із довільним кутом нахилу до осі абсцис, а також дуги, що охоплюють більшу і меншу піввісь еліпсів з осями, що паралельні координатним осям.

На рис. 3.19 представлено приклад векторизації еліпсів та їх дуг у скелеті растрового зображення креслення деталі, в якому, крім контурних точок примітивів, розпізнані та параметризовані центри і діаметри еліпсів та дуг еліпсів.

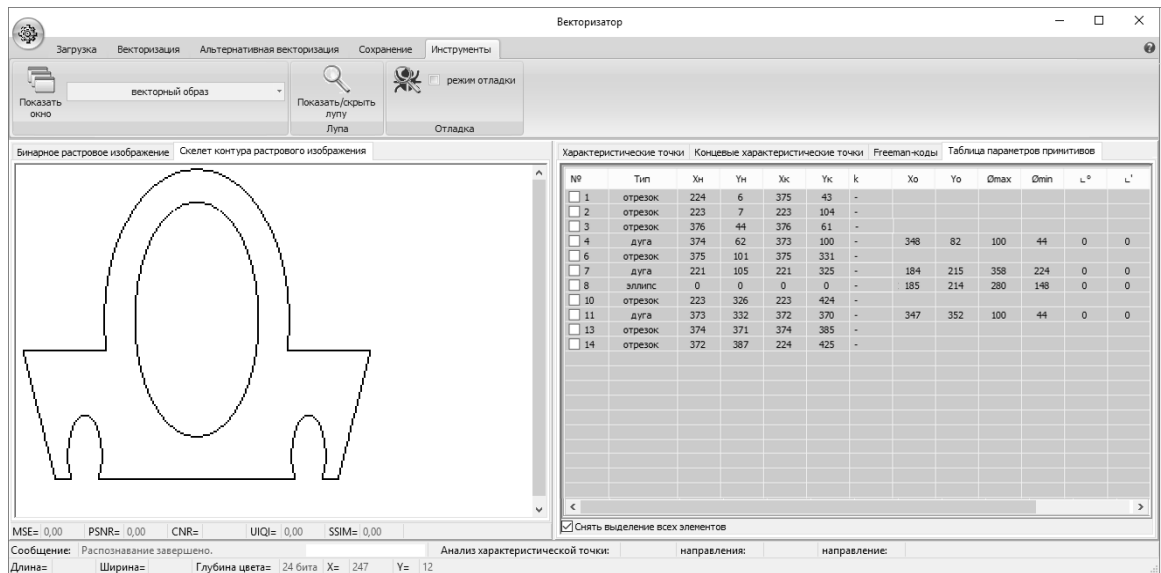


Рисунок 3.19 - Скелет растрового зображення креслення деталі і таблиця параметрів примітивів, що представляє його векторний образ

Теоретично розпізнання кривих другого порядку, що не відповідають вищеописаним умовам, наприклад, малих дуг еліпсів (рис. 3.16, в), може бути виконано на основі методу алгебраїчних кривих [70]; він передбачає розв'язання методом найменших квадратів перевизначеної системи алгебраїчних рівнянь, що описують криву другого порядку за кількома її точками. Однак, код будь-якої кривої, що не відповідає формі еліпсу, завжди можна фрагментувати на

малі рівні частки, які будуть розпізнані як відрізки прямих. Тим самим крива апроксимується полілінією (ламаною) - послідовністю відрізків прямих, що з'єднані між собою у точках фрагментації. Мінімальна довжина сегмента ламаної при цьому становить 20 точок, що пояснюється специфікою методу впізнання від-різка прямої за її Фрімен-кодом.

Окремим випадком еліпсу є окружність; при цьому $R_0 = R_{C1} = R_{C2}$, а параметр k не враховується. Сегмент $\vec{S}_k$ може бути віднесено до типу «окружність», якщо він успішно пройшов перевірку на належність класу «еліпс» і $R_{C1} = R_{C2} \pm \varepsilon$.

3.8 Метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру

Виділений сегмент (див. розділ 3.2.2) може являти собою один примітив або ланцюгову композицію примітивів (рис. 3.20).

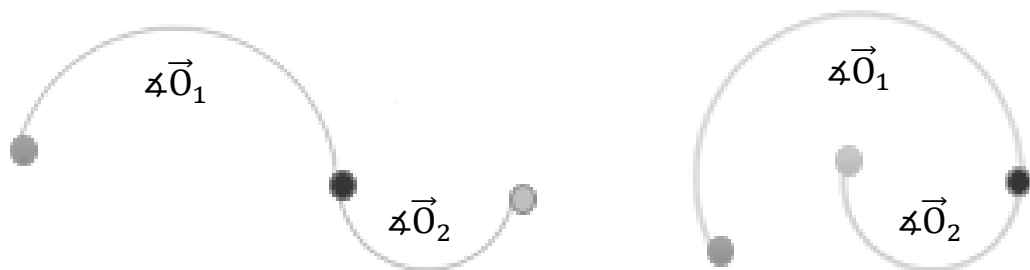


Рисунок 3.20 - Приклади композицій примітивів у сегменті

У цьому випадку слово S_k коду композитного сегменту є композицією множини підслів $\{S_k\}_K$, кожне з яких, у свою чергу, описує примітив або композицію примітивів.

Позиції підслів у конкатенації $\{S_k\}_K$ можна визначити рекурсивним бісекціонуванням слова S_k з подальшим синтаксичним аналізом кожної його поло-

вини (схематично приклад процесу декомпозиції слова S_k , що описує деякий композитний сегмент, представлено на рис. 3.21).

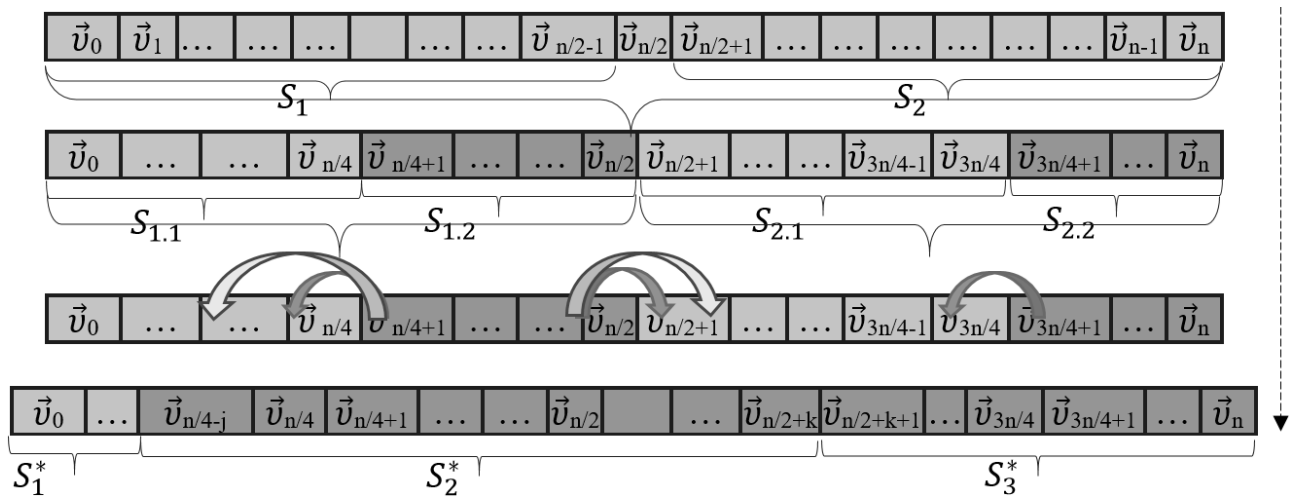


Рисунок 3.21 - Приклад рекурсивного бісекціонування слова S_k

При цьому задається мінімальна довжина n підслова S_k , слово S_k рекурсивно поділяється навпіл, і кожна його частина розпізнається доки або буде розпізнано і параметризовано примітив, або довжина підслова S_k досягне граничного, наперед заданого значення n .

Якщо деяке підслово S_k параметризоване, а сусідні йому слова не параметризовані, то посимвольним перебором сусідніх слів до слова S_k додаються символи, що задовольняють умовам його параметризації.

На рис. 3.21 світлим кольором виділені символи не параметризованих фрагментів секції, темним - параметризованих. Тут слово S спочатку було поділено на 2 рівні за довжиною частини S_1 і S_2 . Нехай спроба параметризації не привела до успіху, тому кожне зі слів S_1 і S_2 було поділено навпіл: $S_{1.1}$, $S_{1.2}$, $S_{2.1}$ і $S_{2.2}$. Нехай слова $S_{1.2}$ і $S_{2.2}$ успішно параметризовано. Для визначення фактичних меж примітивів й остаточного фрагментування контуру на примітиви, що описуються словами $S_{1.2}$ і $S_{2.2}$, виконується послідовний перебір символів сусідніх слів. При цьому фрагмент слова можна буде вважати кодом примітиву, якщо:

- у процесі такого перебору виявлено, що останні j символів слова $S_{1.1}$ і перші k символів слова $S_{2.1}$ відповідають коду $S_{1.2}$ примітива,
- символи слова $S_{2.1}$, що залишилися, відповідають коду S_{k+1} примітива,
- кількість незадіяних символів слова S_{k+1} менше мінімально допустимої величини n .

Операція бісекціонування триває доки не будуть параметризовані всі секції $\vec{S}_k$. Секції, не розпізнані вищеописаним методом, розпізнаються як ламані і апроксимуються В-сплайнами.

3.9 Метод синтезу й оптимізації векторного образу контуру

Результатом векторизації $\vec{G}^{(S)}$ є розпізнані і параметризовані типовані примітиви $\{\vec{L}, \vec{D}\}$ сегментів $\{\vec{S}_k\}_K$, відокремлені зонами розриву з центрами у характеристичних точках $\{T\}$ (рис. 3.4). Однак, векторний образ креслення деталі має бути гомотопним відображенням його скелету, тобто має зберігати його форму і розміри у початковому вигляді. Тому, необхідно регенерувати скелет у зонах розриву й об'єднати однотипні суміжні примітиви, розділені характеристичними точками. Такий підхід дозволяє суттєво поліпшити гомотопність векторного образу креслення деталі її вихідному растровому зображенню і спростити його подальшу обробку засобами CAD-систем.

При цьому слід керуватися інформацією з упакованої структури (табл. 3.5), що описує векторний образ $\vec{V}$. Таблиця 3.6 містить:

- номер примітиву;
- код типу геометричного примітиву із множини $\{0 - \text{«відрізок прямої»}, 1 - \text{«еліпс»}, 2 - \text{«дуга еліпсу»}, 3 - \text{«окружність»}, 4 - \text{«дуга окружності»}\}$;
- $(i, j)_H, (i, j)_K$ - координати початкової і кінцевої характеристичних точок примітиву;;
- $(i, j)_0$ – координати центру окружності (для примітиву типів «окружність», «дуга окружності»);

- $(i, j)_{F_1}, (i, j)_{F_2}$ – координати фокусів (для примітиву типів «еліпс», «дуга еліпсу»);
- $\max, \min$ – розміри осей (для примітивів «еліпс», «дуга еліпсу»);
- $\angle \alpha$ – кут (у градусах і хвилинах) нахилу примітиву (для примітиву типу «відрізок прямої») або більшої осі (для примітиву типів «еліпс», «дуга еліпсу») до осі абсцис;
- W – товщина примітиву.

Таблиця 3.6 - Структура, що описує векторний образ контуру деталі

Тип примітиву	№ п/п	Параметр															
		код типу примітиву	початкова точка		кінцева точка		центр		фокус ₁		фокус ₂		ось (радіус)		кут		товщина
			x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	max	min	°	'	
відрізок прямої	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
еліпс	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
дуга еліпса	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
окружність	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+
дуга окружності	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+

У першу чергу доцільно відновити зони розриву, що виникли на етапі сегментації растрових зображень креслення деталі, за такою процедурою:

Крок 1. Зі списку розпізнаних і параметризованих ребер графу $\vec{V}$ - примітивів $\{\vec{L}, \vec{D}\}$ обирається черговий примітив. Якщо всі примітиви переглянуті, то процедура завершується.

Крок 2. Якщо поточний примітив є замкнутою кривою типів «еліпс» або «окружність», то виконується перехід до кроку 1.

Крок 3. Оглядається список структур зв'язності характеристичних точок $\{T\}$, що утворені під час сегментації контуру. Якщо жодна із характеристи-

чних точок не належить до околиці початкової (i_0, j_0) або кінцевої (i_n, j_n) точок поточного примітиву, то виконується перехід до кроку 1.

Крок 4. За структурою зв'язності поточної характеристичної точки аналізується можливість її конкатенації з примітивом. При позитивному результаті аналізу характеристична точка й її околиця додається до примітиву, координати початку/кінця примітиву перераховуються. Здійснюється перехід до кроку 1.

Далі доцільно виконати процедуру оптимізації контуру, ідея якої зводиться до об'єднання суміжних примітивів одного типу з подібними геометричними параметрами:

Крок 1. Зі списку розпізнаних і параметризованих ребр графу $\vec{V}$ примітивів $\{\vec{L}, \vec{D}\}$ обирається черговий примітив. Якщо всі примітиви переглянуті, то процедура завершується.

Крок 2. Якщо поточний примітив є замкнутою кривою типів «еліпс» або «окружність», то виконується перехід до кроку 1.

Крок 3. Проглядаються наступні елементи списку на предмет суміжності з поточним і подібності за типом і геометричним параметрам.

Крок 4. Якщо подібний примітив знайдено, то він об'єднується з поточним, а координати початку/кінця поточного примітиву перераховуються. Здійснюється перехід до кроку 1.

Одним із параметрів геометричних примітивів, що визначають гомотопність векторного образу бінарному контуру деталі, є їх товщина. Оцінка товщини W контуру примітиву - нетривіальна задача [92 - 94], для розв'язання якої розроблено статистичний метод. Суть методу - у наступному. Бінарне зображення деталі фрагментується на K локальних блоків $\{d_{6_k}\}_1^K$ розмірами $\psi \times \psi$: $d_6 = \psi \times \psi \mid (i, j \in [1; \psi])$, і товщина примітивів контуру розраховується з прив'язкою до цих блоків (рис. 3.22).

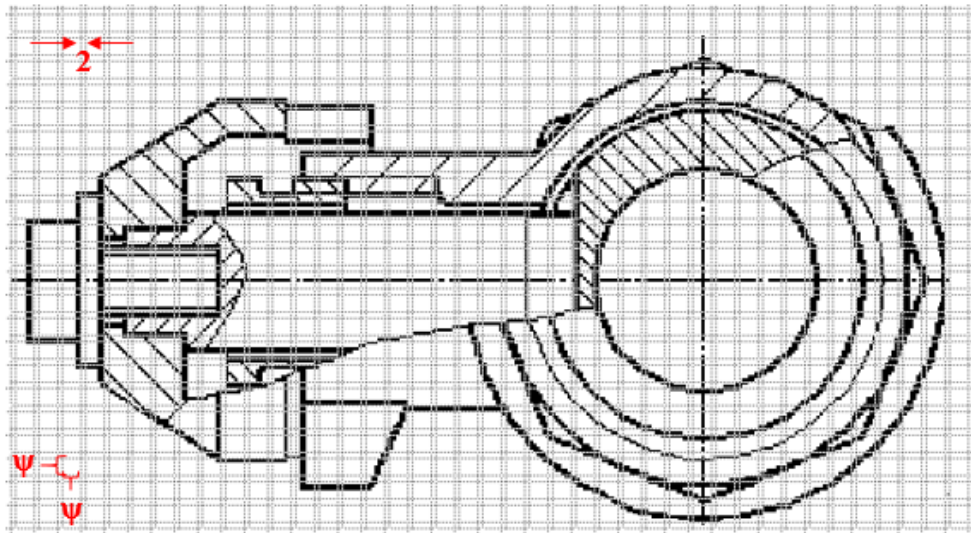


Рисунок 3.22 - Фрагментація бінарного зображення креслення на блоки

Для врахування прикордонних конфліктів примітивів контуру, що розташовані відразу у декількох блоках, сусідні блоки мають перекривати один одного на 2 точки.

Припустимо, що у деякому фрагменті зображення - блоці розміром $d_6 = (\psi \times \psi) \mid \psi \gtrsim W$ - контуру належать всі точки. Тоді товщина контуру у даному блоці оцінюється як ψ . Якщо ж контур займає лише частину блоку, то його товщину у блоці можна оцінити цілою величиною $W = N / \psi$, де N - кількість чорних точок $g_{ij} \in G$ (що належать контуру). Однак, оскільки блок може містити і незначну частину контуру (аж до 0 точок), то з практичної точки зору доцільно прийняти наступне припущення: якщо кількість N точок контуру у блоці не перевищує $\psi^2 / 2$, то N / ψ слід округляти вгору, а якщо перевищує, то округляти вниз, відповідно до виразів (3.15).

$$W_k = \begin{cases} \left\lceil \frac{N}{\psi} \right\rceil & \forall N \leq \psi^2/2 \\ \left\lfloor \frac{N}{\psi} \right\rfloor & \forall N > \psi^2/2 \end{cases}, \quad N = \sum_{i=0}^{\psi-1} \sum_{j=0}^{\psi-1} g_{ij} \quad (3.15)$$

Так, наприклад, для фрагментів контуру деталі «Гайка», що зображені на рис. 3.23 у блоці з $\psi = 7$ (товщина контуру зазвичай не перевищує 6), значення

N , відповідно, складають: $N_1 = 24$ і $N_2 = 28$, а оцінки товщини, обчислені у відповідності до формул (3.15), складають $W_1 = 3$ і $W_2 = 4$, що відповідає реальній растровій товщині лінії контуру зображення у «шаховій» метриці.

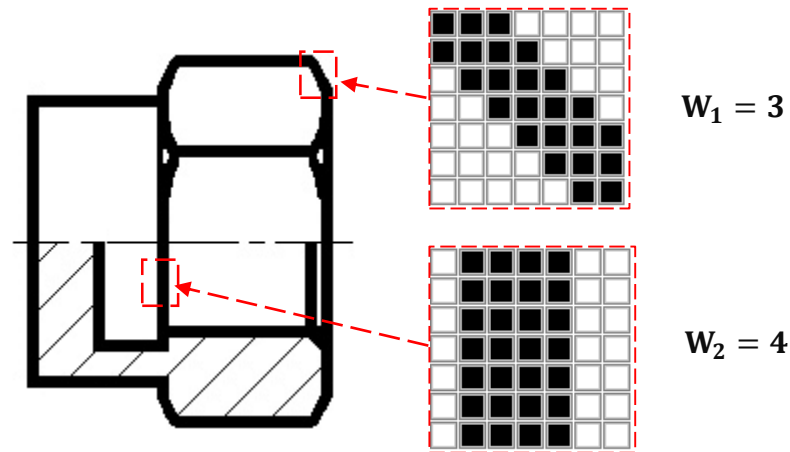


Рисунок 3.23 - Приклад оцінки товщини примітивів контуру деталі «гайка»

Товщини геометричних примітивів різних типів оцінюються так:

- товщини примітивів «відрізок прямої» і «дуга еліпсу (окружності)» розраховується усередненням товщини, розрахованої за початковою (T_0) і кінцевою (T_n) точками;

- товщина примітиву «еліпс (окружність)» розраховується усередненням товщини, розрахованої по точках: $(i_c - R_{c1}, j_c)$, $(i_c + R_{c1}, j_c)$, $(i_c, j_c - R_{c2})$, $(i_c, j_c + R_{c2})$, де: $T_c = (i_c, j_c)$ - центр еліпсу (окружності), R_{c1} і R_{c2} - радіуси великої і малої осей еліпсу (для окружності $R_{c1} = R_{c2}$).

Приклад ефективності описаного у цьому розділі комплексу методів векторизації контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень показано на рис. 3.24.

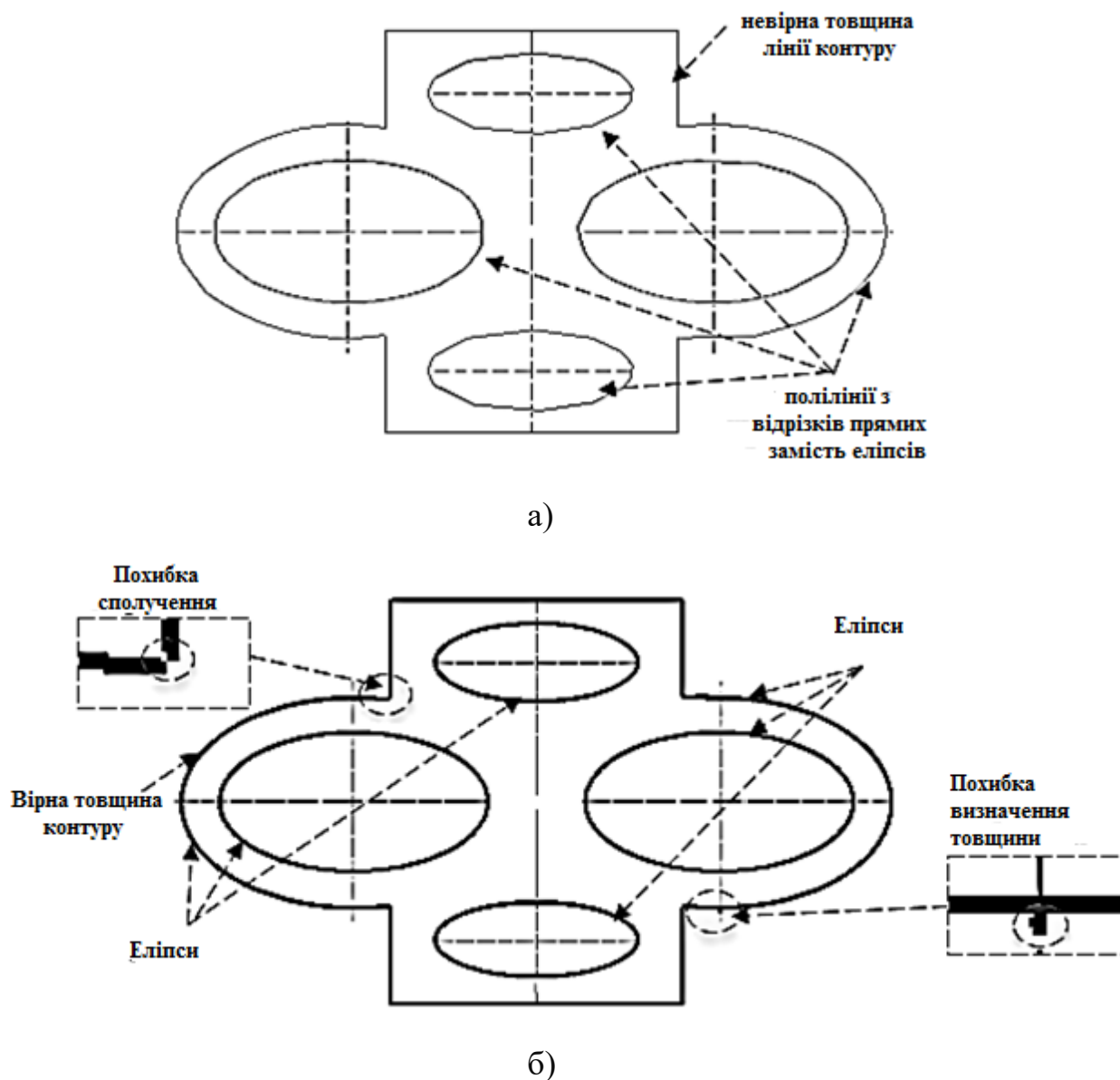


Рисунок 3.24 – Результат векторизації контуру деталі:

- а) у середовищі альтернативного векторизатора Spotlight CS Pro;
- б) розробленим комплексом методів векторизації.

Аналіз результатів тестування вищеописаного комплексу методів векторизації підтверджує (розділ 4.6), що він забезпечує гомотопне відображення контурів деталей растрових зображень машинобудівельних креслень у векторні образи.

3.10 Висновки до розділу

1. Виходячи з особливостей задачі векторизації растрових зображень контурів деталей, встановлено, що опис скелету контуру доцільно представляти зорієнтованим зваженим графом, вершинами якого є характеристичні точки, а ребрами - вектор-конттури геометричних примітивів. Графова модель дозволяє зберігати топологічні особливості контуру деталі, а ваги ребр графу - уникати неоднозначності розпізнавання типів геометричних примітивів.

2. Показано, що достовірне розпізнавання і параметризація відрізків прямих, еліпсів (у тому числі окружностей) і їх дуг із довільною орієнтацією досягається застосуванням розробленого комплексу методів векторизації контуру деталі, у складі якого:

- *метод розпізнавання та кодування характеристичних точок скелету контуру деталі*, заснований на зіставленні точок скелета контуру розробленим маскам із метою розпізнавання вершин графа контуру деталі;

- *метод формування зорієнтованого графа сегментів контуру деталі*, що передбачає формування структур зв'язності сегментів у характеристичних точках із подальшим стиранням їх околиць;

- *метод кодування графу сегментів контуру деталі* застосуванням ланцюгових Фрімен-кодів і вдосконаленого способу огляду околиць точок контуру, що усуває проблему втрати частини його точок і прискорює процес кодування за рахунок використання перспективних напрямків сканування скелету;

- *методи розпізнавання і параметризації ребр графу*, що базуються на використанні виявлених структурних закономірностей форм геометричних примітивів креслень деталей, вперше сформульованих правилах синтаксичного аналізу ребр графу; це дозволяє розпізнавати і параметризовувати типові геометричні примітиви креслень деталей у будь-яких їх орієнтаціях;

- *метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру деталі*, заснований на вперше сформульованих правилах рекурсивного бісекціо-

нування і структурно-лінгвістичного аналізу виділених сегментів контуру; це дозволяє виділяти примітиви у довільних комбінаціях сполучених примітивів;

– *метод синтезу й оптимізації векторного образу контуру деталі*, що базується на аналізі зорієнтованого зваженого графу розпізнаних параметризованих геометричних примітивів і структур їх зв'язності із застосуванням розробленого методу визначення їх товщини; це дозволяє формувати топологічно-складні контури деталей та оптимізувати векторний образ контуру деталі об'єднанням однотипних сусідніх примітивів.

3. Аналіз результатів тестування розробленого комплексу методів векторизації підтвердив (розділ 6.6) достатньо високу якість трансформації контурів деталей растрових зображень машинобудівельних креслень у векторні образи зі збереженням топологічних особливостей (складу, взаєморозташування і геометричних параметрів примітивів) контурів деталей.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ І ВЕКТОРИЗАЦІЇ РАСТРОВИХ ФОРМАТІВ КОНТУРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОБУДІВЕЛЬНИХ КРЕСЛЕНЬ

Підтвердження достовірності та ефективності розробленого комплексу методів вимагає тестування його складових, застосовуваних на всіх етапах растр-векторної трансформації зображень машинобудівельних креслень деталей. В основі аналізу результатів тестування лежить порівняння результативності розроблених методів і типових альтернативних методів, застосування яких для розв'язання розглянутих задач у подібних предметних областях є доцільними і загальновизнаним. Для кількісної оцінки методів використано загальноприйняті об'єктивні показники якості зображення [90, 97, 98, 119, 121].

4.1 Узагальнена схема растр-векторної трансформації зображень машинобудівельних креслень деталей

Запропоновані у дослідженні комплекси методів фільтрації, бінаризації, скелетизації і векторизації утворюють цілісну інформаційну технологію трансформації растрових зображень машинобудівельних креслень деталей у гомотопні їм векторні образи. Ця технологія передбачає послідовне застосування комплексу методів, спеціалізованих на виконання кожного етапу обробки зображень:

Етап 1. Усунення спотворень растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі.

На цьому етапі застосовується *гібридний адаптивний метод*, що поєднує:

– *метод пригнічення напівтонового шуму*, що зберігає топологію контуру деталі;

– *метод підвищення чіткості контуру деталі, що компенсує спотворення його малорозмірних примітивів;*

Етап 2. Бінаризація растрового кольорового напівтонового зображення креслення деталі.

Комплекс застосовуваних на цьому етапі методів містить:

- *метод адаптивної бінаризації зображення, що поєднує:*
 - *метод глобальної бінаризації зображення, який дозволяє виконати первинне секціонування точок зображення на фонові, контурні і не-класифіковані;*
 - *метод локальної адаптивної бінаризації зображення, який дозволяє секціонувати некласифіковані точки зображення на фонові і контурні;*
- *метод пригнічення бінарного шуму, що поєднує:*
 - *метод контурних масок, який пригнічує залишковий бінарний фоновий шум;*
 - *метод видалення спотворень контуру деталі, який усуває спотворення контуру деталі у вигляді чорної та білої контурної «бахроми».*

Етап 3. Скелетизація бінарного контуру деталі.

Комплекс застосовуваних на цьому етапі методів являє собою двоетапний *метод коригування спотворень скелета контуру деталі* (отриманого будь-яким базовим методом скелетизації) і містить:

- *метод коригування спотворень топології кутів скелету;*
- *метод коригування порушень зв'язності скелету;*
- *метод коригування порушень топології скелету у точках перетину геометричних примітивів.*

Етап 4. Векторизація скелета контуру деталі.

Комплекс застосовуваних на цьому етапі методів містить:

- *метод розпізнавання та кодування характеристичних точок, що дозволяє розпізнавати і кодувати вершини графа контуру деталі;*

- *метод формування зорієнтованого графа сегментів контуру деталі, що передбачає формування структур зв'язності сегментів у характеристичних точках з подальшим стиранням їх околиць;*
- *метод кодування графа сегментів контуру деталі ланцюговими Фрімен-кодами;*
- *методи розпізнавання і параметризації ребер графу - геометричних примітивів контуру деталі;*
- *метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру деталі;*
- *метод синтезу та оптимізації векторного образу контуру деталі.*

Узагальнена схема застосування розробленої технології трансформації растрових зображень креслень деталей у гомотопні їм векторні образи представлена на рис. 4.1. Характерна риса технології - спеціалізація на предметну область і комплексність рішень на всіх етапах перетворення зображень креслень деталей. Так, наприклад, на етапі бінаризації додатково виконується бінарна фільтрація зображення з метою видалення залишкового шуму, не усунутого на етапі напівтонової фільтрації (зі збереженням топології контуру деталі), а на етапі векторизації коригуються залишкові спотворення скелета у точках перетину / сполучення геометричних примітивів. Комплексний підхід до поетапного розв'язання задачі гомотопної векторизації креслень деталей дозволив істотно покращити метрики оцінки якості їх растрових зображень, у порівнянні з існуючими методами, застосовуваними під час розв'язання окремих локальних задач.

① Комплекс методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей

Метод компенсації спотворень малорозмірних примітивів при підвищенні чіткості контуру деталі
Гібридний адаптивний метод пригнічення спотворень, що зберігає топологію контуру деталі

② Комплекс методів бінаризації растрових кольорових напівтонових фільтрованих зображень креслень деталей

Комплекс методів бінаризації	<i>Метод оцінки глобальних порогів бінаризації</i>
	<i>Метод оцінки локальних адаптивних порогів бінаризації</i>
Комплекс методів усунення остаточних бінарних спотворень	<i>Метод контурних масок</i>
	<i>Метод усунення контурних спотворень</i>

③ Комплекс методів покращення скелетів контурів у растрових бінарних зображеннях креслень

Метод коригування спотворень топології кутів скелету
Метод коригування порушень зв'язності скелету
Метод коригування порушень гомотопності скелету у точках перетину примітивів

④ Комплекс методів векторизації скелетів контурів деталей

Метод розпізнавання і кодування характеристичних точок скелету
Метод формування зорієнтованого графу сегментів контуру
Метод кодування графу сегментів контуру
Метод розпізнавання і параметризації ребер графу типу «відрізок прямої»
Метод розпізнавання і параметризації ребер графу типів «еліпс» і «дуга еліпсу» з довільним кутом нахилу
Метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру
Метод синтезу й оптимізації векторного образу контуру

Рисунок 4.1 - Узагальнена схема розробленої технології растр-векторної трансформації зображень машинобудівельних креслень деталей

4.2 Методика проведення експериментів

Тестування методів попередньої обробки і векторизації растрових зображень креслень деталей виконано на персональному комп'ютері (ПК), базова конфігурація якого відображена у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики ПК

Технічна характеристика ПК	Значення
модель центрального процесору	Intel ® Core ™ i7-3770
тактова частота центрального процесору	3.40 ГГц
архітектура центрального процесору	x32
кількість ядер центрального процесору	8
обсяг оперативної пам'яті	4,00 Г
модель жорсткого диску	ST316081 2A SCSI

Умови тестування:

1. Використані для тестування растрові зображення креслень деталей (додаток Б) представлені випадковою вибіркою з 40 кольорових напівтонових зображень ($n = 40$), з глибиною кольору 24 біта, різних розмірів. Згідно [123], така вибірка при $n > 23$ (4.1) з ймовірністю 95% гарантує репрезентативні результати експериментів.

$$n = p \cdot (100 - p) \cdot t^2 / \delta^2 = 15 \cdot 85 \cdot 2^2 / 15^2 = 23, \quad (4.1)$$

де n – мінімальний розмір вибірки при невідомій величині генеральної сукупності;

p – середній рівень похибки (15%);

t - довірливий коефіцієнт, що показує ймовірність того, що рівень похибки не перевищить граничного значення (при $t = 2$ забезпечується ймовірність 95% безпомилкового прогнозу);

δ - гранична помилка ($\pm 15\%$).

2. Кожен комплекс методів тестувався за допомогою спроектованого програмного забезпечення на тестовому наборі зображень креслень деталей; кожне зображення було основою для 5 експериментів у різних режимах, результати яких осереднювалися.

3. Аналіз достовірності та ефективності розроблених методів проведено на основі порівняння результатів тестування цих методів і типових альтернативних методів, застосування яких для розв'язання розглянутих задач у подібних предметних областях є загальновизнаним і ефективним.

4. Для кількісної оцінки результатів аналізованих методів використані загальноприйняті метрики: MSE, PSNR, UIQI, SSIM, PRECISION, RECALL, F-MEASURE, ACCURACY, PCRE [90, 97, 98, 119, 121].

Порівняльний аналіз часу обробки растрових зображень креслень деталей не проводився, що пояснюється: превалюючою цінністю якості обробки перед витраченим на це мізерним часом, відсутністю публікацій у відкритому доступі, що пояснюють методи і алгоритми роботи альтернативних векторизаторів, попутною обробкою зображень альтернативними векторизаторами, що не дозволяє оцінити «чистий» результат роботи одного будь-якого альтернативного методу. У зв'язку з вищевикладеним, для них застосовано тест «чорний ящик».

4.3 Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей

Розглянемо детально деякі результати тестування комплексу методів усунення спотворень растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей на прикладі деталі, зображеної на рис. Б.12.

Експеримент 1. Оригінал спотворено кольоровим 20% високочастотним шумом (рис. Г.1, а); він характеризується параметрами: $MSE = 3949.65$, $PSNR = 12.20$ dB, $UIQI = SSIM = 0.83$. У результаті застосування розробленого комп-

лексу методів шумопригнічення отримано результуюче зображення (рис. Г.1, б), при порівнянні якого з не зашумленим оригіналом одержано наступні параметри: $MSE = 481.66$, $PSNR = 21.34$ dB, $UIQI = SSIM = 0.97$. В якості альтернативного методу обрано метод низькочастотної фільтрації; параметри результуючого зображення становлять: $MSE = 2287.55$, $PSNR = 14.57$ dB, $UIQI = SSIM = 0.87$ (рис. Г.1, у); вони суттєво поступаються результатам попередньої обробки розробленим комплексом методів.

Експеримент 2. Оригінал спотворено кольоровим 20% рівномірним шумом і характеризується параметрами: $MSE = 1060.58$, $PSNR = 17.91$ dB, $UIQI = SSIM = 0.95$ (рис. Г.2, а). У результаті застосування розробленого комплексу методів шумопригнічення отримано результуюче зображення (рис. Г.2, б), при порівнянні якого з незашумленим оригіналом отримано наступні параметри: $MSE = 10.51$, $PSNR = 37.95$ dB, $UIQI = SSIM = 1.00$. В якості альтернативного методу обрано метод медіанної фільтрації з радіусом 1. Результуюче зображення (рис. Г.2, в) має параметри: $MSE = 834.46$, $PSNR = 18.95$ dB, $UIQI = SSIM = 0.96$, що суттєво поступаються результатам попередньої обробки розробленим комплексом методів.

Експеримент 3. Оригінал спотворено шумом розмиття за Гаусом з радіусом, рівним 1, і характеризується параметрами: $MSE = 2966.21$, $PSNR = 13.44$ dB, $UIQI = SSIM = 0.79$ (рис. Г.3, а). У результаті застосування розробленого комплексу методів шумопригнічення отримано результуюче зображення (рис. Г.3, б), при порівнянні якого з не зашумленим оригіналом одержано наступні параметри: $MSE = 2385.72$, $PSNR = 14.39$ dB, $UIQI = SSIM = 0.83$. В якості альтернативного методу фільтрації обрано метод «нерізкої маски» з радіусом 1. Результуюче зображення (рис. Г.3, в) має параметри: $MSE = 2444.45$, $PSNR = 14.28$ dB, $UIQI = SSIM = 0.83$, що поступаються результатам попередньої обробки розробленим комплексом методів.

Результати тестування комплексу методів усунення спотворень напівтонових растрових зображень креслень на всіх зразках тестового набору зобра-

жень креслень деталей зведено у табл. В.1, де прийняті наступні позначення: А, В, С - характеристики зображення, відповідно: спотвореного, фільтрованого розробленим комплексом методів і фільтрованого класичним методом (для гаусового і рівномірного шуму - методом медіанної фільтрації, для високочастотного шуму - методом низькочастотної фільтрації, для шуму розмиття - методом «нерізкої маски» [88]). Всі показники розраховані відносно оригінального зображення. Усереднені результати порівняльного дослідження комплексу методів усунення спотворень напівтонових растрових зображень креслень деталей наведено у табл. В 2. Результат порівняльного аналізу комплексу методів усунення спотворень напівтонових растрових зображень креслень деталей і альтернативних методів фільтрації на тестових зразках показав покращення базових метрик якості (MSE, PSNR, UIQI, SSIM) у середньому на 18,55%, що дозволяє зробити позитивний висновок про його достовірність та ефективність.

4.4 Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей

Розглянемо детально деякі результати тестування комплексу методів бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей на прикладі деталі, зображеної на рис. Б.4.

Експеримент 1. Оригінальне напівтонове зображення спотворено зональною нерівномірністю яскравості (рис. Г.4, а). У результаті застосування розробленого комплексу методів бінаризації: виконано глобальну бінаризацію, у результаті якої одержано значення нижнього (20) і верхнього (201) порогів, а також виконано локальну адаптивну бінаризацію точок зображення з яскравістю [21; 200]. При порівнянні отриманого результуючого зображення (рис. Г.4, б) з бінарним оригіналом отримано наступні параметри: Recall = Precision = F-measure = Accuracy = 1.00. В якості альтернативних методів обра-

но класичні методи бінаризації, що згенерували результуючі зображення. При порівнянні цих зображень з бінарним оригіналом отримано наступні параметри:

- метод Bernsen (рис. Г.4, в): Recall = 0.95, Precision = 1.00, F-measure = 0.98, Accuracy = 1.00;
- метод Niblack (рис. Г.4, г): Recall = 1.00, Precision = 0.16, F-measure = 0.28, Accuracy = 0.60;
- метод Otsu (рис. Г.5, а): Recall = Precision = F-measure = Accuracy = 1.00;
- метод Sauvola (рис. Г.5, б): Recall = 0.62, Precision = 1.00, F-measure = 0.77, Accuracy = 0.97;
- метод Phansalkar (рис. Г.5, в): Recall = Precision = F-measure = Accuracy = 1.00.

За вищенаведеними показниками кращими альтернативними результатами визнані результати, згенеровані методами Otsu і Phaksankar. Ці результати за показниками якості бінарного зображення ідентичні результату обробки розробленим комплексом методів бінаризації; схожість результатів видно також із візуального (HVS) порівняння рис. Г.5, в з рис. Г.4, б.

Експеримент 2. Оригінальне напівтонове зображення спотворено комплексно: зональною нерівномірністю яскравості, зниженням яскравості й контрастності (рис. Г.6, а). У результаті застосування розробленого комплексу методів бінаризації: виконано глобальну бінаризацію, у результаті якої одержано значення нижнього (85) і верхнього (149) порогів, а також виконано локальну адаптивну бінаризацію точок зображення з яскравістю [86; 148]. При порівнянні отриманого результуючого зображення (рис. Г.6, б) з бінарним оригіналом отримано наступні параметри: Recall = 0.96, Precision = 0.98, F-measure = 0.95, Accuracy = 1,00.

В якості альтернативних методів обрано класичні методи бінаризації, що згенерували результуючі зображення, представлені на рис. Г.8: Bernsen (рис. Г.6, в), Niblack (рис. Г.6, г), Otsu (рис. Г.7, а), Sauvola (рис. Г.7, б),

Phansalkar (рис. Г.7, в). При порівнянні цих зображень із бінарним оригіналом кращим альтернативним результатом визнано результат, згенерований методом Sauvola (рис. Г.7, б) з параметрами: Recall = 0.48, Precision = 0.26, F-measure = 0.33, Accuracy = 0.85. Цей результат, однак, за всіма показниками якості бінарного зображення суттєво поступається результату обробки розробленим комплексом методів бінаризації, що також наочно видно з HVS-порівняння рис. Г.6, б з рис. Г.7, б.

Підсумкові результати тестування розробленого комплексу методів бінаризації на всіх зразках тестового набору зображень креслень деталей зведено до табл. В.3, в якій прийнято наступні позначення: А - характеристики зображення, бінаризованого розробленим комплексом методів бінаризації, В - F - характеристики зображень, бінаризованих, відповідно, класичними методами: Bernsen, Niblack, Otsu, Sauvola, Phansalkar. Всі показники розраховані стосовно до бінарного оригіналу. Усереднені результати порівняльного дослідження розробленого комплексу методів бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей зведено до табл. В 4.

Результат порівняльного аналізу розробленого комплексу методів бінаризації і альтернативних методів бінаризації на тестових зразках показав покращення базових метрик якості (Recall, Precision, F-measure, Accuracy) у середньому на 17,40%, що дозволяє зробити позитивний висновок про його достовірність та ефективність.

Розглянемо детально деякі результати тестування комплексу методів усунення спотворень растрового бінарного зображення креслення деталі на прикладі деталі, зображеної на рис. Б.3.

Експеримент 1. Оригінал спотворено бінарним 20% гаусовим шумом: MSE = 0.02, PSNR = 22.42 dB, UIQI = SSIM = 0.85 (рис. Г.8, а). При автоматичній фільтрації бінарного шуму: у результаті застосування методу контурних масок видалено всі фонові чорні артефакти (рис. Г.8, б), а в результаті застосування методу видалення контурних спотворень видалено чорну і білу контурну

«бахрому» (рис. Г.8, в). Параметри результуючого зображення становлять: $MSE = 0.00$, $PSNR = 34.99$ dB, $UIQI = SSIM = 0.99$. В якості альтернативного методу обрано метод медіанної фільтрації з радіусом 1. Результуюче зображення (рис. Г.8, г) має параметри: $MSE = 0.02$, $PSNR = 22.89$ dB, $UIQI = SSIM = 0.85$, що суттєво поступаються результатам обробки розробленим комплексом методів.

Експеримент 2. Оригінал спотворено бінарним 20% високочастотним шумом: $MSE = 0.01$, $PSNR = 27.28$ dB, $UIQI = SSIM = 0.95$ (рис. Г.9, а). При автоматичній фільтрації бінарного шуму: у результаті застосування методу контурних масок видалено фонові чорні артефакти шуму (рис. Г.9, б), а у результаті застосування методу видалення контурних спотворень видалено чорну контурну «бахрому» (рис. Г.9, в). Параметри результуючого зображення становлять: $MSE = 0.00$, $PSNR = 35.79$ dB, $UIQI = SSIM = 0.99$. В якості альтернативного методу обрано метод медіанної фільтрації з радіусом 1. Результуюче зображення (рис. Г.9, г) має параметри: $MSE = 0.01$, $PSNR = 28.89$ dB, $UIQI = SSIM = 0.96$, що суттєво поступаються результатам обробки розробленим комплексом методів.

Експеримент 3. Оригінал спотворено бінарним 20% шумом «твердий олівець»: $MSE = 0.00$, $PSNR = 30.19$ dB, $UIQI = SSIM = 0.97$ (рис. Г.10, а). При автоматичній фільтрації бінарного шуму застосовано метод видалення контурних спотворень. Параметри результуючого зображення (рис. Г.10, б) становлять: $MSE = 0.00$, $PSNR = 34.92$ dB, $UIQI = SSIM = 0.99$. В якості альтернативного методу обрано метод медіанної фільтрації з радіусом 1. Результуюче зображення (рис. Г.10, в) має параметри: $MSE = 0.00$, $PSNR = 34.92$ dB, $UIQI = SSIM = 0.99$, зіставні з результатами обробки запропонованим комплексом методів.

Підсумкові результати тестування комплексу методів усунення спотворень растрового бінарного зображення креслення деталі на всіх зразках тестового набору зведено до табл. В.5, в якій прийнято наступні позначення: А, В, С- характеристики зображення, відповідно, спотвореного, фільтрованого розробленим комплексом методів і фільтрованого класичним методом медіанної філь-

трації. Всі показники розраховані відносно оригінального зображення. Усереднені результати порівняльного дослідження комплексу методів усунення спотворень растрового бінарного зображення креслення деталі зведено до табл. В.6.

Результат порівняльного аналізу комплексу методів усунення спотворень растрового бінарного зображення креслення деталі й альтернативних методів шумопригнічення на тестових зразках показав покращення базових метрик якості (MSE, PSNR, UIQI, SSIM) у середньому на 35,71%, що дозволяє зробити позитивний висновок про його достовірність та ефективність.

4.5 Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень

Розглянемо детально деякі результати тестування розробленого комплексу методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень на прикладі деталей набору з додатку Б.

Експеримент 1. В результаті автоматичної скелетизації потовщеного контуру (рис. Г.11, б) зображення деталі (рис. Б.22) розробленим комплексом методів отримано скелет (рис. Г.11, е). При його порівнянні з ідеальним (рис. Г.11, а) одержано наступні параметри: MSE = 0.00, PSNR = 66.02 dB, UIQI = SSIM = Recall = Precision = F-measure = Accuracy = 1.00. В якості альтернативних методів обрано класичні методи скелетизації, що згенерували результуючі зображення, представлені на рис. Г.11, в-д. При порівнянні цих зображень з ідеальним (рис. Г.11, а) одержано наступні параметри:

- метод Stentiford F.W. (рис. Г.11, в): MSE = 0.04, PSNR = 20.39 dB, UIQI = SSIM = 0.39, Recall = Precision = F-measure = 0.41, Accuracy = 0.96;

- метод Zhang T., Suen C. (рис. Г.11, г): $MSE = 0.00$, $PSNR = 31.19$ dB, $UIQI = SSIM = 0.95$, $Recall = 0.93$, $Precision = 0.97$, $F\text{-measure} = 0.95$, $Accuracy = 1.00$;

- метод Wu R.Y., Tsai W.H. (рис. Г.11, д): $MSE = 0.00$, $PSNR = 31.72$ dB, $UIQI = SSIM = 0.95$, $Recall = 0.94$, $Precision = 0.97$, $F\text{-measure} = 0.96$, $Accuracy = 1.00$. Кращим результатом визнано результат, згенерований методом Wu R.Y., Tsai W.H. (Рис. Г.11, д). Однак, він за всіма показниками якості зображення поступається результату обробки розробленим комплексом методів, що також наочно видно з HVS-порівняння рис. Г.11, д з рис. Г.11, е.

Експеримент 2. У результаті автоматичної скелетизації потовщеного контуру (рис. Г.12, б) зображення деталі (рис. Б.31) розробленим комплексом методів отримано скелет (рис. Г.12, е). При його порівнянні з ідеальним (рис. Г.12, а) одержано наступні параметри: $MSE = 0.00$, $PSNR = 45.26$ dB, $UIQI = SSIM = Recall = Precision = F\text{-measure} = Accuracy = 1.00$. В якості альтернативних методів обрано класичні методи скелетизації, що згенерували результуючі зображення, представлені на рис. Г.12, в-д. При порівнянні цих зображень з ідеальним (рис. Г.12, а) одержано наступні параметри:

- метод Stentiford F.W. (рис. Г.12, в): $MSE = 0.00$, $PSNR = 29.41$ dB, $UIQI = SSIM = 0.92$, $Recall = 0.91$, $Precision = 0.93$, $F\text{-measure} = 0.92$, $Accuracy = 1.00$;

- метод Zhang T., Suen C. (рис. Г.12, г): $MSE = 0.00$, $PSNR = 29.40$ dB, $UIQI = SSIM = 0.92$, $Recall = 0.94$, $Precision = 0.91$, $F\text{-measure} = 0.92$, $Accuracy = 1.00$;

- метод Wu R.Y., Tsai W.H. (рис. Г.12, д): $MSE = 0.00$, $PSNR = 31.44$ dB, $UIQI = SSIM = Recall = 0.95$, $Precision = 0.96$, $F\text{-measure} = 0.95$, $Accuracy = 1.00$. Кращим визнано результат, згенерований методом Wu R.Y., Tsai W.H. (Рис. Г.12, д). Однак, він за всіма показниками якості зображення поступається результату обробки розробленим комплексом методів, що також наочно видно з HVS-порівняння рис. Г.12, д з рис. Г.12, е.

Підсумкові результати тестування розробленого комплексу методів покращення скелетів контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень деталей на всіх зразках тестового набору зведено до табл. В.7. Всі показники розраховано відносно до ідеального скелету. Усереднені результати порівняльного дослідження розробленого комплексу методів зведено до табл. В 8.

Результат порівняльного аналізу розробленого комплексу методів і альтернативних методів скелетизації на тестових зразках показав покращення базових показників якості (MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy) у середньому на 25,77%, що дозволяє зробити позитивний висновок про його достовірність та ефективність.

4.6 Дослідження достовірності та ефективності комплексу методів векторизації контурів деталей у растрових бінарних зображеннях креслень

При виконанні порівняльного аналізу результатів векторизації контурів растрових зображень креслень деталей тестового набору, що наведено у додатку Б, було проаналізовано найбільш досконалі векторизатори растрових зображень.

Векторизатор CorelDraw Graphics Suite компанії CorelDraw (тестувалася версія Special Edition X7 17.5.0.907) з розгляду було виключено, оскільки жоден із запропонованих їм способів векторизації не дозволяє отримати хоч скільки-небудь прийнятний результат векторизації для даної предметної області. Векторизація зображення контуру деталі (наприклад, рис. Г.13, а) призводить до хаотичного угруповання дрібних примітивів і втрати значної частини контуру, примітиви з одиничною товщиною не трасуються зовсім, а візуалізація сформованого векторного образу являє собою «обведення» ліній контуру (рис. Г.13, б).

Векторизатор Algolab Photo Vector 1.98.86 компанії Algolab також було виключено з розгляду, оскільки візуалізація продукovanого ним векторного об-

разу також є «обведенням» ліній контуру. Таким чином, в якості альтернативних інструментів перетворення растрових зображень у векторні далі розглянуті програми-векторизатори, придатні до використання у розглянутій предметній області:

- WinTopo версії Professional 3.521 компанії SoftSoft Ltd.;
- VectorNow версії 2.23 компанії AutoDWG;
- Vextractor версії Professional 6.80 компанії VextraSoft;
- Img2CAD версії 7.3 компанії Img2CAD Software;
- Spotlight^{CS} Pro версії 11.0.1315.1466 компанії CSoft Development.

Найбільш загальним і дуже суттєвим недоліком альтернативних векторизаторів є невірна класифікація примітивів. Так, наприклад, дуги окружностей і еліпсів (а, іноді, і відрізки прямих) в них апроксимуються полілініями (ламаними) або сплайнами. Незважаючи на те, що така апроксимація, як спосіб векторизації примітивів, дає зовнішню схожість із оригіналом і непогані значення метрики Precision, такий підхід призводить до невірної класифікації геометричних примітивів, втрати гомотопності векторного і растрового зображень та втрати геометричних параметрів креслення деталі. Все це робить результати векторизації непридатними для подальшого редагування штатними засобами векторних редакторів і САПР. Так, наприклад, масштабування будь-якої «векторизованої» таким чином окружності розтягуванням радіусу у середовищі векторних редакторів призводить до спотворення форми контуру (приклади наведено на рис. Г.13, в-г). Це є наслідком уявлення елемента контуру не як типізованого геометричного примітиву (наприклад, «окружності»), а як його апроксимації сплайном, що не масштабується (рис. Г.13, в), або полілінією (рис. Г.13, г). Якщо ж тип (форму) примітиву ідентифіковано вірно, то навіть деяка похибка його параметризації може бути легко скорегована штатними засобами векторних редакторів.

Експеримент 1. Розглянемо порівняльні якісні й кількісні показники результатів тестування розробленого комплексу методів векторизації растрових

зображень креслень деталей на прикладі зображення деталі (рис. Б.22), контур якої складається тільки з відрізків прямих:

- WinТоро. Гомотопність контуру серйозно порушена (рис. Г.14, а). Хоча тип всіх 65 примітивів «відрізок прямої» розпізнано вірно ($PCRE(\vec{L}) = 100\%$ - найкращий альтернативний результат), проте: прямі кути округлено, деякі відрізки прямих апроксимовані сплайнами і схожі з дугами окружностей, чимало ортогональних відрізків представлено ступінчастими лініями, товщини примітивів не відповідають оригіналу; $MSE = 0.07$, $PSNR = 17.57$ dB, $UIQI = 0.24$, $SSIM = 0.99\%$, $Precision = 0.76\%$, $Recall = 0.27$, $F\text{-measure} = 0.4$, $Accuracy = 0.93$.

- VectorNow. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушена (рис. Г.14, б). При $PCRE(\vec{L}) = 32.30\%$ чимало ортогональних відрізків представлено ступінчастими лініями, спостерігаються «рубані» прямі кути і множинні розриви контуру, відрізки прямих хаотично об'єднані у полілінії (на рис. Г.14, б одна з них зображена синім кольором із виділеними вершинами), товщини примітивів не відповідають оригіналу; $MSE = 0.07$, $PSNR = 17.40$ dB, $UIQI = 0.21$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.72$, $Recall = 0.25$, $F\text{-measure} = 0.37$, $Accuracy = 0.93$.

- Vextractor. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушена (рис. Г.15, а). При $PCRE(\vec{L}) = 61.53\%$ чимало ортогональних відрізків представлено ступінчастими похилими лініями, прямі кути сильно спотворені, товщини примітивів не відповідають оригіналу; $MSE = 0.07$, $PSNR = 17.44$ dB, $UIQI = 0.24$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.72$, $Recall = 0.27$, $F\text{-measure} = 0.39$, $Accuracy = 0.93$.

- Img2CAD. Гомотопність образу контуру оригінала порушена (рис. Г.15, б). При $PCRE(\vec{L}) = 93.84\%$ товщини примітивів не відповідають оригіналу; $MSE = 0.07$, $PSNR = 17.77$ dB, $UIQI = 0.26$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.81$, $Recall = 0.29$, $F\text{-measure} = 0.43$, $Accuracy = 0.93$.

– Spotlight. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушена (рис. Г.15, у). При PCRE ($\vec{L} \rightarrow$) = 86.15% чимало ортогональних відрізків представлено ступінчастими похилими лініями, деякі прямі кути спотворено до не-впізнання і представлено дугами; товщину ліній визначено невірно (вона менше, ніж в оригінала); MSE = 0.08, PSNR = 16.85 dB, UIQI = 0.18, SSIM = 0.99, Precision = 0.56, Recall = 0.20, F-measure = 0.29, Accuracy = 0.92.

– Розроблений комплекс методів. Гомотопність образу контуру оригінала порушена несуттєво (рис. Г.15, г). При PCRE ($\vec{L} \rightarrow$) = 100.00% у двох випадках невірно визначено товщину штрихування і втрачено відрізок прямої довжиною у 2 точки ($\approx 0,75$ мм); MSE = 0.02, PSNR = 22.62 dB, UIQI = 0.83, SSIM = 0.99, Precision = 0.96, Recall = 0.78, F-measure = 0.86, Accuracy = 0.98%. Таким чином, за всіма показниками розроблений комплекс методів дав найкращі результати.

Експеримент 2. Розглянемо результати тестування розробленого комплексу методів векторизації растрових зображень креслень деталей на прикладі зображення деталі (рис. Б.39), контур якої складається з відрізків прямих, дуг еліпсів і еліпсів.

– WinToro. MSE = 0.03, PSNR = 20.99 dB, UIQI = 0.32, SSIM = 0.99, Precision = 0.98, Recall = 0.35, F-measure = 0.52, Accuracy = 0.97. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено (рис. Г.16, а): PCRE ($\vec{L}$) = 93.02%, типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім (PCRE ($\vec{C}$) = PCRE ($\nrightarrow \vec{C}$) = 0.00% та апроксимовано сплайнами і полілініями.

– VectorNow. MSE = 0.03, PSNR = 20.96 dB, UIQI = 0.32, SSIM = 0.99, Precision = 0.97, Recall = 0.35, F-measure = 0.52, Accuracy = 0.96. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено (рис. Г.16, б): PCRE ($\vec{L}$) = 93.02%, типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім (PCRE ($\vec{C}$) = PCRE ($\nrightarrow \vec{C}$) = 0.00%) та апроксимовано сплайнами і полілініями.

– Vextractor. MSE = 0.03, PSNR = 20.87 dB, UIQI = 0.33, SSIM = 0.99, Precision = 0.92, Recall = 0.35, F-measure = 0.51, Accuracy = 0.96. Гомотопність

образа контуру оригінала серйозно порушено (рис. Г.16, в): типи примітивів не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{L}) = PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями.

– Img2CAD. $MSE = 0.05$, $PSNR = 19.12$ dB, $UIQI = 0.15$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.49$, $Recall = 0.17$, $F\text{-measure} = 0.25$, $Accuracy = 0.95$. Гомотопність образа контуру оригінала серйозно порушено (рис. Г.16, г): $PCRE(\vec{L}) = 74.41$ типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями.

– Spotlight. $MSE = 0.08$, $PSNR = 17.13$ dB, $UIQI = 0.13$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.18$, $Recall = 0.17$, $F\text{-measure} = 0.17$, $Accuracy = 0.92$. Гомотопність образа контуру оригінала серйозно порушено (рис. Г.16, д): хоча відрізків прямих розпізнано вірно ($PCRE(\vec{L}) = 100.00\%$), але типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) і дуже грубо апроксимовано сплайнами і полілініями.

– Розроблений комплекс методів. Гомотопність образа контуру оригінала порушено несуттєво (рис. Г.16, е): $PCRE(\vec{L}) = PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 100.00\%$; $MSE = 0.03$, $PSNR = 20.92$ dB, $UIQI = 0.67$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.63$, $Recall = 0.77$, $F\text{-measure} = 0.70$, $Accuracy = 0.96$. Таким чином, за метрикою $Precision$ метод поступився WinToro на 35,02%, а за всіма іншими показниками розроблений комплекс методів є безумовним лідером (він розпізнав форму всіх геометричних примітивів і єдиний з усіх розпізнав товщину контуру).

Експеримент 3. Розглянемо результати тестування розробленого комплексу методів векторизації растрових зображень креслень деталей на прикладі зображення деталі (рис. Б.37, рис. Г.17, а), контур якої складається з відрізків прямих, нахилених еліпсів і дуг нахилених еліпсів.

– WinToro. $MSE = 0.03$, $PSNR = 21.50$ dB, $UIQI = 0.40$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.92$, $Recall = 0.40$, $F\text{-measure} = 0.56$, $Accuracy = 0.97$. Гомотопність образа контуру оригінала серйозно порушено: $PCRE(\vec{L}) = 54.54\%$, але типи

примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями (рис. Г.17, б).

– VectorNow. $MSE = 0.03$, $PSNR = 21.59$ dB, $UIQI = 0.41$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.93$, $Recall = 0.41$, $F\text{-measure} = 0.57$, $Accuracy = 0.97$. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено: $PCRE(\vec{L}) = 54.54\%$, але типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями (рис. Г.17, в).

– Vextractor. $MSE = 0.04$, $PSNR = 20.43$ dB, $UIQI = 0.32$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.73$, $Recall = 0.32$, $F\text{-measure} = 0.44$, $Accuracy = 0.96$. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено: $PCRE(\vec{L}) = 45.45\%$, але типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями (рис. Г.17, г).

– Img2CAD. $MSE = 0.03$, $PSNR = 21.38$ dB, $UIQI = 39.79\%$, $SSIM = 99.94\%$, $Precision = 90.21\%$, $Recall = 39.46\%$, $F\text{-measure} = 54.90\%$, $Accuracy = 97.09\%$. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено: $PCRE(\vec{L}) = 54.54\%$, але типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) та апроксимовано сплайнами і полілініями (рис. Г.17, д).

– Spotlight. $MSE = 0.04$, $PSNR = 20.18$ dB, $UIQI = 0.29$, $SSIM = 0.99$, $Precision = 0.66$, $Recall = 0.29$, $F\text{-measure} = 0.40$, $Accuracy = 0.96$. Гомотопність образу контуру оригінала серйозно порушено: при $PCRE(\vec{L}) = 95.45\%$ типи примітивів «еліпс» і «дуга еліпсу» не розпізнано зовсім ($PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nexists\vec{C}) = 0.00\%$) і з великою похибкою апроксимовано сплайнами і полілініями (рис. Г.17, е).

– Розроблений комплекс методів. Гомотопність образу контуру оригінала порушено несуттєво: $MSE = 0.04$, $PSNR = 20.19$ dB, $UIQI = 0.53$, $SSIM = 0.99\%$, $Precision = 0.58\%$, $Recall = 0.52$, $F\text{-measure} = 0.55$, $Accuracy = 0.96$. Таким чином, за деякими показниками точності представлення контуру він поступився альте-

рнативним методам, проте, за якістю розпізнавання типів примітивів дав найкращі результати ($PCRE(\vec{L}) = 95.45\%$, $PCRE(\vec{C}) = PCRE(\nabla\vec{C}) = 100.00\%$): розпізнав форму всіх геометричних примітивів і єдиний з усіх розпізнав товщину контуру (рис. Г.17, ж).

Підсумковий результат порівняльного аналізу розробленого комплексу методів векторизації растрових зображень креслень деталей і альтернативних векторизаторів на тестових зразках (додаток Б) показав покращення базових показників якості розпізнавання типів примітивів ($PCRE(\vec{L})$, $PCRE(\vec{O})$, $PCRE(\vec{C})$, $PCRE(\nabla\vec{C})$) у середньому на 49,53% (табл. В.11) й оцінок гомотопності вихідного і результуючого контурів (MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Ассурасу) у середньому на 18,61% (табл. В.11), що дозволяє зробити позитивний висновок про його достовірність та ефективність.

4.7 Висновки до розділу

1. Результат тестування розробленого комплексу методів на репрезентативній вибірці зображень машинобудівельних креслень деталей показав підвищення якості їх растр-векторної трансформації: фільтрації растрових кольорових напівтонових зображень - на 18,55%, бінаризації растрових кольорових напівтонових зображень - на 17,40%, фільтрації растрових бінарних зображень - на 35,71%, скелетизації бінарних контурів деталей - на 25,77%, розпізнавання форм геометричних примітивів - на 49,53%, параметризації геометричних примітивів - на 18,61%. Це дозволяє зробити позитивний висновок щодо достовірності та ефективності розробленого комплексу методів.

2. Розроблений комплекс методів може бути використано в автоматизованих системах інженерного документообігу.

ВИСНОВКИ

Розв'язано актуальну наукову задачу розробки комплексу методів, що забезпечують підвищення якості попередньої обробки і векторизації растрових форматів контурів деталей машинобудівельних креслень:

1. На основі аналізу існуючих методів растр-векторного перетворення зображень креслень деталей встановлено, що досі не вирішені питання: збереження малорозмірних примітивів контурів деталей, підвищення якості бінаризації їх зображень з урахуванням характеристик яскравості, особливостей зашумлення, структурних спотворень скелетизованого контуру, недостовірного розпізнавання й параметризації геометричних примітивів із довільною орієнтацією. Особливості предметної області вимагають удосконалення існуючих або розробки нових спеціалізованих методів попередньої обробки і векторизації растрових форматів контурів деталей машинобудівельних креслень.

2. Розроблені правила коригування спотворень геометрії скелетів контурів деталей, у складі яких:

- правила коригування спотворення топології кутів скелета, засновані на застосуванні «шахової» метрики замість «манхетенської» і масок розпізнавання кутів контуру;

- правила коригування порушень зв'язності скелета, засновані на застосуванні розробленої корегуючої маски;

- правила коригування порушень топології скелета в точках перетину геометричних примітивів, засновані на застосуванні розроблених регенеруючих масок і таблиці вибору рішень.

3. Розроблено структурно-лінгвістичний метод векторизації, що забезпечує достовірне розпізнавання й параметризацію відрізків прямих, еліпсів (у тому числі кіл) та їх дуг із довільною орієнтацією, у складі якого:

- метод побудови моделі скелету контуру деталі у вигляді зорієнтованого зваженого графа; вершинами графу виступають характеристичні точки скелету

контур, які визначаються за допомогою розробленого набору шаблонів, а ребрами – сегменти геометричних примітивів скелету;

- метод кодування графа сегментів контуру деталі ланцюговими Фрімен-кодами із застосуванням нового способу огляду околиць точок контуру; метод усуває проблему втрати частини його точок і прискорює процес кодування використанням перспективних напрямків сканування скелета;

- методи розпізнавання й параметризації ребр графа контура деталі, засновані на використанні виявлених структурних закономірностей форм геометричних примітивів креслень деталей, а також вперше сформульованих правил синтаксичного аналізу ребр графа;

- метод розпізнавання композицій примітивів у сегментах контуру деталі, заснований на використанні вперше сформульованих правил рекурсивного бісекціонування й структурно-лінгвістичному аналізі виділених сегментів;

- метод синтезу й оптимізації вектор-контуру деталі, заснований на аналізі зорієнтованого зваженого графа розпізнаних і параметризованих геометричних примітивів з визначенням їх товщини та структур їх зв'язності.

4. Удосконалено методи усунення спотворень у бінарних зображеннях креслень деталей. Запропонований підхід передбачає додаткову обробку бінарного зображення розробленими методами:

- методом контурних масок, який видаляє фонові конгломерати чорних точок за рахунок сепарації точок зображення на контурні й фонові за формами утворених ними атомарних фігур;

- методом усунення контурних спотворень, який усуває чорну «бахрому» навколо контуру деталі й білу «бахрому» - в контурі деталі на основі апертурної просторової фільтрації зображення розробленими масками з асиметричними ядрами.

5. Отримали подальшого розвитку методи усунення спотворень растрових кольорових півтонових зображень креслень деталей, що забезпечують усунення

остаточного шуму без втрати малорозмірних примітивів їх контурів. Мета досягається за рахунок:

- ітеративного розмиття шуму σ -фільтром без порушення топології контуру деталі й подальшого зменшення інтенсивності ослабленого шуму автоматичним контрастуванням зображення; параметри σ -фільтра адаптуються до рівня контрастності зображення й інтенсивності шуму;

- апертурної обробки зображення розрідженими ядрами фільтрів підвищення чіткості з адаптацією виду й розміру ядра до рівня шуму; у результаті компенсуються спотворення малорозмірних примітивів.

6. Отримали подальшого розвитку методи бінаризації півтонових зображень, що забезпечують збереження топології контурів деталей:

- розвинуто метод оцінки глобальних порогів бінаризації; на основі аналізу форм і співвідношення мод світла й тіні у гістограмах яскравості;

- розвинуто метод оцінки локальних адаптивних порогів бінаризації; на основі аналізу балансу яскравості областей інтересу з квазі-бімодальними гістограмами враховуються локальні особливості яскравості зображень із адаптацією до різних видів носіїв креслення.

7. Розроблено інформаційну технологію попередньої обробки і векторизації растрових форматів контурів деталей, характерною рисою якої є спеціалізація на предметну область і комплексність рішень на всіх етапах растр-векторного перетворення зображень креслень деталей. Комплексний підхід до поетапного розв'язання задачі дозволив істотно покращити метрики оцінки якості: фільтрації растрових кольорових півтонових зображень - на 18,55%, бінаризації фільтрованих зображень - на 17,40%, фільтрації бінарних зображень - на 35,71%, скелетизації бінарних контурів деталей - на 25,77%, розпізнавання форм геометричних примітивів - на 49,53%, параметризації геометричних примітивів - на 18,61%. Це підтверджує достовірність й ефективність розробленого комплексу методів. Розроблений комплекс методів зорієнтовано на використання в автоматизованих системах інженерного документообігу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булычев Д. С. Векторизация – мифы, реальность, альтернативы, или как работать со сканированными чертежами / Д. С. Булычев, Е. А. Рангаева // САПР и графика. – 2011. – №1. – С. 112–117.
2. Летин А. С. Ландшафтный дизайн на компьютере / А. С. Летин, О. С. Летина. – М.: ДМК-Пресс. – 2014. – 216 с.
3. Dori D. Algorithms for 2D Engineering Drawings Recognition: Implementation and Evaluation // Dori D., Liu W. – LAP LAMBERT Academic Publishing.- 2014 – 88 p.
4. Hori O. O. Document Analysis and Recognition / O. O. Hori, S. T. Tanigawa // Raster-to-Vector Conversion by Line Fitting Based on Contours and Skeletons. – Kawasaki, Japan. – 1993. – P. 272-281.
5. Лебедев И. В. Использование сканированных чертежей в САПР / И. В. Лебедев // CADmaster. – 2010. – №1. – С. 213-216.
6. Путятин Е. П. Обработка изображений в робототехнике / Е. П. Путятин, С. И. Аверин. – М.: Машиностроение. – 1990. – 320 с.
7. Шлезингер М. И. Математические средства обработки изображений / М. И. Шлезингер. – К.: Наук. думка. – 1989. – 198 с.
8. Павлидис П. У. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / П. У. Павлидис. – М.: Радио и связь. – 1986. – 400 с.
9. Дуда Р. П. Распознавание образов и анализ сцен / Р. П. Дуда, П. Г. Харт. – М.: Мир. – 1976. – 512 с.
10. Фоли Д. Р. Основы интерактивной машинной графики. Т. 2./ Д. Р. Фоли, Д. А. Вен. – М.: Мир. – 1985. – 368 с.
11. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры / Л. М. Местецкий – М.: Физматлит. – 2009. – 288 с.

12. Денисова В. С. Автоматные алгоритмы синтеза образов / В. С. Денисова, Ю. Б. Деглина, В. А. Козловский // Искусственный интеллект. – 2008. – №3. – С. 290-295.

13. Козловский В. А. Построение автоматных моделей простейших графических примитивов / В. А. Козловский, В. С. Молчанова // Искусственный интеллект. – 2010. – №4. – С. 375-380.

14. Виды и комплектность конструкторских документов. Единая система конструкторской документации: ГОСТ 2.102–68. – [Действителен от 1971-01-01]. – М.: СтандартИнформ, 2007. – 12 С. (Межгосударственный стандарт).

15. Линии. Единая система конструкторской документации: ГОСТ 2.303–68. – [Действителен от 1971-01-01]. – М.: ИПК, Издательство стандартов, 2000. – 7 С. (Межгосударственный стандарт).

16. Шрифты чертёжные. Единая система конструкторской документации: ГОСТ 2.304–81. – [Действителен от 1983-03-28]. – М.: Издательство стандартов, 2007. – 22 С. (Межгосударственный стандарт).

17. Нанесение размеров и предельных отклонений. Единая система конструкторской документации: ГОСТ 2.307–68. – [Действителен от 1971-01-01]. – М.: СтандартИнформ, 2007. – 22 с. (Межгосударственный стандарт).

18. Абламейко С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С. В. Абламейко, Д. М. Лагуновский. – Минск: Амалфея. – 2000. – 304 с.

19. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Н. Н. Красильников. – СПб: БХВ-Петербург. – 2011. – 608 с.

20. Методы цифровой обработки сигналов для решения прикладных задач. Монография / под ред. В. И. Марчука. – М.: Радиотехника. – 2012. – 128 с.

21. Огнев И. В. Обработка изображений методами математической морфологии в ассоциативной осцилляторной среде / И. В. Огнев,

Н. А. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – №4. – С. 87-98.

22. Ухоботов В. И. Избранные главы теории нечётких множеств: учеб. пособие / В. И. Ухоботов. – Челябинск.: Издательство Челябинского государственного университета. – 2011. – 245 с.

23. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит. – 2001. – 221 с.

24. Буча В. В. Математическая морфология на сжатом бинарном растре: применение в ГИС / В. В. Буча, С. В. Абламейко // Искусственный интеллект. – 2006. – № 2. – С. 21-24.

25. Фильтрация чёрно-белых изображений с использованием мягкой математической морфологии: Материалы международного конгресса по информатике: информационные системы и технологии (Минск, 4-7 ноября 2013) / Минск, БГУ. – Минск, 2013. – С. 23-28.

26. Havangi R. Adaptive neuro-fuzzy extended Kalman filtering for robot localization / R. Havangi, M. A. Nekoui, M. Teshnehlab // International journal of computer science. – 2010. – vol. 7, no. 2.– P. 15-23.

27. Амосов О. С. Адаптивная нелинейная фильтрация случайных последовательностей на основе нейронных сетей и нечеткой логики / О. С. Амосов// Приборы и системы. Упр., контроль, диагностика. – 2004. – № 4. – С. 48-53.

28. K. Z. Arakawa. Median filter based on fuzzy rules and its application to image restoration / K. Z. Arakawa // Fuzzy Sets and Systems. – 2006. – №1. – P. 3-13.

29. Arunkumar S. I. Fuzzy Filters to the Reduction of Impulse and Gaussian Noise in Gray and Color Images / S. I. Arunkumar, R. T. Akula, and R. T. Gupta // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – №1. – P. 398-402.

30. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений: в 2-х томах. Т. 1. / У. К. Прэтт. – М.: Мир. – 1982. – 315 с.

31. Гонсалес Р. С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. С. Гонсалес, Р. Э. Вудс, С. А. Эддинс. – М.: Техносфера. – 2006. – 616 с.
32. Курячий М. И. Пространственно-временная ранговая обработка изображений в видеоинформационных системах: моногр. / М. И. Курячий, А. Г. Костевич, И. В. Гальчук. – Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – 120 с.
33. Мучник М. М. Предпроцессорная обработка изображений / М. М. Мучник // Инженерия программного обеспечения. – 2012. – №2(10). – С. 35-38.
34. Вдовин В. А. Метод адаптивной бинаризации растрового изображения / В. А. Вдовин, А. В. Муравьев, А. А. Певзнер // Ярославский педагогический вестник. – 2012. – №4, Т. III. – С. 65-69.
35. Фурман Я. А. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений / Я. А. Фурман, А. Н. Юрьев, В. В. Яншин. – Красноярск: Издательство Красноярского университета. – 1992. – 248 с.
36. Otsu N. Y. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Y. Otsu // IEEE transactions on systems, man and cybernetics. – 1979. – № 1. – P. 62-66.
37. Navon E. F. Color image segmentation based on adaptive local thresholds/ E. F. Navon, O. A. Miller, A. N. Averbuch // Image and Vision Computing. – 2005. – №3. – P. 69-85.
38. A Hybrid Binarization Technique for Document Images / V. Sokratis and others // Learning Structure and Schemas from Documents. – Springer Berlin Heidelberg. – 2011. – P. 165–179.
39. Chiang J. Y. A New Algorithm for Line Image Vectorization / J. Y. Chiang, S. C. Tue, and Y. C. Leu // Pattern Recognition. – 1998. – №3. – P. 1541–1549.
40. Jagna A. An efficient image independent thinning algorithm / A. Jagna // International journal of advanced research in computer and communication engineering. – 2014. – vol.3, issue 10. – P. 8309-8311

41. Wu R. Y. A new one-pass parallel thinning algorithm for binary images / R. Y. Wu, W. H. Tsai // Pattern recognition letters. – 1992. – №. 10. – P. 715–723.
42. Zhang T. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T. Y. Zhang, C. Y. Suen // Communications of the ACM. – 1984. – №27, Т. 3. – P. 236–239.
43. Кушнир О. А. Сравнение формы бинарных растровых изображений на основе скелетизации / О. А. Кушнир // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – №3. – С. 252-263.
44. Roseborough J. B. Partial Eigenvalue Decomposition for Large Image Sets Using Run-Length Encoding / J. B. Roseborough, H. A. Murase // Pattern Recognition. – 1995. – №3. – P. 421–430.
45. Tan J. O. A Global Line Recognition Approach to Scanned Image of Engineering Drawings Based on Graphics Constraint / J. O. Tan, Q. R. Peng // Chinese J. Computers. – 1994. – №8. – P. 561–569.
46. Zou R. W. Line Interpolation Method and Error Estimation Based on Run Length Coding / R. W. Zou, Z. R. Cai, and F. A. Zhang // J. Software. – 1997. – №8. – P. 404-410.
47. Баранов Р. П. Алгоритмы скелетизации объектов на изображении / Р. П. Баранов, М. Н. Фаворская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. - №7, том I. – С. 349.
48. Клубков И. М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения / И. М. Клубков // Вестник ДГТУ. – 2001. - №1(7). – С. 9-16.
49. Колючкин В. Я. Алгоритмы контурной сегментации и распознавания образов объектов систем технического зрения / В. Я. Колючкин, К. М. Нгуен // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2013. - №4. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/548084.html> (дата обращения: 01.02.2016).

50. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю. В. Визильтер и др. – М.: Физматкнига. – 2010. – 672 с.
51. Тропченко А. Ю. Методы вторичной обработки изображений и распознавания объектов: учебное пособие / А. Ю. Тропченко. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2012. – 52 с.
52. Barricco G. A. Conformal Mapping-Based Image Processing: Theory and Applications / G. A. Barricco, A. M. Olivero, E. Rodrigues, and F. J. Safar // Journal of visual communication and image representation. – 1995. – №6. – P. 35-51.
53. Arcelli C. Parallel thinning of binary pictures / C. Arcelli, L. P. Cordella, S. Levialdi // Electronic Letters. – 1975. – №11(7). – P. 148-149.
54. Improved low complexity fully parallel thinning algorithm: In Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP'99), (Venice, 27–29.09.1999). – Venice, 1999. – P. 215 - 220.
55. Chin R. T. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation / R. T. Chin, H. K. Wan, D. L. Stover // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1987. – №40(1). – P. 30-40.
56. Eckhardt U. Invariant thinning and distance transform/ U. Eckhardt, G. Maderlechner // Theoretical Foundations of Computer Vision. – 1993.– vol.11. – P. 1115–1144.
57. Guo Z. Fast parallel thinning algorithms/ Z. Guo, R. W. Hall // VGIP: Image Understanding. – 1992. – Volume 55, Issue 3. – P. 317–328.
58. Hall R. W. Fast parallel thinning algorithms: Parallel speed and connectivity preservation / R. W. Hall // Communications of the ACM. – 1989. – Volume 32, Issue 1. – P. 124-131.
59. Holt C. M. An improved parallel thinning algorithm / C.M. Holt, A. Stewart, M. Clint // Communications of the ACM. – 1987. – Volume 30, Issue 2. – P. 156-160.
60. Jang B. K. Reconstructable parallel thinning / B. K. Jang, R. T. Chin // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 1993. – Volume 07, Issue 05. – P. 1145-1181.

61. Pavlidis T. An asynchronous thinning algorithm / T. Pavlidis // Computer Graphics and Image Processing. – 1982. – Volume 20, Issue 2. – P. 133-157.
62. Rutovitz D. Pattern recognition / D. Rutovitz // Journal of the Royal Statistical Society. – 1966. – vol. 129. – P. 504-530.
63. Choy S.S.O. New single-pass algorithm for parallel thinning / S.S.O. Choy, C.S.T. Choy, W. C. Siu // CVIU. – 1995. – vol. 62(1). – P. 69-77.
64. Розенфельд А. С. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин / А. С. Розенфельд. – М.: Мир. – 1992. – 272 с.
65. Анисимов Б. В. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учебное пособие для студентов вузов / Б. В. Анисимов, В. Д. Курганов, В. К. Злобин. – М.: Высшая школа. – 1983. – 295 с.
66. Фурман Я. А. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / А. В. Кревецкий, А. К. Передреев, А. А. Роженцов. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
67. Гонсалес Р. С. Цифровая обработка изображений / Р. С. Гонсалес, Р. Э. Вудз. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
68. Стругайло В. В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений / В. В. Стругайло // Наука и образование. – 2012. – №5 – С. 270-281.
69. Фу К. Э. Структурные методы в распознавании образов / К. Э. Фу. – М.: Мир. – 1977. – 320 с.
70. Сорокин А. И. Распознавание простых линий на изображении / А. И. Сорокин, С. А. Запрягаев // Прикладная информатика. – 2009. – №4. – С. 76–84.
71. Deans R. The Radon Transform and Some of Its Applications / R. Deans // New York: John Wiley & Son. – 1983. – P. 304
72. Федотов Н. Г. Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов. – М.: Физматлит. – 2010. – 304 с.
73. Кудрина М. А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий / М. А. Кудрина // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. – 2014. – №4 (2). – С. 476-478.
74. Федотов Н. Г. Методы стохастической геометрии в распознавании образов / Н. Г. Федотов. – М.: Радио и связь, 1990. – 142 с.

75. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

76. Ning J. Interactive image segmentation by maximal similarity based region merging / J. Ning, L. Zhang, D. Zhang, C Wu // Pattern recognition. – Vol. 43, Iss. 2. – 2010. – P. 445 – 456.

77. Fischler M. A. Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. / M. A. Fischler, R. C. Bolles // Communications of ACM. –1981.– vol 6(24). – P. 381-395.

78. Пат. US6426977 B1 USA, EP1186113A1, WO2000076079A1, WO200007 6079B1. System and method for applying and removing Gaussian covering functions / Lee H.B.; Atlantic Aerospace Electronics Corporation. – US 09/325,539; заявл. 04.06.1999; опубл. 30.07.2002.

79. Хрящев Д. А. Об одном методе анализа с применением гистограмм / Д. А. Хрящев // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – №1. – С. 109-113.

80. Сергиенко А. В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Сергиенко. – Спб.: БХВ-Петербург. - 2013. – 768 с.

81. Синцов В. Н. Апертурный синтез в оптике / В. Н. Синцов, А. Ф. Запрягаев // Успехи физических наук. – 1974. – Том. 114, вып. 4. – С. 655-676.

82. Захаров Р. К. Методы повышения качества изображений в задачах распознавания // Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 8 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/08/16488> (дата обращения: 19.10.2015).

83. Писсанецки С. А. Технология разреженных матриц: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1988. – 410 с., ил.

84. Гашников М. В. Методы компьютерной обработки изображений / М. В. Гашников, Н. И. Глумов, Н. Ю. Ильясова. – М.: ФИЗМАЛИТ. – 2003. – 784 с.

85. Ковалевский В. Эффективная фильтрация и выделение границ / В. Ковалевский. [Электронный ресурс]. URL:

http://irtc.org.ua/image/app/webroot/Files/presentations/Kovalevskiy/Kovalevski_Effiziente_Filterung_und_Kantendetektion_Kurz.pdf (дата обращения: 26.12.2015)

86. Волков В. Ю. Пороговая обработка для сегментации и выделения протяженных объектов на цифровых изображениях / В. Ю. Волков, Л. С. Турнецкий // Информационно–управляющие системы. – 2009. – №5. – С. 10-13.

87. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений: в 2-х томах. Т.2. / У. К. Прэтт. – М.: Мир. – 1982. – 479 с.

88. Маслов А. М. Идентификация линейной искажающей системы с использованием ранговой обработки сигналов / А. М. Маслов, В. В. Сергеев// Компьютерная оптика. – М.: Наука. – 1990. – Вып. 6. – С.97-102.

89. Проверка нормальности распределения результатов наблюдений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http:// studopedia.net/8_47359_proverka-normalnosti-raspredeleniya-rezultatov-nablyudenyi.html](http://studopedia.net/8_47359_proverka-normalnosti-raspredeleniya-rezultatov-nablyudenyi.html) (дата обращения: 25.02.2015).

90. Zhou Wang. A Universal Image Quality Index / Zhou Wang and C. Alan Bovik // IEEE Signal Processing Letters. – 2002. – vol. 9, no. 3. – P. 81-84.

91. Колмогоров А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. – М.: Наука. – 1976. – 544 с.

92. Молчанова В. С. Задача классификации сложных специфических объектов на растровых изображениях технических чертежей / В. С. Молчанова // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – №1(15). – С. 155–161.

93. Крылов А. Б. Модуль предварительной векторизации растровых монохромных изображений гибридного редактора SpotLight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://it-claim.ru/Library/Books/ITS/wwwbook/ist4b/its4/kryilov.htm> (дата обращения: 25.02.2015).

94. Упрощенный алгоритм классификации объектов растровых изображений: сб. тезисов докладов науч.–практ. конф. «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці», (Мариуполь, 11–13 июня 2013) / Приазовский

государственный технический университет. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – С. 131–132.

95. Повышение разрешающей способности активно–импульсных телевизионно–вычислительных систем с использованием двумерной апертурной коррекции и итерационных алгоритмов: сб. тезисов X междунар. науч.–техн. конф. «Распознавание – 2012», (Курск, 15–17 мая 2012) / Курск: Наука и технологии, 2012. – С. 310–312.

96. Automatic 2-D and 3-D noise filtering for high–quality television receivers: Proceedings of the 7th International Workshop on HDTV, (Torino, October 1994) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.ics.ele.tue.nl/~dehaan/pdf/13_IWHDTV94.pdf (дата обращения: 25.12.2015).

97. Википедия: свободная энциклопедия: на русском языке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Среднеквадратическое отклонение](http://uk.wikipedia.org/wiki/Среднеквадратическое_отклонение) (дата обращения: 25.12.2015).

98. Rosenfeld A. Connectivity in digital pictures / A. Rosenfeld // Journal of the Association for Computer Machinery. – 1970. – Volume 17, Issue 1. – P. 146-160.

99. Бурса О. Г. Теорія алгоритмів. Алгоритмізація. Інженерний підхід. Навчальний посібник / О. Г. Бурса, В. С. Молчанова. – Маріуполь: ПДТУ, 2009. – 313 с.

100. Молчанова В. С. Восьмисвязный асимметричный алгоритм скелетизации бинарных изображений / В. С. Молчанова // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – №2. – С. 43–50.

101. Кудрявцев В. Б. Введение в теорию автоматов / В. Б. Кудрявцев, С. В. Алешин, А. С. Подколзин. – М.: Наука. – 1985. – 320 с.

102. Гренадер У. Лекции по теории образов / У. Гренадер. В 2–х томах: Т.1. – М.: Мир, 1979. – 382 с.

103. Хаггарт Р. Дискретная математика для программистов / Р. Хаггарт – М.: Техносфера. – 2012. – 400 с.

104. Молчанова В. С. Автоматный алгоритм распознавания геометрических примитивов на растровом изображении / В. С. Молчанова // Науковий

вісник Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2012. – Т. III, № 2. – С. 49–55.

105. Image segmentation for text extraction: 2nd International Conference on Electrical, Electronics and Civil Engineering, (Singapore April 28-29, 2012) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://psrcentre.org/images/ext-raimages/18.%20412634.pdf> (дата обращения: 01.02.2016).

106. Темнов К. А. Методы построения специализированных векторизаторов для конструкторской документации электронных средств: дис. ... канд. техн. наук, Московский Авиационный Ин-т, Москва, 2010.

107. Мищеряков Ю. В. Математический и программный инструментарий автоматизации процесса преобразования конструкторской документации в электронный вид: дис. ... канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2003.

108. Москаленко С. В. Разработка методов и алгоритмов векторизации растровых изображений в САПР: дис. ... канд. техн. наук, СПб гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики, СПб, 2011.

109. Основные требования к чертежам: ГОСТ 2.109–73. – [Действителен от 1974-01-07]. – М.: СтандартИнформ, 2001. – 28 с. (Межгосударственный стандарт).

110. Финкельштейн Э. AutoCAD 2010 и AutoCAD LT 2010. Библия пользователя. – М.: Диалектика. – 2011. – 1360 с.

111. Ablameyko S. V. Recognition of engineering drawing entities: review of approaches / S. V. Ablameyko, S. Uchida // International Journal of Image and Graphics. – 2007. - Vol. 7, No. 4. – P. 709–733

112. A System For Automatic Recognition of Engineering Drawing Entities: In Proceedings Fourteenth International Conference On Pattern Recognition (ICPR, 98), (Brisbane, Qld., 16 -20 Aug 1998). – Washington, 1998. –vol. 2. - P. 1157 - 1159.

113. Куссуль М. Э. Кодирование контуров, представленных кривыми Безье в задачах нейросетевой классификации / М. Э. Куссуль // Математичні машини і системи. – 2004. - №3. – С. 17-30.

114. Паржин Ю. В. Векторизация структуры контурных изображений при решении задач распознавания / Ю. В. Паржин, Н. Ю. Любченко, Н. М. Не-нашева // Системи обробки інформації. – 2004. – вип. 3. – С. 157 – 161.
115. Русын Б. П. Структурно-лингвистические методы распознавания изображений в реальном времени / Б. П. Русын. – К.: Наук. думка.- 1986. – 125 с.
116. Лингвистические методы в задачах распознавания изображений / В. А. Тупиков, В. А. Павлова, С. Н. Крюков и др. // Известия ЮФУ, Технические науки. – 2015. - №1(162). – С. 142-151.
117. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для ВУЗов. / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк – М.: Радио и связь. – 1990. - 256 с.
118. Chen F. An empirical identification method of Gaussian Blur parameter for image deblurring / Fen Chen, Jianglin Ma // IEEE transactions on signal processing. – 2009. - №7(57). – P. 2467-2478.
119. Соловьев Н. В. Улучшение качества растровых изображений: учебное пособие для ВУЗов / Н. В. Соловьев, А. М. Сергеев. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2010. – 158 с.
120. A line drawings degradation model for performance characterization: In Proceedings 17th International Conference of Document analysis and recognition (ICDAR'2003), (Hong Kong, 03–06.08.2003). – IEEE, 2003. – P. 1020 - 1024.
121. Фисенко В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие для ВУЗов / В. Т. Фисенко, Н. Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2008. – 192 с.
122. Методы компьютерной обработки изображений / Под. ред. В. А. Сойфера. – М.: Физматлит. – 2003. – 784 с.
123. Елисеева И. И. Общая теория статистики: учебник / И. И. Елисеева, М.М. Юзбашев // Под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика. – 2004. – 656 с.

124. Самойлов В. Ф. Качественные показатели телевизионного изображения / В. Ф. Самойлов. – М.- Л.: Госэнергоиздат. – 1963. – 66 с.
125. Yang Y. An adaptive logical method for binarization of degraded document images / Y. Yang, H. Yan // Pattern Recognition. – 2000. – vol. 33. – P. 787-807.
126. Виленкин Н. Я. Математический анализ. Дифференциальное исчисление / Н. Я. Виленкин, Е. С. Куницкая, А. Г. Мордкович. – М.: Просвещение. – 1978. – 161 с.
127. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук. – Новосибирск: изд-во НГТУ. – 2002. – 352 с.
128. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на Lab-View и IMAQ / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтова, В. А. Князь и др. – М.: ДМК-Пресс. – 2007. – 454 с.
129. Определение топологии слоев нано – и микроэлектронных структур интерференционным методом / А. М. Каменский, А. В. Ушаков, С. Н. Баршутин и др. // Вопросы современной науки и практики. – 2011. - №5(36).– С. 30-35.
130. An adaptive thresholding method for binarization of blueprint images / Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, (Brisbane, Qld., 22 Aug 1999-25 Aug 1999). – IEEE, 1999. – vol.2. - P. 931 - 934.
131. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Р. Блейхут. – М.: Книга по требованию. – 2013. – 566 с.
132. Николаев Д. П. Критерии оценки качества в задаче автоматизированной настройки алгоритмов бинаризации / Д. П. Николаев, А. А. Сараев // Труды ИСА РАН. – 2013. – т.63(3). – С. 85-94.
133. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для ВУЗов / В. Е. Гмурман. – 2003. – М.: Высш. школа. – 479 с.

134. Тропченко А. А. Методы вторичной обработки и распознавания изображений: учебное пособие / А. А. Тропченко, А. Ю. Тропченко – 2015. – СПб.: Университет ИТМО. – 215 с.

135. Чичкарев Е. А. Модель и метод векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей / Е. А. Чичкарев, В. С. Молчанова // Проблемы інформаційних технологій. – 2016. – №1(15). – С. 64–74.

136. Пат. No. 44614. A thinning method for gray-scale images / S. S. Yu and W. H. Tsai.; Republic of China Patent. – 1991.

137. Couprie M. Note on Fifteen 2D Parallel Thinning Algorithm / M. Couprie // IGM2006. – Université de Marne-la-Vallée. – 2006. – 01.

138. Молчанова В. С. Адаптивный пороговый алгоритм бинаризации растровых изображений технических чертежей / В. С. Молчанова // Радио-электроника, информатика, управление. – 2015. – №2. – С. 62-70.

139. Молчанова В. С. Разработка гибридного адаптивного метода подавления шума в растровом образе чертежа детали / В. С. Молчанова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №4(74). – С. 35-43.

140. Гудаев О. А. Подбор модели дискретной прямой для ограниченного 2D-пространства графической сетью SPIRAL / О. А. Гудаев // Искусственный интеллект. – 2009. – №4. – С. 525-541.

141. Калмыков В. Г. Структурный метод распознавания отрезков цифровых прямых в контурах бинарных изображений / В. Г. Калмыков // Искусственный интеллект. – 2002. – №4. – С. 450-457.

142. Вишневский В. В. Структурный анализ цифровых контуров изображений как последовательностей отрезков прямых и дуг кривых / В. В. Вишневский, В. Г. Калмыков // Искусственный интеллект. – 2004. – №3. – С. 445-455.

143. Murray J. M. Evaluating performance in three-dimensional fluorescence microscopy / P. L. Appleton, J. R. Swedlow, J. C. Waters // Journal of Microscopy. – 2007. – 228(3). – P. 390–405.

144. Thompson, M. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.phys.cwru.edu/courses/p431/notes-2003/node123.html> (дата обращения: 01.02.2016).
145. Lee J. S. Digital image smoothing and the sigma filter / J. S. Lee // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1983. – Vol. 24. – Issue 2. – P. 255-269.
146. Yan Solihin, C. G. Leedham. Integral Ratio: A New Class of Global Thresholding Techniques for Handwriting Images // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1999. - Vol. 21, No. 8. – P. 761-768.
147. Chan H. P. Digital mammography observer performance study of the effects of pixel size on the characterization of malignant and benign microcalcifications / H. P. Chan, M. A. Helvie, B. Sahier // Academic Radiology. - 2001. - no. 8. - P. 454–466.
148. Zhou C. Computer image analysis: Estimation of breast density on mammograms / C. Zhou, H. P. Chan, N. Petrick // Medical Physics. - 2001. - no. 6. - P. 1056–1068.
149. Бурса А. Г. Комплекс методов фильтрации сканированных изображений графиков функций / А. Г. Бурса, В. С. Молчанова // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2016. - 2(33). - С.159-168.

ДОДАТОК А.

**АКТИ ПРО ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**



Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
ДВНЗ «ПДТУ»

вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, тел./факс (0629) 33 34 16, факс (0629) 52 99 24
E-mail: office@pstu.edu, Web: http://www.pstu.edu, Код ЄДРПОУ 02070812

03.10.2017

№ 76/10-453

На №

Від

Довідка

про впровадження у навчальний процес матеріалів кандидатської дисертації
Молчанової Віри Сергіївни, старшого викладача кафедри інформатики
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
за темою «Комплекс методів попередньої обробки і векторизації
растрових зображень машинобудівельних креслень деталей»

Надана довідка підтверджує, що науково-методичні матеріали і прикладні результати, які представлені в кандидатській дисертації Молчанової В.С., старшого викладача кафедри інформатики, за темою «Комплекс методів попередньої обробки і векторизації растрових зображень машинобудівельних креслень деталей» впроваджені і використовуються в навчальному процесі кафедри інформатики факультету інформаційних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Так, при підготовці бакалаврів за напрямком 6.040302 «Інформатика» у програмі дисципліни «Обчислювальна геометрія і комп'ютерна графіка», впроваджені теоретичні і прикладні аспекти усунення напівтонових і бінарних спотворень зображень, бінаризації напівтонових кольорових зображень, що описані у розділах дисертації: 2.1 «Комплекс методів усунення растрових кольорових напівтонових зображень креслень деталей» та 2.2 «Комплекс методів бінаризації растрових кольорових напівтонових фільтрованих зображень креслень деталей». Запропонована до використання методика усунення напівтонових і бінарних спотворень, що зберігає дрібні деталі зображення за рахунок раціонального вибіру параметрів і масок фільтрів з множини можливих.

При проведенні навчального процесу з магістрами спеціальностей 8.04030201 «Інформатика», 8.18010045 «Консолідована інформація», 122 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» з дисципліни «Системи штучного інтелекту» впроваджені теоретичні і прикладні аспекти векторизації бінарних растрових скелетів контурів, що описані у розділі дисертації 3 «Комплекс методів векторизації растрових бінарних контурів деталей». Запропоновано до використання структурно-лінгвістичний метод розпізнавання у контурах відрізків прямих, кіл, еліпсів, дуг кіл та дуг еліпсів довільної орієнтації, що зберігає топологію контуру зображення за рахунок використання запропонованих у дисертації методів кодування контурів та подальшого структурно-лінгвістичного аналізу цих кодів.

Також при виконанні студентами курсових, дипломних і магістерських робіт використовувалися розроблені в кандидатській дисертації методи шумопригнічення і скелетизації растрових зображень.

Включення матеріалів і результатів дисертаційної роботи Молчанової В. С., які мають певну наукову новизну і практичну цінність, у навчальний процес кафедри інформатики сприяють його поліпшенню і подальшому удосконаленню.

Перший проректор

Завідувач кафедри інформатики

Погорелова О.Є. (0629) 44-62-04



В.М.Свченко

Є.А.Чичкарьов



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

“ АГ СТАЛЬ ”

Юридична адреса: 87524, Україна, м. Маріуполь, вул. Сеченова 63-а
Поштова адреса: 87539, Україна, м. Маріуполь, пр. Металургів 84-б
тел/факс: (0629) 53-05-55, 53-35-50, 52-88-01
e-mail: office@agsteel.com.ua
www.agsteel.com.ua
р/рах. № 2600800017954
в МФ АТ “Укресімбанк”, МФО 335957
код ЄДРПОУ 20330053 ІПН 203300505824

Исх. № 445 от 08.10.2014 г.

**Акт внедрения
системы автоматизированной конвертации растровых изображений технических
чертежей в формат САПР AutoCAD**

Настоящий акт составлен по результатам внедрения системы автоматизированной конвертации технических чертежей в формат САПР AutoCAD в условиях ООО АГСталь г. Мариуполь. Испытания проводились с 12.05.2014 по 12.09.2014 на образцах чертежей и их фрагментов различного качества. За указанный период обработано 950 тестовых образцов.

Система автоматизированной конвертации растровых изображений технических чертежей в формат AutoCAD представляет собой настольное приложение, работающее под управлением ОС Windows. Исходное изображение должно быть представлено в виде заранее подготовленного файла в одном из растровых форматов (bmp, jpg, png, и т.д.). Обработка изображения выполняется в несколько этапов. Результат, полученный в ходе выполнения каждого этапа, может быть откорректирован вручную.

В результате эксплуатации системы автоматизированной конвертации растровых изображений технических чертежей сокращено время, затрачиваемое сотрудниками предприятия на ввод в компьютер чертежей, хранящихся на бумажных носителях.

Работа соответствует направлению научных исследований Молчановой В.С., а ее результаты могут быть рекомендованы к использованию предприятиями машиностроительного и металлургического профиля при решении задачи ввода в компьютер чертежей с бумажных носителей.

Председатель наблюдательного совета
ООО АГ Сталь

Голубченко С.П.

Директор ТЭСК ООО АГ Сталь

Голубченко А.С.

Начальник отдела информационных систем

Жеребков О.П.



Продовження додатку А.



Пер. № _____ от 31.03.2015 г.

ПАО «Азовобщемаш»
Центр ИТ

**Акт о внедрении
результатов диссертационного исследования
Молчановой Веры Сергеевны**

Результаты диссертационной работы Молчановой Веры Сергеевны на тему: «Система автоматизированной конвертации растровых изображений технических чертежей в формат САПР AutoCAD» использованы в ПАО «Азовобщемаш» для преобразования чертежей деталей, представленных на бумаге, в формат AutoCAD. Методы анализа изображения, представленные в диссертационном исследовании, позволяют получить контур изображения, пригодный к векторизации средствами AutoCAD, а метод векторизации, основанный на построении графовой модели контура и описании фрагментов контура автоматными моделями, позволяет получить готовое векторное изображение, в формате пригодном для дальнейшей обработки.

Внедрение системы автоматизированной конвертации растровых изображений технических чертежей позволило сократить время, затрачиваемое сотрудниками предприятия на ввод в компьютер чертежей, представленных на бумаге.

И.о. директора центра
информационных технологий



Абрам А.И.

ДОДАТОК Б.

ТЕСТОВІ РАСТРОВІ ЗОБРАЖЕННЯ КРЕСЛЕНЬ ДЕТАЛЕЙ

Продовження додатку Б

НАБІР №1

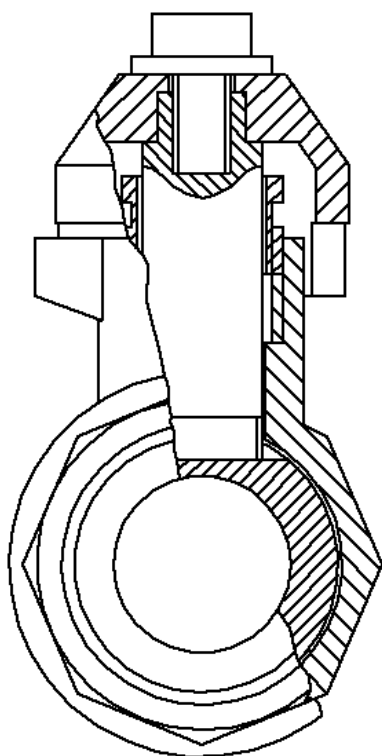


Рисунок Б.1 – Зображення №1
(281x550)

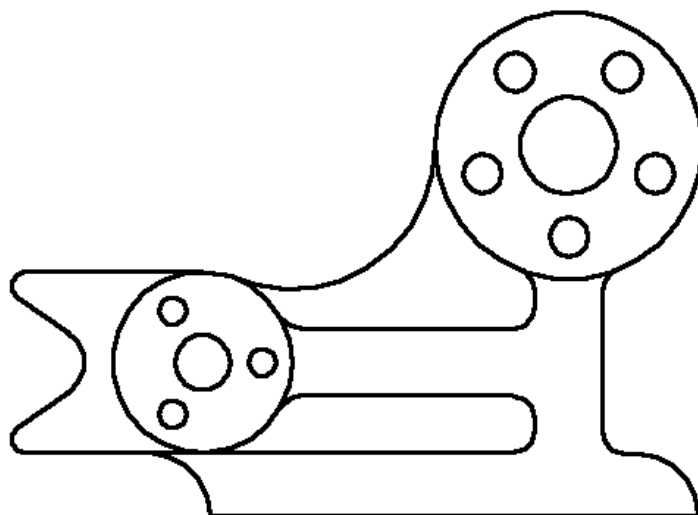


Рисунок Б.2 - Зображення №2
(482x352)

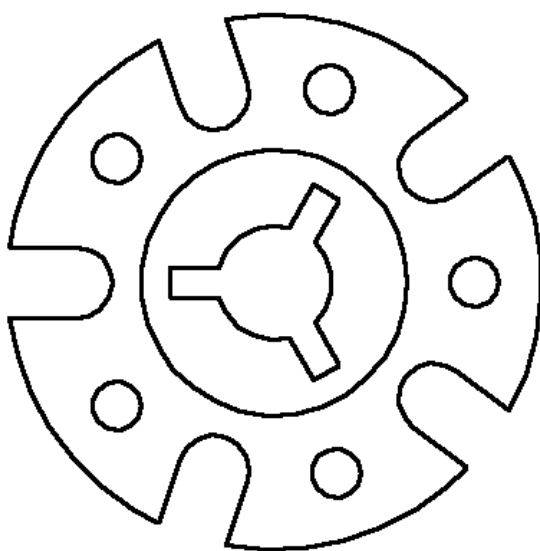


Рисунок Б.3 - Зображення №3
(381x382)

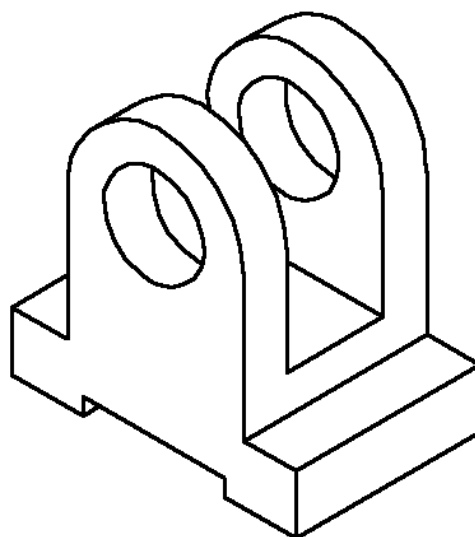


Рисунок Б.4 - Зображення №4
(383x424)

Продовження додатку Б

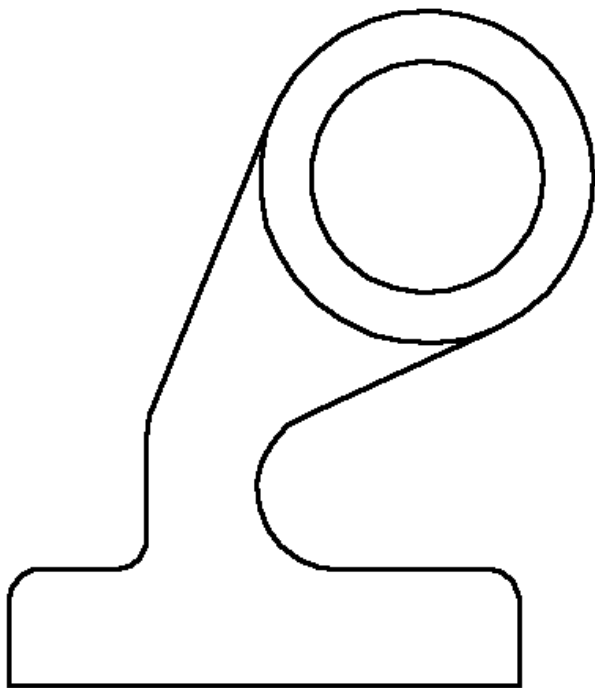


Рисунок Б.5 - Зображення №5
(384x440)

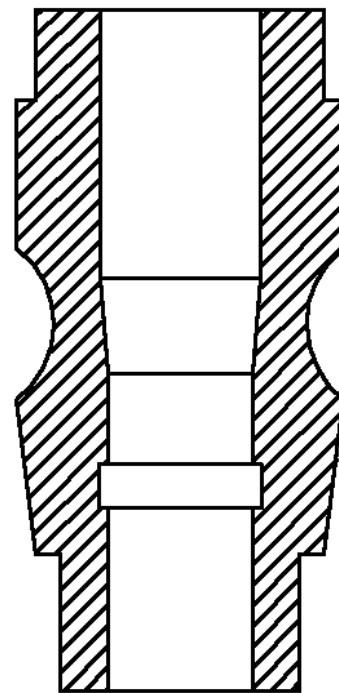


Рисунок Б.6 - Зображення №6
(367x545)

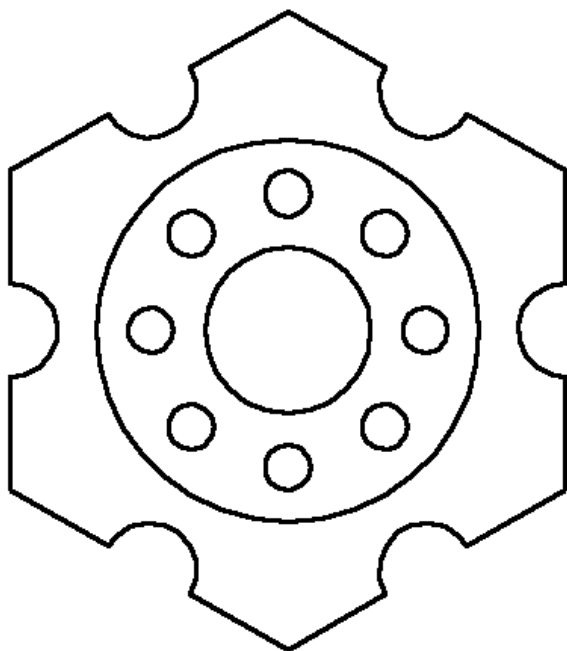


Рисунок Б.7 - Зображення №7
(383x434)

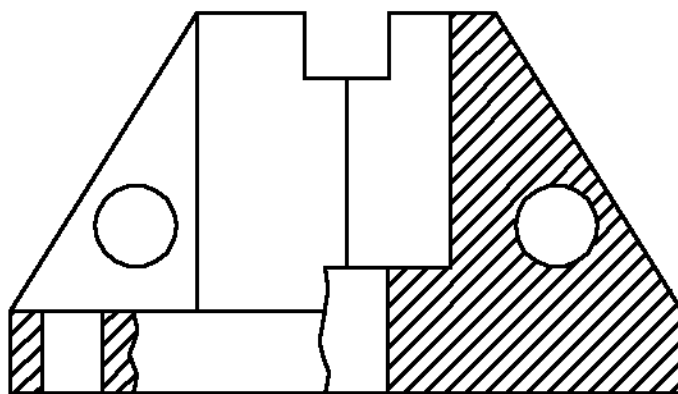


Рисунок Б.8 - Зображення №8
(540x311)

Продовження додатку Б

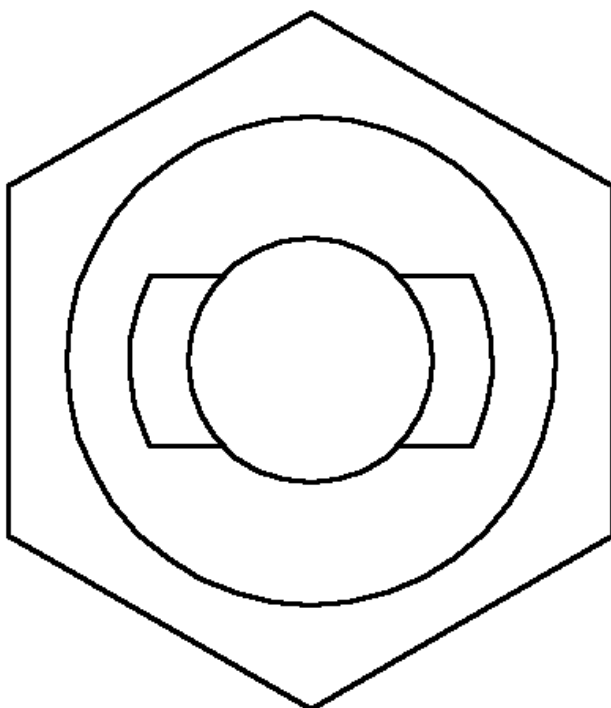


Рисунок Б.9 - Зображення №9
(404x455)

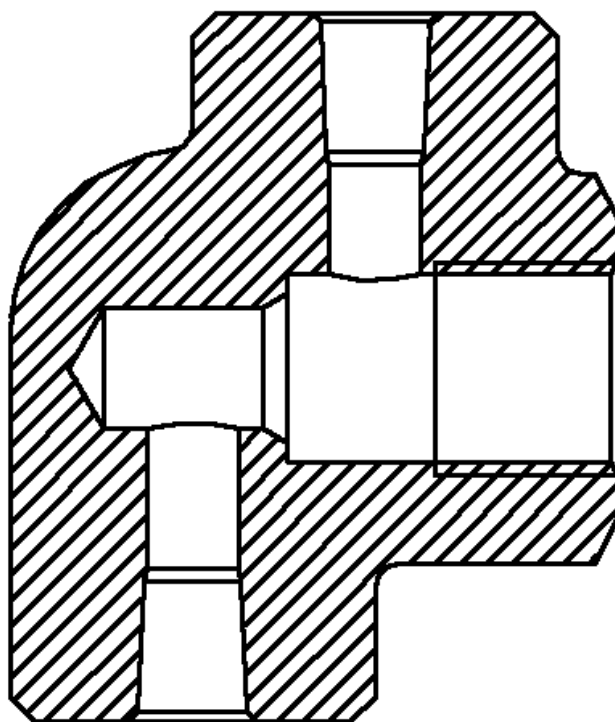


Рисунок Б.10 - Зображення №10
(386x453)

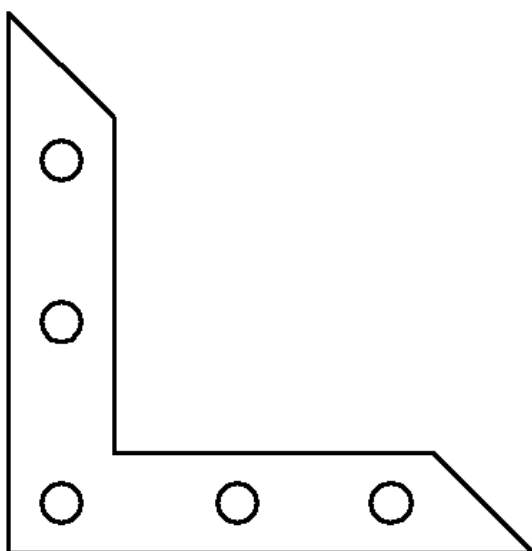


Рисунок Б.11 - Зображення №11
(386x393)

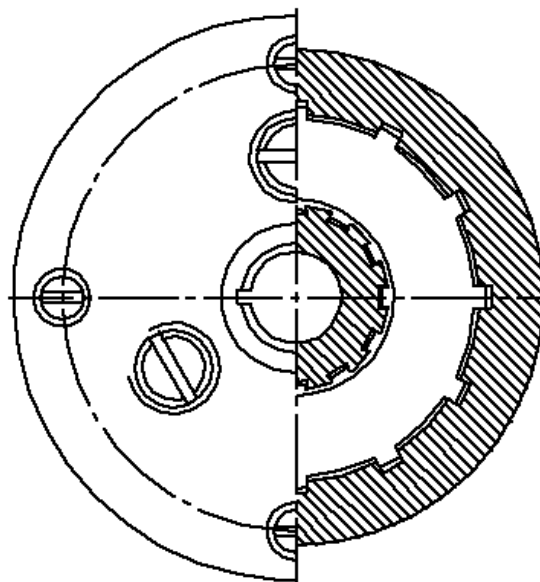


Рисунок Б.12 - Зображення №12
(365x388)

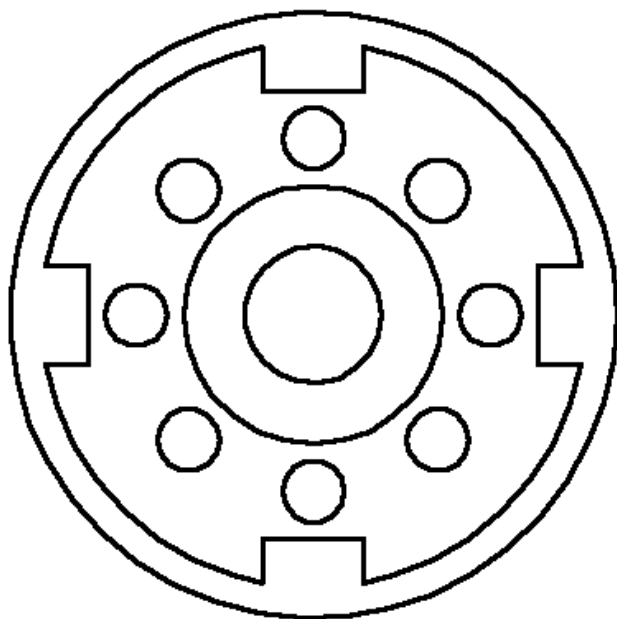


Рисунок Б.13- Зображення №13
(383x381)

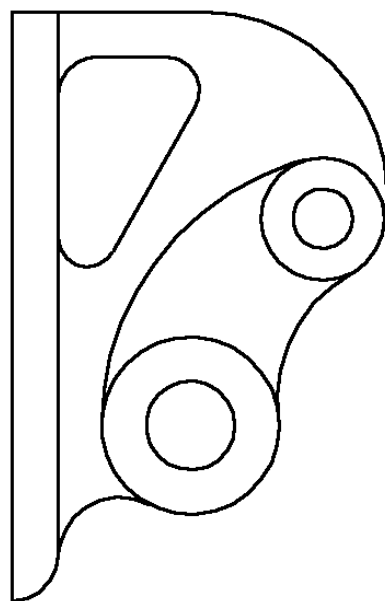


Рисунок Б.14 - Зображення №14
(357x552)

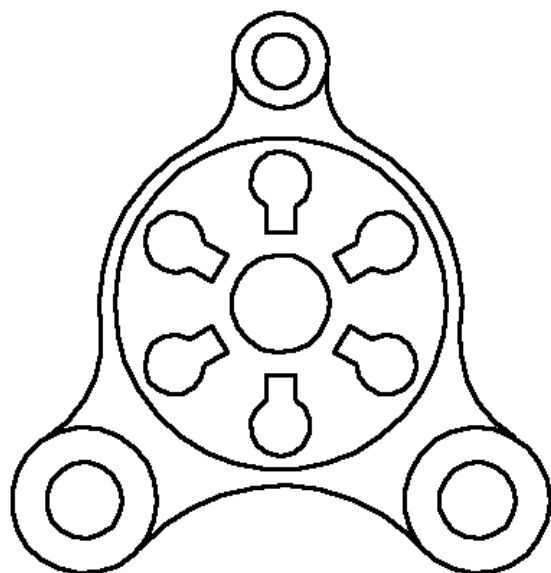


Рисунок Б.15 - Зображення №15
(392x399)

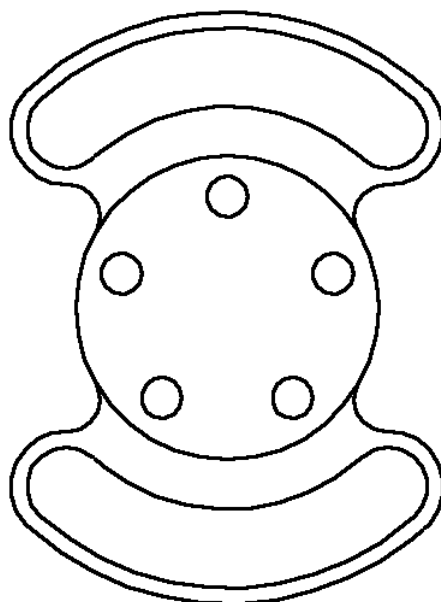


Рисунок Б.16 - Зображення №16
(386x507)

Продовження додатку Б

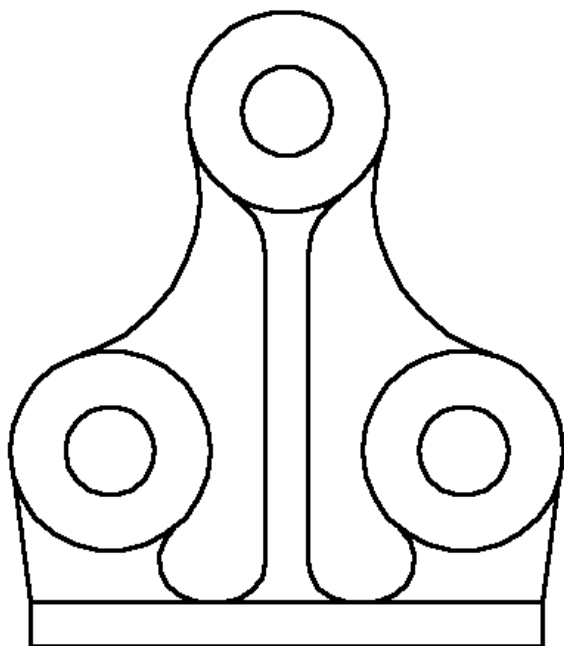


Рисунок Б.17 - Зображення №17
(387x443)

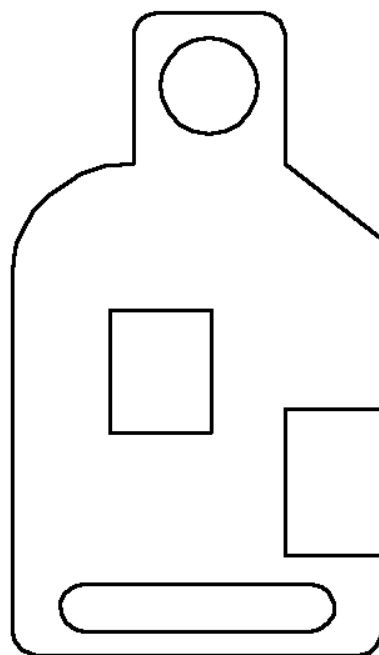


Рисунок Б.18 - Зображення №18
(314x527)

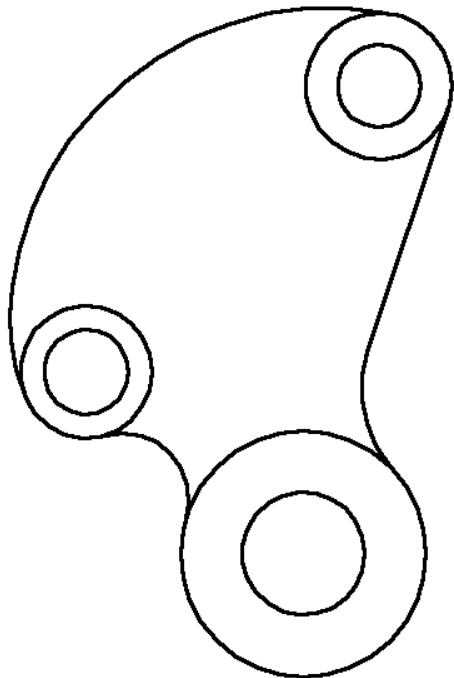


Рисунок Б.19 - Зображення №19
(365x548)

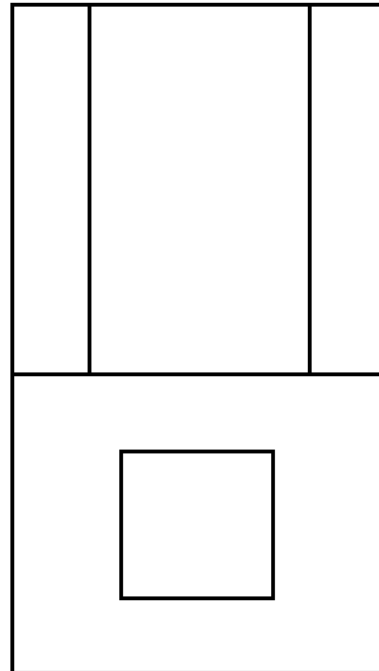


Рисунок Б.20 - Зображення №20
(316x546)

Продовження додатку Б

НАБІР №2

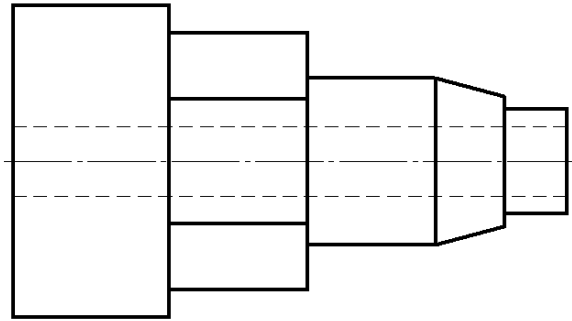


Рисунок Б.21 - Зображення №1 (624x361)

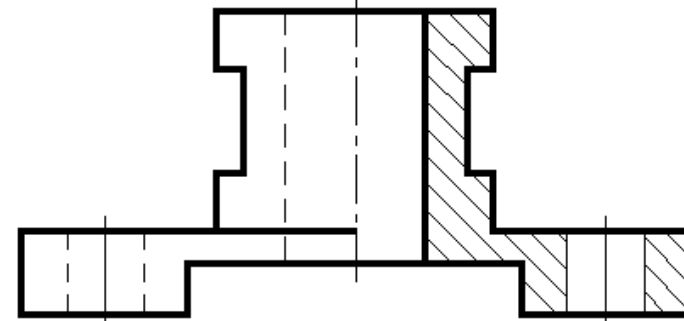


Рисунок Б.22 - Зображення №2 (406x196)

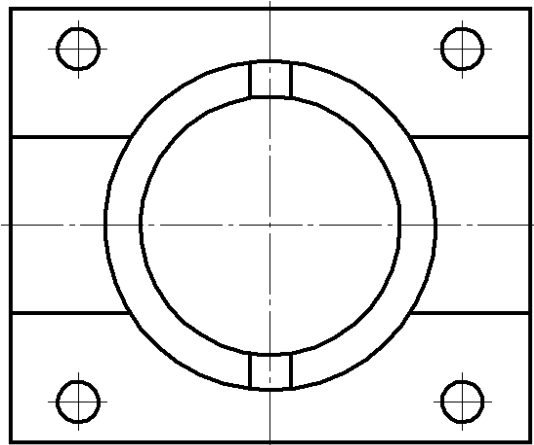


Рисунок Б.23 - Зображення №3 (553x469)

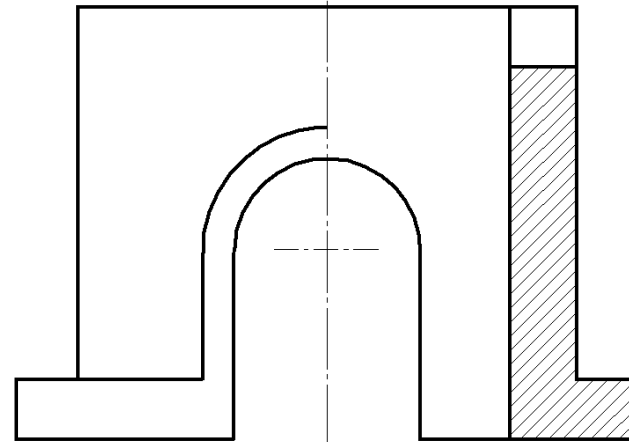


Рисунок Б.24 - Зображення №4 (723x510)

Продовження додатку Б

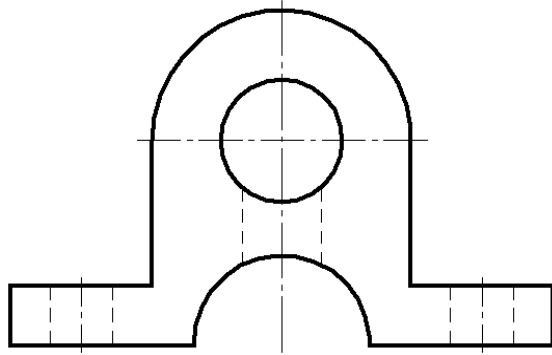


Рисунок Б.25 - Зображення №5 (540x344)

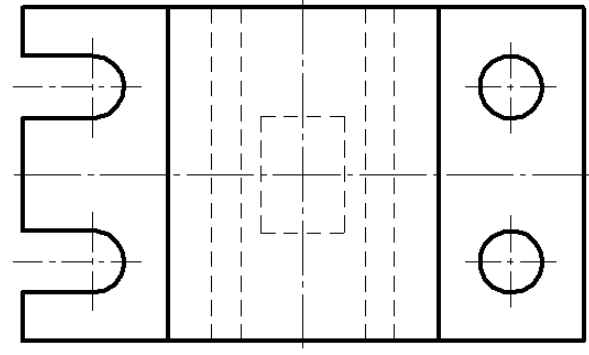


Рисунок Б.26 - Зображення №6 (547x327)

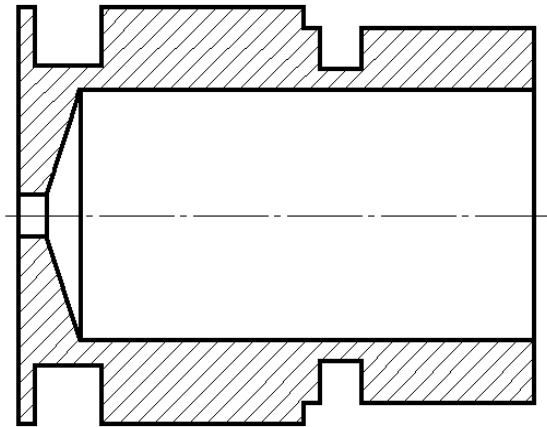


Рисунок Б.27 - Зображення №7 (509x400)

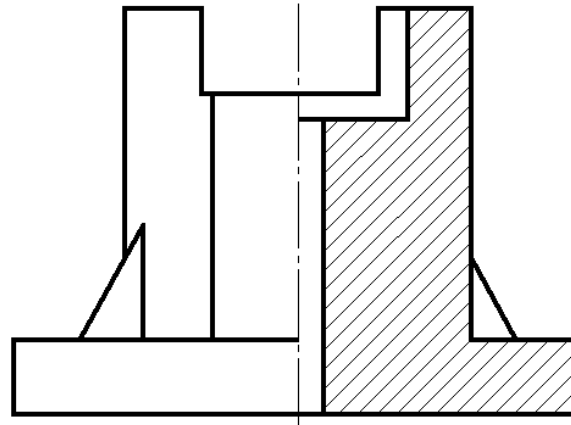


Рисунок Б.28 - Зображення №8 (481x357)

Продовження додатку Б

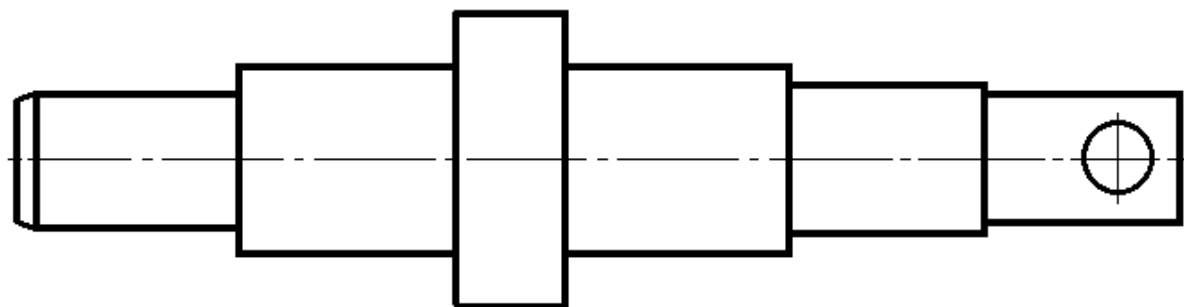


Рисунок Б.29 - Зображення №9 (673x179)

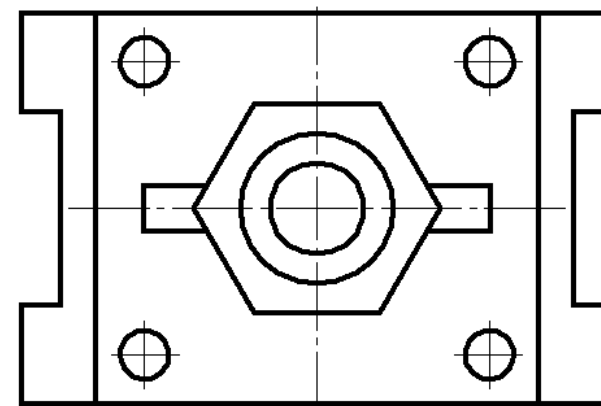


Рисунок Б.30 - Зображення №10 (465x316)

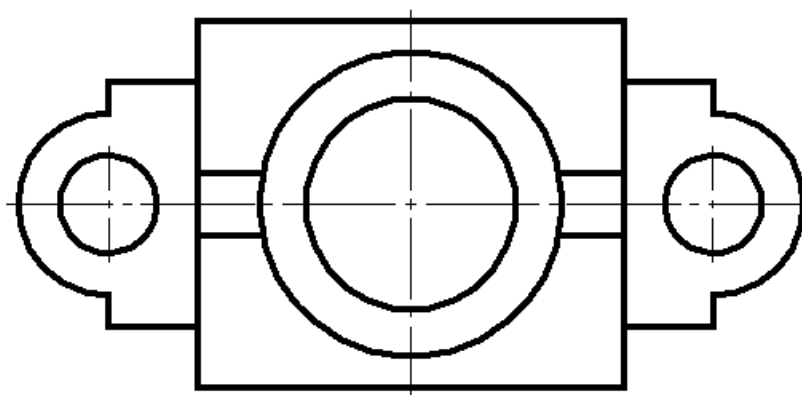


Рисунок Б.31 - Зображення №11 (508x248)

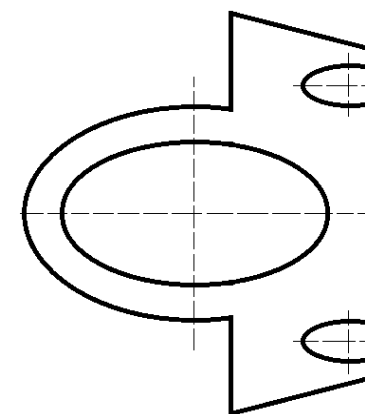


Рисунок Б.32 - Зображення №12 (386x432)

Продовження додатку Б

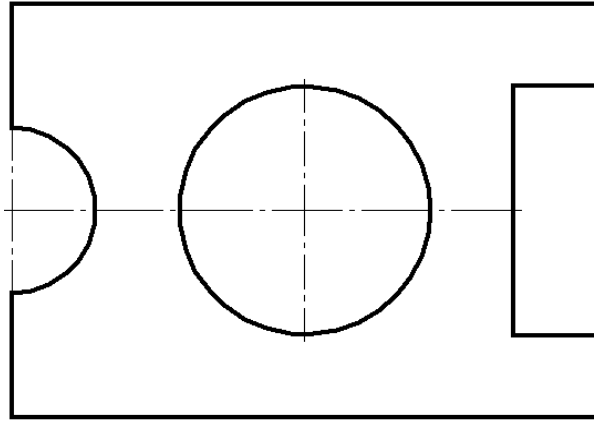


Рисунок Б.33 - Зображення №13 (543x397)

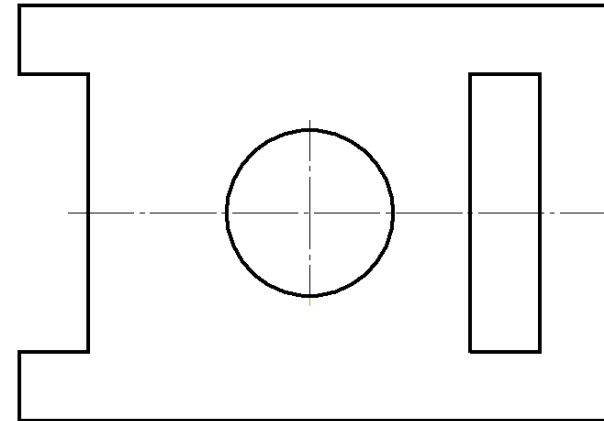


Рисунок Б.34 - Зображення №14 (658x468)

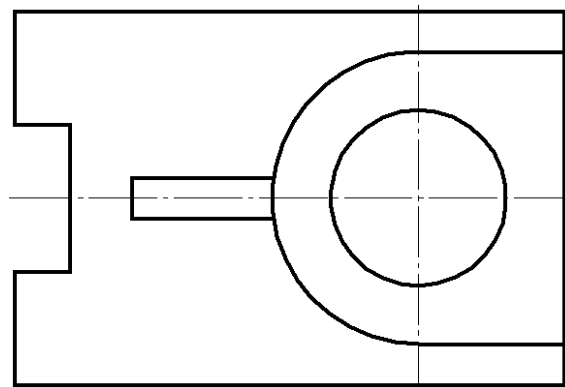


Рисунок Б.35 - Зображення №15 (584x403)

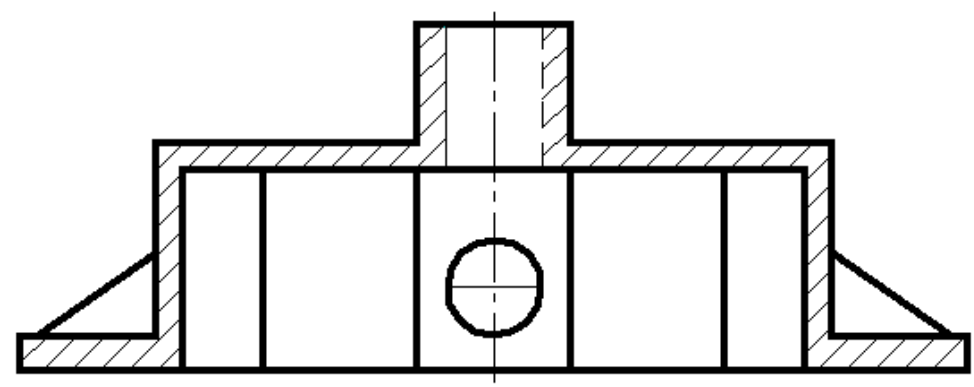


Рисунок Б.36 - Зображення №16 (542x212)

Продовження додатку Б

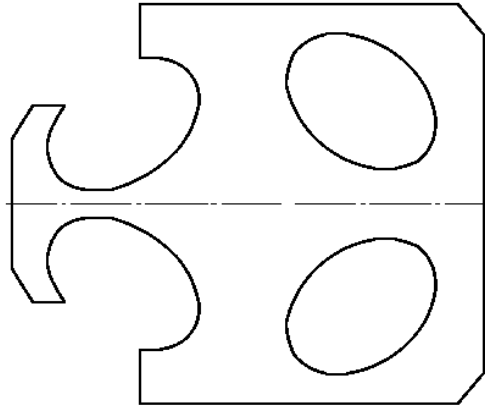


Рисунок Б.37 - Зображення №17 (476x118)

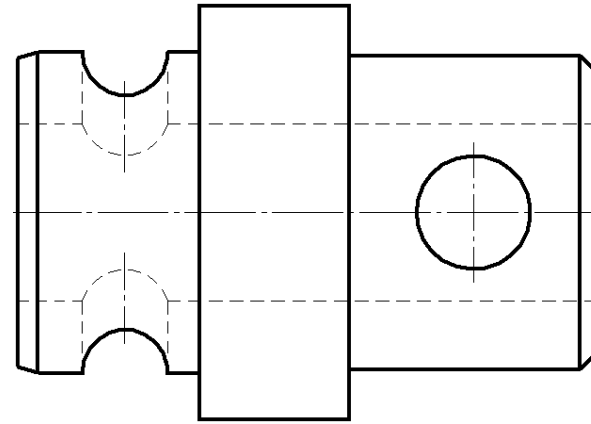


Рисунок Б.38 - Зображення №18 (630x449)

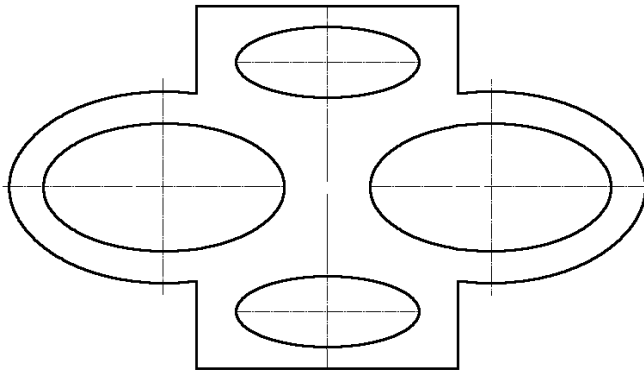


Рисунок Б.39 - Зображення №19 (758x442)

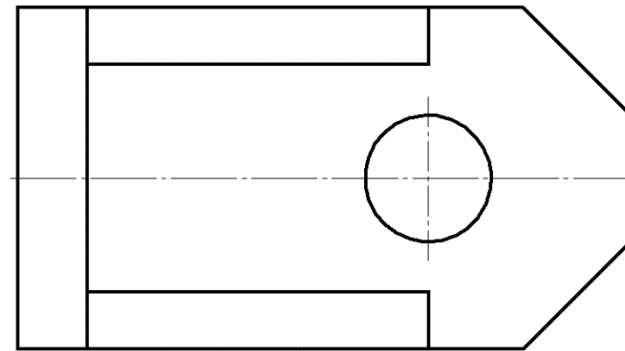


Рисунок Б.40 - Зображення №20 (760x430)

ДОДАТОК В.

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ
РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ**

Продовження додатку В

Таблиця В.1

Номер зобра- ження	Метрика	Гаусів шум (20%)			Високочастотний шум (20%)			Рівномірний шум (20%)			Розмиття за Гаусом (радіус = 1)		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	MSE	1278,38	525,62	814,14	4209,30	0,00	1048,14	1061,01	12,3	481,14	3033,10	1280,21	2149,36
	PSNR	17,10	25,82	19,06	11,92	0,00	17,96	17,91	18,64	21,34	13,35	26,07	14,84
	UIQI	0,96	0,99	0,95	0,77	1,00	0,93	0,95	0,92	0,97	0,77	0,99	0,84
	SSIM	0,96	0,99	0,95	0,77	1,00	0,93	0,95	0,92	0,97	0,77	0,99	0,84
2	MSE	1280,84	258,29	382,75	4256,77	376,64	1694,96	1049,31	197,41	147,22	1413,2	850,54	992,38
	PSNR	17,09	24,04	22,34	11,87	23,75	15,87	17,96	25,21	26,49	16,66	18,87	18,20
	UIQI	0,93	0,96	0,96	0,67	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,75	0,85	0,83
	SSIM	0,93	0,96	0,96	0,67	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,85	0,83
3	MSE	1282,97	30,00	423,45	4215,94	326,34	1703,65	1059,85	197,71	174,23	1470,44	717,22	1025,62
	PSNR	17,08	33,39	21,9	11,92	23,03	15,85	17,91	25,2	25,75	16,49	19,61	18,05
	UIQI	0,93	1,00	0,95	0,69	0,95	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,89	0,84
	SSIM	0,93	1,00	0,96	0,69	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,89	0,84
4	MSE	1285,33	290,52	451,14	4236,6	36,05	652,07	1060,52	212,17	184,94	1601,94	783,21	1112,15
	PSNR	17,07	23,53	21,62	11,89	32,6	20,02	17,91	24,9	25,49	16,12	19,23	17,7
	UIQI	0,94	0,96	0,95	0,70	1,00	0,92	0,91	0,97	0,98	0,75	0,89	0,83
	SSIM	0,94	0,96	0,95	0,70	1,00	0,92	0,91	0,97	0,98	0,76	0,89	0,83

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5	MSE	1282,97	30,00	423,45	4215,94	326,34	1703,65	1059,85	197,71	174,23	1470,44	717,22	1025,62
	PSNR	17,08	33,39	21,9	11,92	23,03	15,85	17,91	25,2	25,75	16,49	19,61	18,05
	UIQI	0,93	1,00	0,95	0,69	0,95	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,89	0,84
	SSIM	0,93	1,00	0,96	0,69	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,89	0,84
6	MSE	1279,36	569,39	647,81	4269,35	658,65	2513,01	1063,09	414,85	266,96	3435,15	2190,68	2376,92
	PSNR	17,09	20,61	20,05	11,86	19,98	14,16	17,90	21,99	23,9	12,81	14,76	14,4
	UIQI	0,96	0,97	0,97	0,81	0,96	0,84	0,95	0,98	0,99	0,73	0,85	0,83
	SSIM	0,96	0,97	0,97	0,81	0,96	0,84	0,95	0,98	0,99	0,73	0,85	0,83
7	MSE	1275,01	254,62	411,62	42,94	283,82	1718,16	1064,04	195,21	169,39	1434,07	961,27	994,87
	PSNR	17,11	24,11	22,02	11,84	23,63	15,81	17,90	25,26	25,88	16,60	18,34	18,19
	UIQI	0,93	0,96	0,95	0,66	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,84	0,83
	SSIM	0,93	0,96	0,95	0,67	0,96	0,82	0,90	0,97	0,98	0,76	0,84	0,84
8	MSE	1278,54	449,32	532,06	4239,96	503,52	2174,36	1064	330,38	199,79	2662,53	1393,24	1840,22
	PSNR	17,10	21,64	20,91	11,89	21,14	14,79	17,90	22,97	25,16	13,91	16,72	15,52
	UIQI	0,95	0,97	0,97	0,78	0,96	0,84	0,94	0,98	0,99	0,74	0,88	0,83
	SSIM	0,95	0,97	0,97	0,78	0,96	0,85	0,94	0,98	0,99	0,75	0,88	0,83
9	MSE	1285,88	220,9	362,49	4237,27	243,23	1600,98	1060,35	167,41	138,58	1225,28	576,74	854,11
	PSNR	17,07	24,72	22,57	11,89	24,30	16,12	17,91	25,93	26,75	17,28	20,56	18,85
	UIQI	0,92	0,96	0,95	0,64	0,96	0,81	0,89	0,97	0,98	0,76	0,89	0,83
	SSIM	0,92	0,96	0,96	0,65	0,96	0,81	0,89	0,97	0,98	0,76	0,89	0,83

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	MSE	1282,93	608,75	676,38	4231,8	686,54	2582,67	1060,02	439,48	267,04	2553,93	1720,73	1497,45
	PSNR	17,08	20,32	19,86	11,90	19,80	14,04	17,91	21,74	23,9	14,09	15,81	16,41
	UIQI	0,96	0,97	0,97	0,82	0,96	0,84	0,95	0,98	0,99	0,82	0,90	0,91
	SSIM	0,96	0,97	0,97	0,82	0,96	0,84	0,95	0,98	0,99	0,82	0,90	0,91
11	MSE	1275,57	157,93	233,11	4231,42	191,16	1422,25	1055,65	121,62	60,58	316,59	236,95	18,29
	PSNR	17,11	26,18	24,49	11,90	25,35	16,64	17,93	27,31	30,34	3,16	24,42	35,54
	UIQI	0,90	0,96	0,96	0,55	0,95	0,79	0,84	0,97	0,99	0,92	0,94	1,00
	SSIM	0,90	0,96	0,96	0,56	0,95	0,79	0,84	0,97	0,99	0,92	0,94	1,00
12	MSE	1278,55	731,05	1057,12	3949,65	481,66	2287,55	1060,58	10,51	834,46	2966,21	2385,72	2444,45
	PSNR	17,10	19,53	17,92	12,20	21,34	14,57	17,91	37,95	18,95	13,44	14,39	14,28
	UIQI	0,96	0,96	0,94	0,83	0,97	0,87	0,95	1,00	0,96	0,79	0,83	0,83
	SSIM	0,96	0,96	0,94	0,83	0,97	0,87	0,95	1,00	0,96	0,79	0,83	0,83
13	MSE	1283,53	358,17	516,76	4226,16	390,95	1945,45	1058,82	266,78	213,7	1984,52	960,36	1379,04
	PSNR	17,08	22,62	21,03	11,91	22,24	15,27	17,92	23,90	24,87	15,19	18,34	16,77
	UIQI	0,94	0,96	0,95	0,74	0,96	0,83	0,92	0,97	0,98	0,74	0,89	0,83
	SSIM	0,94	0,96	0,96	0,74	0,96	0,83	0,92	0,97	0,98	0,75	0,89	0,83
14	MSE	1282,06	227,58	343,54	4238,6	249,28	1608,69	1055,14	171,73	120,53	1239,97	748,24	871,18
	PSNR	17,09	24,59	22,81	11,89	24,2	16,10	17,93	25,82	27,35	17,23	19,42	18,76
	UIQI	0,92	0,96	0,96	0,65	0,96	0,81	0,89	0,97	0,98	0,76	0,85	0,83
	SSIM	0,92	0,96	0,96	0,65	0,96	0,81	0,89	0,97	0,98	0,76	0,85	0,83

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	MSE	1279,97	318,35	490,37	4237,35	343,57	1856,23	1049,96	238,82	206,65	3679,90	845,93	1788,84
	PSNR	17,09	23,14	21,26	11,89	22,80	15,48	17,95	24,38	25,01	12,51	18,89	15,64
	UIQI	0,94	0,96	0,95	0,72	0,96	0,83	0,92	0,97	0,98	0,73	0,89	0,75
	SSIM	0,94	0,96	0,95	0,72	0,96	0,83	0,92	0,97	0,98	0,73	0,89	0,75
16	MSE	1284,06	277,61	440,82	4236,13	299,6	1742,77	1065,19	5,6	177,58	1538,27	913,83	1067,61
	PSNR	17,08	23,73	21,72	11,9	23,4	15,75	17,89	40,68	25,67	16,29	18,56	17,88
	UIQI	0,94	0,96	0,95	0,69	0,96	0,82	0,91	1,00	0,98	0,76	0,86	0,83
	SSIM	0,94	0,96	0,95	0,69	0,96	0,82	0,91	1,00	0,98	0,76	0,86	0,84
17	MSE	1282,46	265,82	381,56	4204,31	285,19	1688,58	1061,83	5,26	147,28	1447,57	869,02	1018,13
	PSNR	17,08	23,92	22,35	11,93	23,61	15,89	17,90	40,96	26,48	16,56	18,77	18,09
	UIQI	0,93	0,96	0,96	0,68	0,96	0,82	0,90	1,00	0,98	0,76	0,85	0,83
	SSIM	0,93	0,96	0,96	0,68	0,96	0,82	0,90	1,00	0,98	0,76	0,86	0,83
18	MSE	5141,21	168,57	3501,82	4229,12	234,22	1564,34	1047,63	3,29	78,55	1169,35	821,52	835,47
	PSNR	11,05	25,9	12,72	11,9	24,47	16,22	17,96	42,99	29,21	17,49	19,02	18,95
	UIQI	0,76	0,97	0,84	0,62	0,96	0,8	0,87	1,00	0,99	0,73	0,81	0,81
	SSIM	0,76	0,97	0,84	0,62	0,96	0,8	0,88	1,00	0,99	0,74	0,81	0,81
19	MSE	1283,79	178,6	316,31	4226,69	197,5	1487,53	1057,29	3,41	115,83	988,03	585,28	685,44
	PSNR	17,08	25,65	23,16	11,9	25,21	16,44	17,92	42,84	27,53	18,22	20,49	19,81
	UIQI	0,91	0,96	0,96	0,61	0,96	0,81	0,87	1,00	0,98	0,77	0,86	0,84
	SSIM	0,91	0,97	0,96	0,61	0,96	0,81	0,87	1,00	0,98	0,77	0,86	0,84

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20	MSE	1275,39	229,12	282,4	4264,26	43,79	1600,81	1061,75	4,12	76,75	1207,54	647,87	373,63
	PSNR	17,11	24,56	23,66	11,87	31,79	16,12	17,9	42,02	29,31	17,35	20,05	22,44
	UIQI	0,92	0,96	0,96	0,62	0,99	0,79	0,87	1,00	0,99	0,73	0,86	0,92
	SSIM	0,92	0,96	0,97	0,62	0,99	0,79	0,88	1,00	0,99	0,73	0,86	0,93

Таблиця В.2

Відносне покращення значень базових метрик у порівнянні з альтернативним методом	Вид шуму				У середньому за видами шуму
	Гаусів шум (20%)	високочастотний шум (20%)	Рівномірний шум (20%)	раозмиття за Гауссом (радиус = 1)	
$\Delta MSE^{BШ}, \%$	21,27	36,89	19,01	10,49	21,92
$\Delta PSNR^{BШ}, \%$	16,12	71,44	81,32	1,13	42,50
$\Delta UIQI^{BШ}, \%$	1,40	13,85	1,85	2,65	4,94
$\Delta SSIM^{BШ}, \%$	1,25	13,80	1,85	2,55	4,86
У середньому за показниками ($\Delta M_{cp}^{BШ} (\%)$)	10,01	34,00	26,01	4,21	18,55

Використані наступні показники, що характеризують відносні зміни значень базових метрик:

$$\Delta MSE^{BШ} (\%) = \frac{MSE_{C3}^{BШ} - MSE_{\Phi3}^{PM}}{MSE_{C3}^{BШ}} \cdot 100 - \frac{MSE_{C3}^{BШ} - MSE_{\Phi3}^{KM}}{MSE_{C3}^{BШ}} \cdot 100$$

$$\Delta PSNR^{BШ} (\%) = \frac{PSNR_{C3}^{BШ} - PSNR_{\Phi3}^{PM}}{PSNR_{C3}^{BШ}} \cdot 100 - \frac{PSNR_{C3}^{BШ} - PSNR_{\Phi3}^{KM}}{PSNR_{C3}^{BШ}} \cdot 100$$

$$\Delta UIQI^{BШ} (\%) = \frac{UIQI_{C3}^{BШ} - UIQI_{\Phi3}^{PM}}{UIQI_{C3}^{BШ}} \cdot 100 - \frac{UIQI_{C3}^{BШ} - UIQI_{\Phi3}^{KM}}{UIQI_{C3}^{BШ}} \cdot 100$$

$$\Delta SSIM^{BШ} (\%) = \frac{SSIM_{C3}^{BШ} - SSIM_{\Phi3}^{PM}}{SSIM_{C3}^{BШ}} \cdot 100 - \frac{SSIM_{C3}^{BШ} - SSIM_{\Phi3}^{KM}}{SSIM_{C3}^{BШ}} \cdot 100$$

$$\Delta M_{cp}^{BШ} (\%) = (\Delta MSE^{BШ} + \Delta PSNR^{BШ} + \Delta UIQI^{BШ} + \Delta SSIM^{BШ}) / 4$$

$$\Delta MSE_{cp} (\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta MSE^{BШ_i}$$

Продовження додатку В

$$\Delta PSNR_{cp}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta PSNR^{BШ_i}$$

$$\Delta UIQI_{cp}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta UIQI^{BШ_i}$$

$$\Delta SSIM_{cp}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta SSIM^{BШ_i}$$

$$\Delta M_{cp}(\%) = (\Delta MSE_{cp} + \Delta PSNR_{cp} + \Delta UIQI_{cp} + \Delta SSIM_{cp}) / 4$$

У даних виразах прийняті наступні позарядкові позначення: ВШ - вид шуму, СЗ - спотворене зображення, ФЗ - фільтроване зображення, РМ - розроблений метод, КМ - альтернативний класичний метод, $\Delta M_{cp}^{BШ}$ - узагальнене усереднене значення за всіма показниками по виду шуму, ΔM_{cp} - узагальнене усереднене значення за всіма показниками за всіма видами шуму.

Продовження додатку В
Таблиця В.3

Номер зобра- ження	Метрика	Зональна нерівномірність яскравості						Зниження яскравості й контрастності					
		A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Recall	1,00	0,99	1,00	1,00	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,31	0,35	0,93	0,95
	F-measure	1,00	0,99	0,50	1,00	0,98	1,00	1,00	0,98	0,48	0,51	0,96	0,96
	Accuracy	1,00	1,00	0,66	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,63	0,68	1,00	1,00
2	Recall	1,00	0,96	1,00	1,00	0,70	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,12	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,10	0,13	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,98	0,21	1,00	0,82	0,95	1,00	0,98	0,17	0,23	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,49	1,00	0,98	0,99	1,00	1,00	0,19	0,53	1,00	1,00
3	Recall	1,00	0,96	1,00	1,00	0,72	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,10	0,15	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,98	0,24	1,00	0,83	0,99	1,00	0,98	0,19	0,26	0,98	0,98
	Accuracy	1,00	1,00	0,54	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,37	0,59	1,00	1,00
4	Recall	1,00	0,95	1,00	1,00	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,12	0,19	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,98	0,28	1,00	0,77	1,00	1,00	1,00	0,21	0,32	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,60	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,42	0,67	1,00	1,00
5	Recall	1,00	0,92	1,00	1,00	0,53	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,06	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,05	0,06	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,96	0,11	1,00	0,70	0,98	1,00	0,98	0,10	0,12	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,34	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,23	0,38	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

Номер зображення	Метрика	Спотворення рельєфу фону й контуру					
		А	В	С	Д	Е	Ф
1	2	15	16	17	18	19	20
1	Recall	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00
	Precision	1,00	0,93	0,33	0,80	0,91	0,92
	F-measure	1,00	0,96	0,50	0,89	0,96	0,97
	Accuracy	1,00	0,99	0,66	0,96	0,99	0,99
2	Recall	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,75	0,12	0,38	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,76	0,21	0,55	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,98	0,50	0,89	1,00	1,00
3	Recall	0,96	0,89	0,87	1,00	0,95	1,00
	Precision	1,00	0,58	0,14	0,64	1,00	1,00
	F-measure	0,98	0,70	0,24	0,78	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,95	0,54	0,96	1,00	1,00
4	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,98
	Precision	1,00	0,64	0,18	0,98	0,93	0,95
	F-measure	1,00	0,77	0,31	0,99	0,99	0,99
	Accuracy	1,00	0,95	0,65	1,00	1,00	1,00
5	Recall	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99
	Precision	1,00	0,62	0,07	0,17	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,76	0,13	0,29	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,97	0,45	0,79	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	Recall	0,98	0,99	0,96	1,00	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,36	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,31	0,38	1,00	1,00
	F-measure	0,99	1,00	0,53	1,00	0,98	0,99	1,00	0,87	0,47	0,55	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,69	1,00	0,99	1,00	1,00	0,95	0,60	0,72	0,99	0,99
7	Recall	1,00	0,95	1,00	1,00	0,61	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10	0,15	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,97	0,23	1,00	0,76	1,00	1,00	1,00	0,18	0,25	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,54	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,38	0,59	1,00	1,00
8	Recall	0,98	0,99	1,00	1,00	0,91	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83	0,21	0,26	1,00	1,00
	F-measure	0,99	0,99	0,46	1,00	0,95	0,99	1,00	0,90	0,35	0,42	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,55	1,00	0,99	1,00	1,00	0,97	0,50	0,63	1,00	1,00
9	Recall	1,00	0,93	1,00	1,00	0,54	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,08	0,11	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,96	0,18	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	0,15	0,20	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,47	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,32	0,53	1,00	1,00
10	Recall	0,98	1,00	0,98	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,33	0,40	0,85	0,86
	F-measure	0,99	1,00	0,56	1,00	1,00	0,98	1,00	0,88	0,50	0,57	0,90	0,90
	Accuracy	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,62	0,72	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	15	16	17	18	19	20
6	Recall	1,00	0,99	1,00	1,00	0,96	1,00
	Precision	1,00	0,84	0,38	0,85	1,00	0,96
	F-measure	1,00	0,91	0,55	0,92	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,97	0,71	0,97	1,00	1,00
7	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,62	0,15	0,74	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,76	0,26	0,85	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,96	0,60	0,98	1,00	1,00
8	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,96
	Precision	1,00	0,86	0,27	0,65	1,00	0,97
	F-measure	1,00	0,92	0,42	0,79	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,98	0,63	0,93	0,96	0,98
9	Recall	1,00	0,99	1,00	0,97	0,99	1,00
	Precision	1,00	0,63	0,12	0,43	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,77	0,21	0,60	0,92	0,94
	Accuracy	1,00	0,97	0,55	0,92	1,00	1,00
10	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,89	0,41	0,84	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,93	0,59	0,91	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,97	0,73	0,96	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
11	Recall	1,00	0,92	1,00	1,00	0,51	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,05	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	0,05	0,05	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,96	0,10	0,10	0,68	1,00	1,00	1,00	0,09	0,10	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,30	0,33	0,98	1,00	1,00	1,00	0,22	0,33	1,00	1,00
12	Recall	0,94	0,99	0,98	1,00	0,95	0,98	0,96	0,92	0,93	0,93	0,95	0,96
	Precision	1,00	1,00	0,27	1,00	1,00	1,00	1,00	0,62	0,23	0,29	1,00	1,00
	F-measure	0,97	0,99	0,43	1,00	0,97	0,99	0,98	0,77	0,38	0,45	1,00	1,00
	Accuracy	0,99	1,00	0,54	1,00	0,99	1,00	0,99	0,90	0,43	0,58	1,00	1,00
13	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	0,82	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,22	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,16	0,25	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,99	0,36	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	0,28	0,40	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,66	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,50	0,72	1,00	1,00
14	Recall	1,00	0,93	0,99	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,10	1,00	0,11	1,00	1,00	0,95	0,08	0,11	0,95	0,95
	F-measure	1,00	0,97	0,18	1,00	0,20	0,98	1,00	0,97	0,15	0,20	0,98	0,98
	Accuracy	1,00	1,00	0,47	1,00	0,53	1,00	1,00	1,00	0,32	0,53	1,00	1,00
15	Recall	1,00	0,99	0,99	1,00	0,87	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,13	0,18	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,99	0,28	1,00	0,93	0,99	1,00	0,96	0,23	0,30	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,55	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,42	0,59	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	15	16	17	18	19	20
11	Recall	1,00	0,98	1,00	0,96	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,67	0,07	0,10	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,80	0,12	0,18	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,98	0,46	0,65	1,00	1,00
12	Recall	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,90	0,31	0,86	0,99	1,00
	F-measure	0,99	0,94	0,47	0,93	1,00	0,99
	Accuracy	1,00	0,98	0,61	0,97	1,00	1,00
13	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,67	0,24	0,90	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,80	0,38	0,95	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,95	0,69	0,99	1,00	1,00
14	Recall	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,69	0,11	0,52	0,87	1,00
	F-measure	1,00	0,81	0,20	0,69	0,89	0,90
	Accuracy	1,00	0,97	0,54	0,95	1,00	1,00
15	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,69	0,19	0,61	0,98	0,98
	F-measure	1,00	0,81	0,32	0,76	1,00	0,98
	Accuracy	1,00	0,96	0,63	0,94	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
16	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,11	0,14	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,99	0,23	1,00	0,92	1,00	1,00	0,96	0,19	0,25	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,50	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,37	0,55	1,00	1,00
17	Recall	1,00	0,94	1,00	1,00	0,64	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,10	0,15	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,97	0,23	1,00	0,78	0,99	1,00	0,97	0,18	0,25	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,54	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,39	0,59	1,00	1,00
18	Recall	1,00	0,91	1,00	1,00	0,48	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,08	0,09	1,00	1,00	1,00	0,93	0,07	0,09	0,93	0,94
	F-measure	1,00	0,95	0,15	0,16	0,65	1,00	1,00	0,95	0,13	0,16	0,95	0,96
	Accuracy	1,00	1,00	0,41	0,46	0,97	1,00	1,00	1,00	0,30	0,46	1,00	1,00
19	Recall	1,00	0,96	1,00	1,00	0,67	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,07	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,06	0,07	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,98	0,13	1,00	0,80	0,99	1,00	0,98	0,12	0,14	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	1,00	0,36	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,26	0,40	1,00	1,00
20	Recall	1,00	0,89	0,98	1,00	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	1,00	0,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,07	0,09	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,84	0,16	1,00	0,59	1,00	1,00	1,00	0,13	0,17	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,99	0,43	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,31	0,47	1,00	1,00

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.3

1	2	15	16	17	18	19	20
16	Recall	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,65	0,16	0,48	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,78	0,28	0,65	1,00	0,95
	Accuracy	1,00	0,96	0,62	0,92	1,00	0,99
17	Recall	1,00	0,99	1,00	0,96	1,00	0,97
	Precision	1,00	0,68	0,14	0,45	1,00	0,98
	F-measure	1,00	0,81	0,25	0,62	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,97	0,57	0,92	1,00	1,00
18	Recall	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Precision	1,00	0,71	0,09	0,24	1,00	1,00
	F-measure	1,00	0,83	0,17	0,38	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,98	0,50	0,83	1,00	1,00
19	Recall	1,00	0,99	1,00	1,00	0,98	1,00
	Precision	1,00	0,64	0,09	0,22	1,00	0,92
	F-measure	1,00	0,78	0,16	0,36	0,93	0,95
	Accuracy	1,00	0,97	0,49	0,83	0,98	0,98
20	Recall	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98
	Precision	1,00	0,77	0,10	0,29	0,83	0,89
	F-measure	1,00	0,87	0,18	0,45	1,00	1,00
	Accuracy	1,00	0,98	0,52	0,87	1,00	1,00

Продовження додатку В
Таблиця В.4

Відносне покращення значень базових метрик у порівнянні з альтернативним методом	Альтернативний метод					У середньому за методами
	Bernsen	Niblack	Otsu	Sauvola	Phansalkar	
$\Delta \text{Recall}^{\text{AM}}, \%$	1,70	0,07	-0,08	8,17	0,22	2,01
$\Delta \text{Precision}^{\text{AM}}, \%$	11,02	81,67	44,42	3,57	0,45	28,22
$\Delta F - \text{measure}^{\text{AM}}, \%$	7,58	71,03	36,60	8,05	0,45	24,74
$\Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}}, \%$	2,11	49,34	19,45	2,15	0,01	14,61
У середньому за показниками ($\Delta M_{\text{cp}}^{\text{AM}}, \%$)	5,60	50,53	25,10	5,48	0,28	17,40

Використані наступні показники, що характеризують відносні зміни значень базових метрик:

$$\Delta \text{Recall}^{\text{AM}} (\%) = \frac{\text{Recall}_{\text{ня}}^{\text{pm}} + \text{Recall}_{\text{нк}}^{\text{pm}} + \text{Recall}_{\text{ср}}^{\text{pm}}}{3} -$$

$$\frac{\text{Recall}_{\text{ня}}^{\text{AM}} + \text{Recall}_{\text{нк}}^{\text{AM}} + \text{Recall}_{\text{ср}}^{\text{AM}}}{3}$$

$$\Delta \text{Precision}^{\text{AM}} (\%) = \frac{\text{Precision}_{\text{ня}}^{\text{pm}} + \text{Precision}_{\text{нк}}^{\text{pm}} + \text{Precision}_{\text{ср}}^{\text{pm}}}{3} -$$

$$\frac{\text{Precision}_{\text{ня}}^{\text{AM}} + \text{Precision}_{\text{нк}}^{\text{AM}} + \text{Precision}_{\text{ср}}^{\text{AM}}}{3}$$

$$\Delta F - \text{measure}^{\text{AM}} (\%) = \frac{F - \text{measure}_{\text{ня}}^{\text{pm}} + F - \text{measure}_{\text{нк}}^{\text{pm}} + F - \text{measure}_{\text{ср}}^{\text{pm}}}{3} -$$

$$\frac{F - \text{measure}_{\text{ня}}^{\text{AM}} + F - \text{measure}_{\text{нк}}^{\text{AM}} + F - \text{measure}_{\text{ср}}^{\text{AM}}}{3}$$

$$\Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}} (\%) = \frac{\text{Accuracy}_{\text{ня}}^{\text{pm}} + \text{Accuracy}_{\text{нк}}^{\text{pm}} + \text{Accuracy}_{\text{ср}}^{\text{pm}}}{3} -$$

$$\frac{\text{Accuracy}_{\text{ня}}^{\text{AM}} + \text{Accuracy}_{\text{нк}}^{\text{AM}} + \text{Accuracy}_{\text{ср}}^{\text{AM}}}{3}$$

Продовження додатку В

$$\Delta \text{Recall}_{\text{cp}}^{\text{AM}}(\%) = \sum_{i=1}^5 \Delta \text{Recall}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{Precision}_{\text{cp}}^{\text{AM}}(\%) = \sum_{i=1}^5 \Delta \text{Precision}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{F-measure}_{\text{cp}}^{\text{AM}}(\%) = \sum_{i=1}^5 \Delta \text{F-measure}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{Accuracy}_{\text{cp}}^{\text{AM}}(\%) = \sum_{i=1}^5 \Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{M}_{\text{cp}}^{\text{AM}}(\%) = \frac{(\Delta \text{Recall}_{\text{cp}}^{\text{AM}} + \Delta \text{Precision}_{\text{cp}}^{\text{AM}} + \Delta \text{F-measure}_{\text{cp}}^{\text{AM}} + \Delta \text{Accuracy}_{\text{cp}}^{\text{AM}})}{4}$$

$$\Delta \text{M}_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^5 \Delta \text{M}_{\text{cp}}^{\text{AM}_i}$$

У даних виразах прийняті наступні позарядкові позначення: РМ - розроблений метод, АМ - альтернативний метод, НЯ - зональна нерівномірна яскравість, НК - зниження яскравості й контрастності, СР - спотворення рельєфу фону і контуру. $\Delta \text{M}_{\text{cp}}^{\text{AM}}$ - узагальнене усереднене значення за всіма показниками у порівнянні з альтернативним методом, $\Delta \text{M}_{\text{cp}}$ - узагальнене усереднене значення за всіма показниками у порівнянні з усіма альтернативними методами

Продовження додатку В
Таблиця В.5

Номер зобра- ження	Метрика	Гаусів шум (20%)			Високочастотний шум (20%)			Шум «твердий олівець» (20%)		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	MSE	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,05	0,01	0,01	0,01
	PSNR	22,52	28,68	0,04	24,49	31,18	19,47	25,93	27,05	26,75
	UIQI	0,92	0,98	0,86	0,95	0,99	0,95	0,96	0,97	0,97
	SSIM	0,92	0,98	0,86	0,95	0,99	0,95	0,96	0,97	0,97
2	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,47	35,42	22,64	26,75	35,55	28,78	30,18	35,51	35,51
	UIQI	0,84	0,99	0,85	0,94	0,99	0,96	0,97	0,99	0,97
	SSIM	0,84	0,99	0,85	0,94	0,99	0,96	0,97	0,99	0,97
3	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,42	34,99	22,89	27,28	35,79	28,89	30,19	34,92	34,92
	UIQI	0,85	0,99	0,85	0,95	0,99	0,96	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,85	0,99	0,85	0,95	0,99	0,96	0,97	0,99	0,99
4	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,43	34,12	22,3	26,08	34,06	29,2	29,54	35,02	35,02
	UIQI	0,86	0,99	0,85	0,94	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,86	0,99	0,85	0,94	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	MSE	1278,13	163,41	286,08	4290,68	178,54	1468,57	1053,77	3,32	95,35
	PSNR	17,10	26,03	23,60	11,84	25,65	16,5	17,94	42,95	28,37
	UIQI	0,90	0,96	0,96	0,57	0,96	0,79	0,85	1,00	0,98
	SSIM	0,91	0,96	0,96	0,57	0,96	0,8	0,85	1,00	0,98
6	MSE	1279,36	569,39	647,81	4269,35	658,65	2513,01	1063,09	13,22	266,96
	PSNR	17,09	20,61	20,05	11,86	19,98	14,16	17,90	36,95	23,9
	UIQI	0,96	0,97	0,97	0,81	0,96	0,84	0,95	1,00	0,99
	SSIM	0,96	0,97	0,97	0,81	0,96	0,84	0,95	1,00	0,99
7	MSE	1275,01	254,62	411,62	42,94	283,82	1718,16	1064,04	5,79	169,39
	PSNR	17,11	24,11	22,02	11,84	23,63	15,81	17,90	40,54	25,88
	UIQI	0,93	0,96	0,95	0,66	0,96	0,82	0,90	1,00	0,98
	SSIM	0,93	0,96	0,95	0,67	0,96	0,82	0,90	1,00	0,98
8	MSE	1278,54	449,32	532,06	4239,96	503,52	2174,36	1064,00	10,57	199,79
	PSNR	17,10	21,64	20,91	11,89	21,14	14,79	17,90	37,92	25,16
	UIQI	0,95	0,97	0,97	0,78	0,96	0,84	0,94	1,00	0,99
	SSIM	0,95	0,97	0,97	0,78	0,96	0,85	0,94	1,00	0,99
9	MSE	1285,88	220,90	362,49	4237,27	243,23	1600,98	1060,35	4,61	138,58
	PSNR	17,07	24,72	22,57	11,89	24,30	16,12	17,91	41,52	26,75
	UIQI	0,92	0,96	0,95	0,64	0,96	0,81	0,89	1,00	0,98
	SSIM	0,92	0,96	0,96	0,65	0,96	0,81	0,89	1,00	0,98
10	MSE	0,02	0,00	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
	PSNR	22,48	30,57	17,63	21,83	27,27	24,84	24,43	29,26	25,94
	UIQI	0,93	0,99	0,78	0,92	0,98	0,96	0,95	0,98	0,97
	SSIM	0,93	0,99	0,78	0,92	0,98	0,96	0,95	0,98	0,07
11	MSE	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,4	40,2	24,74	29,09	40,51	25,32	33,33	37,38	39,91
	UIQI	0,76	0,99	0,84	0,94	1,00	0,86	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,76	0,99	0,84	0,94	1,00	0,86	0,97	0,99	0,99
12	MSE	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,05
	PSNR	22,45	26,06	21,91	27,31	33,18	27,26	25,73	26,42	19,24
	UIQI	0,92	0,97	0,91	0,97	0,99	0,97	0,96	0,97	0,85
	SSIM	0,92	0,97	0,91	0,97	0,99	0,97	0,96	0,97	0,85

Продовження таблиці В.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
13	MSE	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
	PSNR	22,45	34,08	21,45	25,19	33,25	27,07	28,61	32,8	35,79
	UIQI	0,88	0,99	0,85	0,93	0,99	0,96	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,88	0,99	0,85	0,93	0,99	0,96	0,97	0,99	0,99
14	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,49	36,40	22,94	26,94	35,45	30,47	30,92	35,56	36,42
	UIQI	0,83	0,99	0,84	0,93	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,83	0,99	0,84	0,93	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
15	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
	PSNR	22,42	34,52	22,51	25,72	33,49	26,25	28,47	32,44	34,89
	UIQI	0,87	0,99	0,87	0,94	0,99	0,95	0,96	0,99	0,99
	SSIM	0,87	0,99	0,87	0,94	0,99	0,95	0,96	0,99	0,99
16	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,46	34,45	22,47	26,47	34,72	29,74	29,64	33,46	36,26
	UIQI	0,86	0,99	0,86	0,94	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,86	0,99	0,86	0,94	0,99	0,97	0,97	0,99	0,99
17	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,50	35,86	22,57	26,45	35,79	26,37	30,11	34,2	35,29
	UIQI	0,85	0,99	0,85	0,93	0,99	0,94	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,85	0,99	0,85	0,93	0,99	0,94	0,97	0,99	0,99
18	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,50	41,22	22,51	27,29	38,34	27,78	32,02	37,56	41,22
	UIQI	0,81	1,00	0,81	0,93	0,99	0,94	0,97	0,99	1,00
	SSIM	0,81	1,00	0,81	0,93	0,99	0,94	0,97	0,99	1,00
19	MSE	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,48	36,88	22,45	28,07	33,63	28,42	31,87	33,50	37,29
	UIQI	0,80	0,99	0,80	0,94	0,98	0,94	0,97	0,99	0,99
	SSIM	0,80	0,99	0,80	0,94	0,98	0,94	0,97	0,99	0,99
20	MSE	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,48	44,97	23,15	26,95	27,29	27,38	31,11	36,14	42,95
	UIQI	0,81	1,00	0,83	0,93	0,93	0,93	0,97	0,99	1,00
	SSIM	0,81	1,00	0,83	0,93	0,93	0,93	0,97	0,99	1,00

Продовження додатку В
Таблиця В.6

Відносне покращення значень базових метрик у порівнянні з альтернативним методом	Вид спотворення			У середньому за видами спотворення
	Гаусів шум (20%)	високочастотний шум (20%)	шум «твердого олівця» (20%)	
$\Delta MSE^{BC}, \%$	131,58	86,96	71,43	96,65
$\Delta PSNR^{BC}, \%$	62,78	26,06	-0,33	29,51
$\Delta UIQI^{BC}, \%$	17,68	4,06	0,93	7,56
$\Delta SSIM^{BC}, \%$	17,68	4,06	5,59	9,11
У середньому за показниками ($\Delta M_{cp}^{BC}(\%)$)	57,43	30,28	19,40	35,71

Використані наступні показники, що характеризують відносні зміни значень базових метрик:

$$\Delta MSE^{BC}(\%) = \frac{MSE_{C3}^{BC} - MSE_{\Phi 3}^{PM}}{MSE_{C3}^{BC}} \cdot 100 - \frac{MSE_{C3}^{BC} - MSE_{\Phi 3}^{KM}}{MSE_{C3}^{BC}} \cdot 100$$

$$\Delta PSNR^{BC}(\%) = \frac{PSNR_{C3}^{BC} - PSNR_{\Phi 3}^{PM}}{PSNR_{C3}^{BC}} \cdot 100 - \frac{PSNR_{C3}^{BC} - PSNR_{\Phi 3}^{KM}}{PSNR_{C3}^{BC}} \cdot 100$$

$$\Delta UIQI^{BC}(\%) = \frac{UIQI_{C3}^{BC} - UIQI_{\Phi 3}^{PM}}{UIQI_{C3}^{BC}} \cdot 100 - \frac{UIQI_{C3}^{BC} - UIQI_{\Phi 3}^{KM}}{UIQI_{C3}^{BC}} \cdot 100$$

$$\Delta SSIM^{BC}(\%) = \frac{SSIM_{C3}^{BC} - SSIM_{\Phi 3}^{PM}}{SSIM_{C3}^{BC}} \cdot 100 - \frac{SSIM_{C3}^{BC} - SSIM_{\Phi 3}^{KM}}{SSIM_{C3}^{BC}} \cdot 100$$

$$\Delta M_{cp}^{BC}(\%) = (\Delta MSE^{BC} + \Delta PSNR^{BC} + \Delta UIQI^{BC} + \Delta SSIM^{BC}) / 4$$

$$\Delta MSE_{cp}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta MSE^{BC_i}$$

Продовження додатку В

$$\Delta\text{PSNR}_{\text{cp}}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta\text{PSNR}^{\text{BCi}}$$

$$\Delta\text{UIQI}_{\text{cp}}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta\text{UIQI}^{\text{BCi}}$$

$$\Delta\text{SSIM}_{\text{cp}}(\%) = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta\text{SSIM}^{\text{BCi}}$$

$$\Delta\text{M}_{\text{cp}}(\%) = (\Delta\text{MSE}_{\text{cp}} + \Delta\text{PSNR}_{\text{cp}} + \Delta\text{UIQI}_{\text{cp}} + \Delta\text{SSIM}_{\text{cp}}) / 4$$

У даних виразах прийняті наступні позарядкові позначення: ВС - вид спотворення, СЗ - спотворене зображення, ФЗ - фільтроване зображення, РМ - розроблений метод, КМ - альтернативний класичний метод. $\Delta\text{M}_{\text{cp}}^{\text{BC}}$ - узагальнене усереднене значення за всіма показниками по виду спотворення, $\Delta\text{M}_{\text{cp}}$ - узагальнене усереднене значення за всіма показниками за всіма спотворень

Продовження додатку В
Таблиця В.7

Номер зобра- ження	Метрика	Метод			
		Stentiford	Zang-Suen	Wu&Tsai	розроблений
1	2	3	4	5	6
1	MSE	0,02	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,11	35,67	39,21	66,02
	UIQI	0,34	0,97	0,99	1,00
	SSIM	0,34	0,97	0,99	1,00
	Recall	0,35	0,95	0,98	1,00
	Precision	0,35	0,99	0,99	1,00
	F-measure	0,35	0,97	0,99	1,00
	Accuracy	97,54%	99,89%	99,95%	100,00%
2	MSE	0,04	0,00	0,00	0,00
	PSNR	20,39	31,19	31,72	66,02
	UIQI	0,39	0,95	0,95	1,00
	SSIM	0,39	0,95	0,95	1,00
	Recall	0,41	0,93	0,94	1,00
	Precision	0,41	0,97	0,97	1,00
	F-measure	0,41	0,95	0,96	1,00
	Accuracy	96,34%	99,70%	99,73%	100,00%
3	MSE	0,01	0,01	0,01	0,01
	PSNR	24,26	24,28	24,31	66,02
	UIQI	0,63	0,64	0,64	0,65
	SSIM	0,63	0,64	0,64	0,65
	Recall	0,72	0,75	0,73	0,75
	Precision	0,57	0,57	0,58	0,58
	F-measure	0,64	0,65	0,65	0,65
	Accuracy	98,50%	98,51%	98,52%	98,55%
4	MSE	0,01	0,01	0,01	0,01
	PSNR	24,26	24,28	24,31	24,41
	UIQI	0,63	0,64	0,64	0,65
	SSIM	0,63	0,64	0,64	0,65
	Recall	0,72	0,75	0,73	0,75
	Precision	0,57	0,57	0,58	0,58
	F-measure	0,64	0,65	0,65	0,65
	Accuracy	98,50%	98,51%	98,52%	98,55%

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.7

1	2	3	4	5	6
5	MSE	0,02	0,00	0,00	0,00
	PSNR	23,88	33,11	35,88	47,25
	UIQI	0,45	0,94	0,97	1,00
	SSIM	0,45	0,94	0,97	1,00
	Recall	0,46	0,94	0,96	1,00
	Precision	0,46	0,93	0,97	1,00
	F-measure	0,46	0,94	0,97	1,00
	Accuracy	98,36%	99,80%	99,90%	99,99%
6	MSE	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	32,37	32,24	37,21	66,02
	UIQI	0,96	0,96	0,99	1,00
	SSIM	0,96	0,96	0,99	1,00
	Recall	0,94	0,94	0,98	1,00
	Precision	0,98	0,98	0,99	1,00
	F-measure	0,96	0,96	0,99	1,00
	Accuracy	99,77%	99,76%	99,92%	100,00%
7	MSE	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	29,81	29,83	29,90	38,39
	UIQI	0,94	0,94	0,94	0,99
	SSIM	0,94	0,94	0,94	0,99
	Recall	0,93	0,93	0,94	0,99
	Precision	0,95	0,95	0,95	0,99
	F-measure	0,94	0,94	0,94	0,99
	Accuracy	99,58%	99,58%	99,59%	99,94%
8	MSE	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	32,82	32,82	32,97	41,22
	UIQI	0,96	0,96	0,97	0,99
	SSIM	0,96	0,96	0,97	0,99
	Recall	0,96	0,96	0,96	0,99
	Precision	0,97	0,97	0,97	1,00
	F-measure	0,97	0,97	0,97	1,00
	Accuracy	99,79%	99,79%	99,80%	99,97%
9	MSE	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	34,28	34,30	36,70	43,61
	UIQI	0,97	0,97	0,98	1,00
	SSIM	0,97	0,97	0,98	1,00
	Recall	0,96	0,97	0,98	1,00
	Precision	0,98	0,97	0,99	1,00
	F-measure	0,97	0,97	0,98	1,00
	Accuracy	99,85%	99,85%	99,91%	99,98%

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.7

1	2	3	4	5	6
10	MSE	30,86	30,88	32,67	39,12
	PSNR	0,95	0,95	0,97	0,99
	UIQI	0,95	0,95	0,97	0,99
	SSIM	0,94	0,96	0,96	0,99
	Recall	0,96	0,95	0,97	0,99
	Precision	0,95	0,95	0,97	0,99
	F-measure	99,67%	99,67%	99,78%	99,95%
	Accuracy	0,00	0,00	0,00	0,00
11	MSE	29,41	29,40	31,44	45,26
	PSNR	0,92	0,92	0,95	1,00
	UIQI	0,92	0,92	0,95	1,00
	SSIM	0,91	0,94	0,95	1,00
	Recall	0,93	0,91	0,96	1,00
	Precision	0,92	0,92	0,95	1,00
	F-measure	99,54%	99,54%	99,71%	99,99%
	Accuracy	0,00	0,00	0,00	0,00
12	MSE	30,67	30,90	34,37	41,91
	PSNR	0,90	0,91	0,96	0,99
	UIQI	0,90	0,91	0,96	0,99
	SSIM	0,89	0,94	0,96	0,99
	Recall	0,92	0,89	0,96	0,99
	Precision	0,90	0,91	0,96	0,99
	F-measure	99,66%	99,67%	99,85%	99,97%
	Accuracy	0,02	0,00	0,00	0,00
13	MSE	22,80	34,26	36,59	66,02
	PSNR	0,32	0,95	0,97	1,00
	UIQI	0,32	0,95	0,97	1,00
	SSIM	0,33	0,96	0,97	1,00
	Recall	0,33	0,95	0,97	1,00
	Precision	0,33	0,95	0,97	1,00
	F-measure	97,90%	99,85%	99,91%	100,00%
	Accuracy	0,02	0,00	0,00	0,00
14	MSE	22,65	37,46	39,32	66,02
	PSNR	0,21	0,97	0,98	1,00
	UIQI	0,21	0,97	0,98	1,00
	SSIM	0,22	0,97	0,98	1,00
	Recall	0,22	0,97	0,99	1,00
	Precision	0,22	0,97	0,98	1,00
	F-measure	97,82%	99,93%	99,95%	100,00%
	Accuracy	30,86	30,88	32,67	39,12

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.7

1	2	3	4	5	6
15	MSE	0,02	0,00	0,00	0,00
	PSNR	21,76	34,38	36,73	66,02
	UIQI	0,28	0,96	0,98	1,00
	SSIM	0,28	0,96	0,98	1,00
	Recall	0,29	0,97	0,97	1,00
	Precision	0,29	0,96	0,98	1,00
	F-measure	0,29	0,96	0,98	1,00
	Accuracy	97,33%	99,85%	99,92%	100,00%
16	MSE	0,04	0,00	0,00	0,00
	PSNR	19,55	29,09	29,57	40,50
	UIQI	0,32	0,92	0,93	0,99
	SSIM	0,32	0,92	0,93	0,99
	Recall	0,34	0,92	0,92	1,00
	Precision	0,34	0,94	0,94	0,99
	F-measure	0,34	0,93	0,93	0,99
	Accuracy	95,56%	99,51%	99,56%	99,96%
17	MSE	0,01	0,00	0,00	0,00
	PSNR	25,95	21,97	34,55	40,03
	UIQI	0,57	0,90	0,94	0,98
	SSIM	0,57	0,90	0,94	0,98
	Recall	0,57	0,95	0,94	0,98
	Precision	0,58	0,86	0,94	0,98
	F-measure	0,57	0,90	0,94	0,98
	Accuracy	98,98%	99,75%	99,86%	99,96%
18	MSE	0,02	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,13	33,90	37,75	44,74
	UIQI	0,37	0,96	0,98	1,00
	SSIM	0,37	0,96	0,98	1,00
	Recall	0,39	0,95	0,98	1,00
	Precision	0,39	0,97	0,99	1,00
	F-measure	0,39	0,96	0,98	1,00
	Accuracy	97,55%	99,84%	99,93%	99,99%
19	MSE	0,00	0,00	0,00	0,00
	PSNR	31,18	31,68	35,71	44,03
	UIQI	0,91	0,92	0,97	1,00
	SSIM	0,91	0,92	0,97	1,00
	Recall	0,91	0,94	0,97	1,00
	Precision	0,92	0,91	0,97	0,99
	F-measure	0,91	0,92	0,97	1,00
	Accuracy	99,69%	99,73%	99,89%	99,98%

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.7

1	2	3	4	5	6
20	MSE	0,02	0,00	0,00	0,00
	PSNR	22,76	34,71	41,48	66,02
	UIQI	0,24	0,95	0,99	1,00
	SSIM	0,24	0,95	0,99	1,00
	Recall	0,25	0,98	0,99	1,00
	Precision	0,25	0,93	0,99	1,00
	F-measure	0,25	0,95	0,99	1,00
	Accuracy	97,88%	99,86%	99,97%	100,00%

Таблиця В.8

Відносне покращення значень базових метрик у порівнянні з альтернативним методом	Альтернативний метод			У середньому за методами
	Stentiford	Zang-Suen	Wu&Tsai	
$\Delta \text{MSE}^{\text{AM}}, \%$	92,00	0,00	0,00	30,67
$\Delta \text{PSNR}^{\text{AM}}, \%$	94,43	62,63	49,27	68,78
$\Delta \text{UIQI}^{\text{AM}}, \%$	56,85	5,48	2,89	21,74
$\Delta \text{SSIM}^{\text{AM}}, \%$	56,85	5,20	2,89	21,65
$\Delta \text{Recall}^{\text{AM}}, \%$	55,64	4,52	3,46	21,21
$\Delta \text{Precision}^{\text{AM}}, \%$	54,32	5,24	2,36	20,64
$\Delta \text{F-measure}^{\text{AM}}, \%$	55,04	5,02	2,78	20,95
$\Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}}, \%$	1,37	0,21	0,13	0,57
У середньому за показниками ($\Delta \text{M}_{\text{cp}}^{\text{AM}}, \%$)	58,31	11,04	7,97	25,77

Використані наступні показники, що характеризують відносні зміни значень базових метрик:

$$\Delta \text{MSE}^{\text{AM}} (\%) = \frac{\text{MSE}^{\text{AM}} - \text{MSE}^{\text{PM}}}{\text{MSE}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{PSNR}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{PSNR}^{\text{AM}} - \text{PSNR}^{\text{PM}}}{\text{PSNR}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

Продовження додатку В

$$\Delta \text{UIQI}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{UIQI}^{\text{AM}} - \text{UIQI}^{\text{PM}}}{\text{UIQI}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{SSIM}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{SSIM}^{\text{AM}} - \text{SSIM}^{\text{PM}}}{\text{SSIM}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{Recall}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{Recall}^{\text{AM}} - \text{Recall}^{\text{PM}}}{\text{Recall}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{Precision}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{Precision}^{\text{AM}} - \text{Precision}^{\text{PM}}}{\text{Precision}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{F-measure}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{F-measure}^{\text{AM}} - \text{F-measure}^{\text{PM}}}{\text{F-measure}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}} (\%) = - \frac{\text{Accuracy}^{\text{AM}} - \text{Accuracy}^{\text{PM}}}{\text{Accuracy}^{\text{AM}}} \cdot 100$$

$$\Delta \text{MSE}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{MSE}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{PSNR}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{PSNR}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{UIQI}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{UIQI}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{SSIM}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{SSIM}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{Recall}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{Recall}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{Precision}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{Precision}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{F-measure}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{F-measure}^{\text{AM}_i}$$

$$\Delta \text{Accuracy}_{\text{cp}} (\%) = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta \text{Accuracy}^{\text{AM}_i}$$

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	8 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	100,00	62,50	100,00	25,00	100,00	100,00	0,00
	6 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	50,00	0,00	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,17
		PSNR	18,38	18,39	18,38	18,37	18,39	18,74	0,02
		UIQI	0,24	0,22	0,24	0,26	0,18	0,83	57,08
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,12
		Precision	0,76	0,72	0,72	0,81	0,56	0,96	14,80
		Recall	0,27	0,25	0,27	0,29	0,20	0,78	48,81
		F-measure	0,40	0,37	0,39	0,43	0,30	0,86	43,21
		Accuracy	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,98	4,50
3	69 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	79,71	30,76	63,76	61,54	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	100,00	50,00
		MSE	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	33,33
		PSNR	20,16	20,67	20,28	20,04	20,45	23,21	12,29
		UIQI	0,29	0,32	0,30	0,27	0,31	0,76	43,97
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,04
		Precision	0,84	0,96	0,86	0,81	0,91	0,90	-6,01
		Recall	0,31	0,35	0,32	0,30	0,33	0,71	36,10
		F-measure	0,45	0,51	0,47	0,43	0,49	0,79	28,30
		Accuracy	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,98	1,52

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	126 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	78,57	8,73	66,67	92,06	96,03	98,41	2,38
	0 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,06	0,05	0,05	0,07	0,08	0,03	40,00
		PSNR	18,01	19,04	18,88	17,46	16,82	20,68	8,61
		UIQI	0,34	0,42	0,42	0,29	0,21	0,78	36,24
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,06
		Precision	0,81	1,00	0,96	0,69	0,54	0,81	-18,95
		Recall	0,35	0,42	0,42	0,30	0,23	0,79	36,88
		F-measure	0,49	0,59	0,58	0,42	0,33	0,80	20,67
		Accuracy	0,94	0,95	0,95	0,93	0,92	0,97	1,57
7	56 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	69,64	23,21	55,35	71,42	96,42	98,21	1,79
	0 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,03	40,00
		PSNR	18,64	19,38	19,03	18,17	18,94	21,40	10,42
		UIQI	0,33	0,38	0,37	0,29	0,36	0,79	41,10
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,06
		Precision	0,85	1,00	0,93	0,75	0,91	0,81	-18,75
		Recall	0,34	0,40	0,38	0,30	0,37	0,81	41,11
		F-measure	0,49	0,57	0,53	0,43	0,52	0,81	24,24
		Accuracy	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95	0,97	1,71

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	23 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	91,30	56,52	91,30	73,90	95,65	100,00	4,35
	2 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,03	62,50
		PSNR	17,26	17,25	17,26	17,26	17,26	21,94	27,11
		UIQI	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,03	68,95
		SSIM	17,26	17,25	17,26	17,26	17,26	21,94	0,15
		Precision	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,82	-4,42
		Recall	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	56,30
		F-measure	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	51,53
		Accuracy	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,76	4,95
9	95 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	54,73	58,94	24,21	70,52	91,57	97,89	6,32
	6 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	83,30	100,00	16,70
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,09	0,17	0,09	0,09	0,09	0,06	33,33
		PSNR	16,56	13,66	16,59	16,55	16,56	17,90	7,90
		UIQI	0,20	0,10	0,21	0,20	0,20	0,69	47,31
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,14
		Precision	0,98	0,22	0,97	0,98	0,98	0,73	-25,12
		Recall	0,26	0,17	0,27	0,26	0,26	0,72	44,46
		F-measure	0,41	0,19	0,42	0,41	0,41	0,72	30,06
		Accuracy	0,91	0,83	0,91	0,91	0,91	0,94	2,28

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	31 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	100,00	100,00	25,80	64,51	96,77	100,00	0,00
	1 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00	0,00
		MSE	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,00
		PSNR	20,04	20,05	19,91	20,04	19,15	20,57	2,59
		UIQI	0,23	0,23	0,23	0,23	0,16	0,66	42,67
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,03
		Precision	1,00	1,00	0,94	1,00	0,71	0,69	-31,14
		Recall	0,28	0,28	0,28	0,28	0,20	0,66	38,18
		F-measure	0,44	0,44	0,43	0,44	0,31	0,68	23,56
		Accuracy	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,45
13	29 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	100,00	100,00	41,37	79,31	96,55	100,00	0,00
	1 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	25,00
		PSNR	19,46	19,46	19,41	19,46	20,41	21,96	7,59
		UIQI	0,14	0,14	0,14	0,14	0,22	0,73	51,10
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,04
		Precision	0,67	0,67	0,65	0,67	0,99	0,75	-24,39
		Recall	0,19	0,19	0,18	0,19	0,28	0,74	46,74
		F-measure	0,29	0,29	0,29	0,29	0,43	0,74	31,39
		Accuracy	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,97	1,09

Продовження додатку В

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	35 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	65,71	85,71	37,14	57,14	97,14	100,00	2,86
	1 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00	0,00
		MSE	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,04	20,00
		PSNR	18,93	18,93	18,93	18,93	15,82	20,02	5,76
		UIQI	0,21	0,21	0,21	0,21	-0,03	0,67	45,56
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,05
		Precision	0,91	0,91	0,90	0,91	0,02	0,71	-19,36
		Recall	0,26	0,26	0,26	0,26	0,01	0,67	40,90
		F-measure	0,40	0,40	0,41	0,40	0,02	0,69	28,66
		Accuracy	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,96	1,13
15	79 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	77,21	31,64	58,22	64,55	94,93	100,00	5,07
	1 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,05	28,57
		PSNR	17,40	17,40	17,43	17,20	16,29	19,09	9,52
		UIQI	0,27	0,26	0,28	0,25	0,18	0,74	46,55
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,11
		Precision	0,98	1,00	0,98	0,93	0,66	0,76	-23,91
		Recall	0,31	0,31	0,32	0,30	0,22	0,78	46,16
		F-measure	0,48	0,47	0,48	0,45	0,33	0,77	28,89
		Accuracy	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,95	2,31

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	32 ($\vec{L}$)	PCRE ($\vec{L}$), %	100,00	84,37	40,62	87,50	71,87	90,63	-9,37
	1 ($\vec{O}$)	PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	0 ($\vec{C}$)	PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 ($\nexists\vec{C}, \nexists\vec{O}$)	PCRE ($\nexists\vec{C}, \nexists\vec{O}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		MSE	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	16,67
		PSNR	18,38	18,39	18,38	18,37	18,39	18,74	1,90
		UIQI	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,62	44,93
		SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,05
		Precision	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00	0,65	-35,07
		Recall	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,64	40,95
		F-measure	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,65	26,54
		Accuracy	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,45

Продовження додатку В
Таблиця В.10

Метрика	Альтернативний векторизатор					Розроблений векторизатор	Покращення метрики, %
	WinTopo	VectorNow	Vextractor	Img2CAD	Spotlite		
PCRE ($\vec{L}$), %	82,65	66,57	42,41	71,42	92,41	98,72	1,30
PCRE ($\vec{O}$), %	0,00	0,00	8,33	0,00	37,92	100,00	22,09
PCRE ($\vec{C}$), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	15,00
PCRE ($\nabla\vec{C}, \nabla\vec{O}$), %	0,00	0,00	30,00	0,00	40,00	100,00	30,00
MSE	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	27,17
PSNR	18,95	18,92	18,91	18,79	18,39	20,63	8,10
UIQI	0,24	0,25	0,25	0,23	0,20	0,71	44,70
SSIM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,06
Precision	0,92	0,90	0,89	0,85	0,78	0,75	-20,81
Recall	0,28	0,29	0,29	0,30	0,24	0,72	41,64
F-measure	0,43	0,43	0,43	0,44	0,37	0,73	27,93
Accuracy	0,95	0,94	0,95	0,94	0,94	0,96	1,49

Продовження додатку В
Таблиця В.11

Критерій якості векторизації	Метрика	Усереднене покращення за метрикою, %	Усереднене покращення в цілому, %
розпізнавання типів примітивів	PCRE ($\vec{L}$), %	1,30	49,53
	PCRE ($\vec{O}$), %	36,81	
	PCRE ($\vec{C}$), %	100,00	
	PCRE ($\nexists\vec{C},\nexists\vec{O}$), %	60,00	
гомотопність контуру	MSE	27,17	18,61
	PSNR	8,10	
	UIQI	44,70	
	SSIM	0,06	
	Precision	-20,81	
	Recall	41,64	
	F-measure	27,93	
	Accuracy	1,49	

ДОДАТОК Г

ПРИКЛАДИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДІВ

Продовження додатку Г
Таблиця Г.1

		Оригінальне зображення	
		контур	фон
Тестоване зображення	контур	True positive (1;1)	False positive (1;0)
	фон	False negative (0;1)	True negative (0;0)

Метод векторизації контурів бінарних растрових зображень креслень деталей, по суті, розв'язує дві взаємопов'язані задачі:

1) Розпізнавання форми кожного растрового примітиву контуру креслення деталі шляхом віднесення його до одного з визначених типів: «відрізок прямої», «дуга окружності», «окружність», «дуга еліпса» з довільним кутом нахилу, «еліпс» з довільним кутом нахилу.

2) Параметризація кожного растрового примітиву креслення деталі, тобто розрахунок геометричних характеристик примітивів: координат початкової та кінцевої точок, координат центру й діаметру окружності або її дуги, координат центру й діаметрів еліпса або його дуги, кута нахилу еліпса, товщини лінії.

Основним обмеженням вищеназваних задач є гомотопність векторного образу креслення деталі його растровому прототипу, - визначальний фактор якості векторизації примітивів контуру креслення деталі для успішного їх відтворення і модифікації (наприклад, зсуву або масштабування) засобами векторних редакторів. Тому, для комплексної оцінки якості векторного образу контура деталі, крім показників якості зображень (MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Recall, Precision, F-measure, Accuracy), використано, як визначальний фактор якості векторизації, критерій оцінки поелементної гомотопності векторного образу контура деталі його растровому прототипу, типізований за класами примітивів – PCRE (the Proportion of Correctly Recognized Entities)¹.

¹ (укр.) ЧВРП - частка вірно розпізнаних примітивів

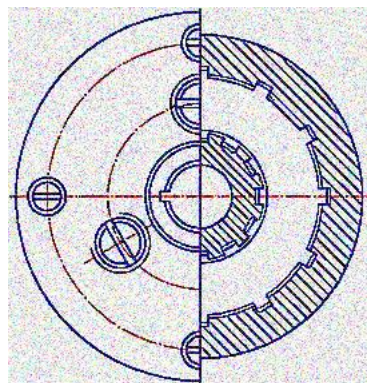
Продовження додатку Г

$$PCRE = K_{ВРП} / K_{П} \cdot 100\%, \quad (Г.1)$$

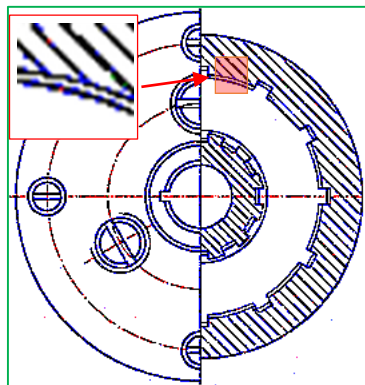
де $K_{П}$ и $K_{ВРП}$, відповідно, загальна кількість і кількості вірно розпізнаних типізованих примітивів у контурі растрового зображення креслення деталі.

Примітивами, як зазначено раніше, вважалися: «відрізок прямої» ($\vec{L}$), «окружність» ($\vec{O}$), «еліпс» ($\vec{C}$), «дуга еліпсу» ($\nexists \vec{C}$), «дуга окружності» ($\nexists \vec{O}$).

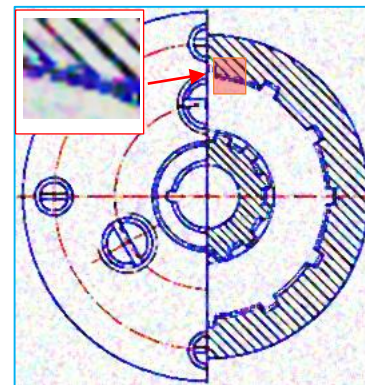
Продовження додатку Г



а)

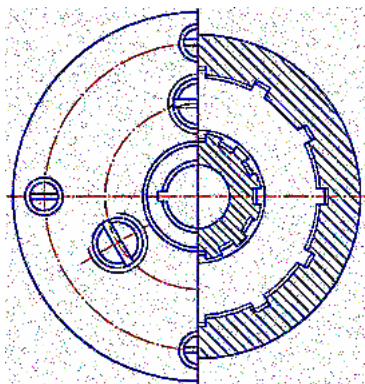


б)

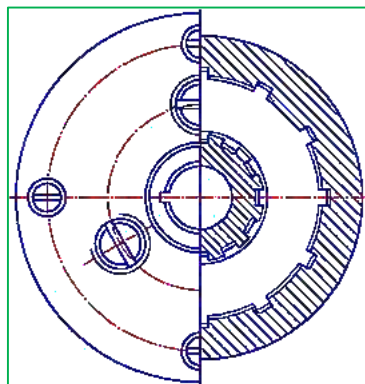


в)

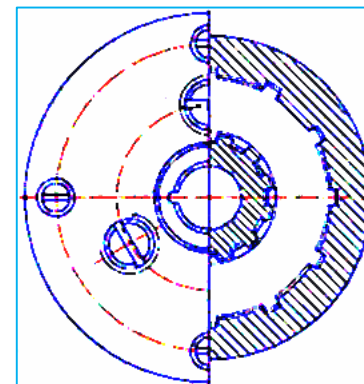
Рисунок Г.1



а)



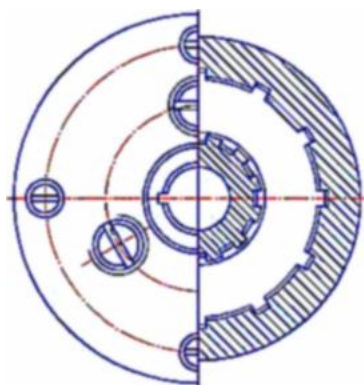
б)



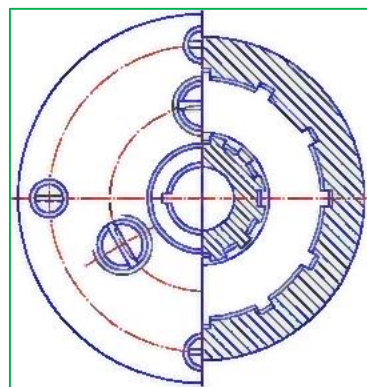
в)

Рисунок Г.2

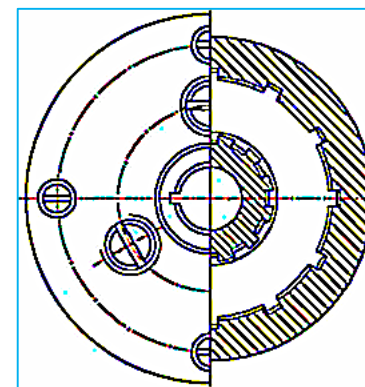
Продовження додатку Г



а)

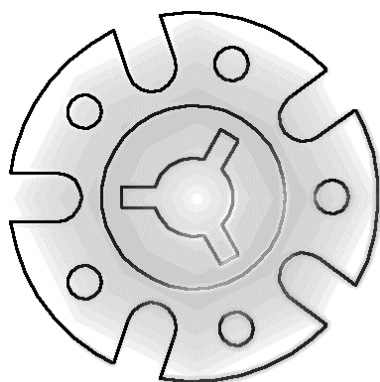


б)

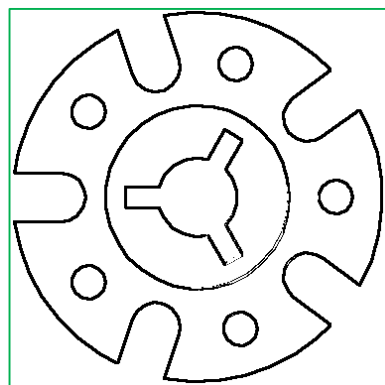


в)

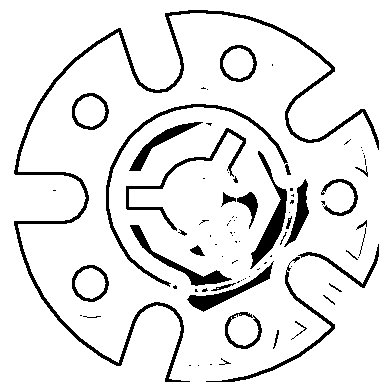
Рисунок Г.3



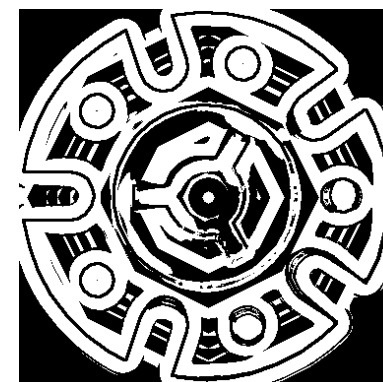
а)



б)



в)



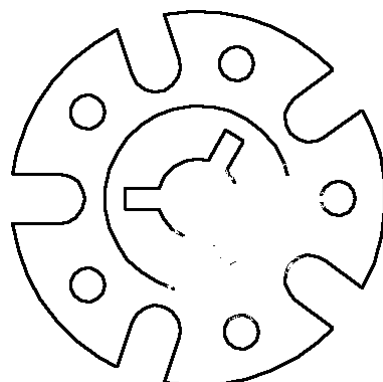
г)

Рисунок Г.4

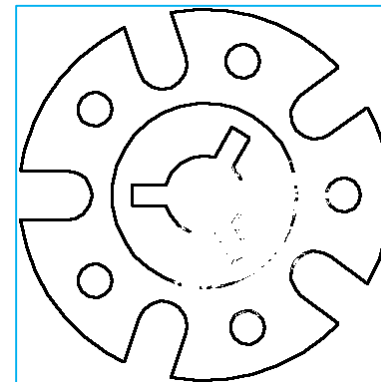
Продовження додатку Г



а)

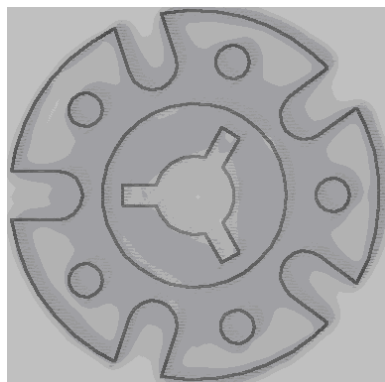


б)

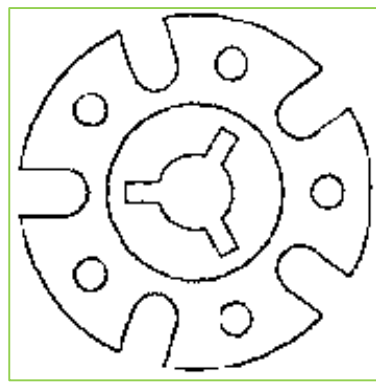


в)

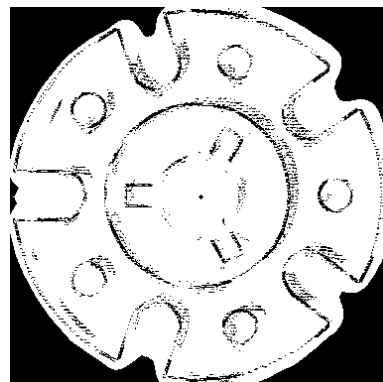
Рисунок Г.5



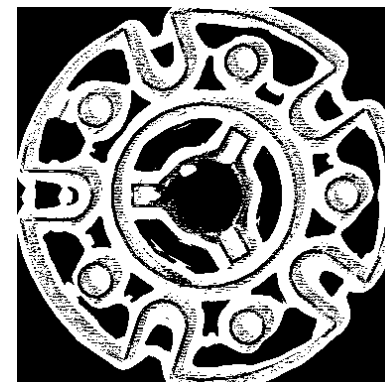
а)



б)



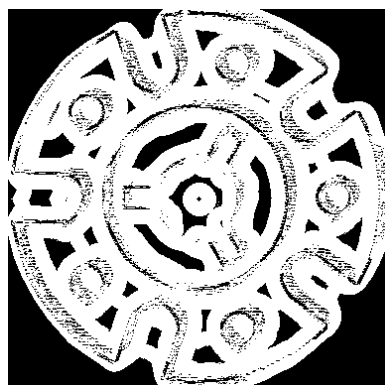
в)



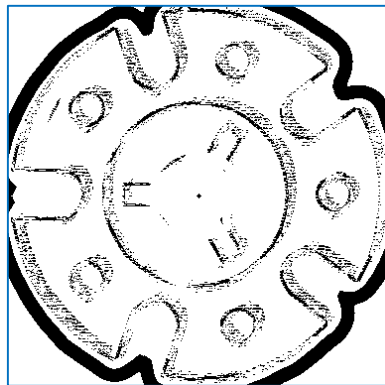
г)

Рисунок Г.6

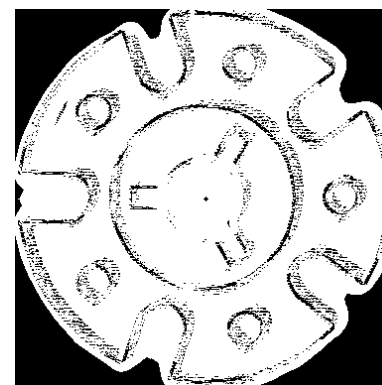
Продовження додатку Г



а)

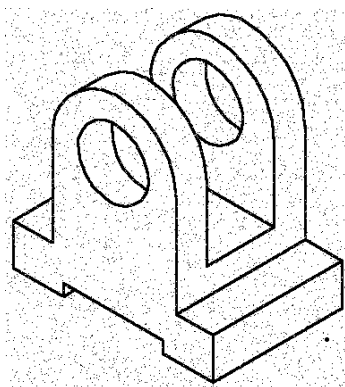


б)

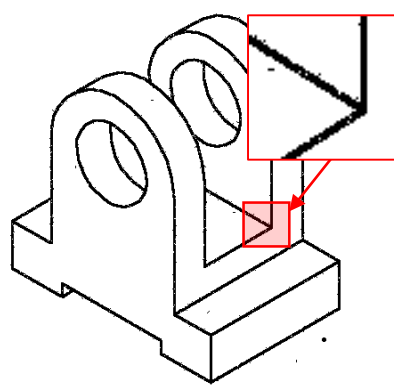


в)

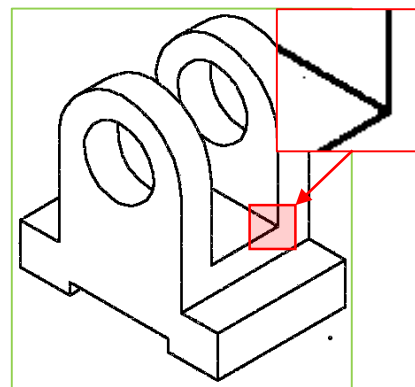
Рисунок Г.7



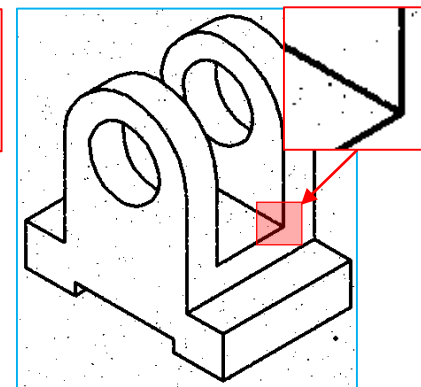
а)



б)



в)



г)

Рисунок Г.8

Продовження додатку Г

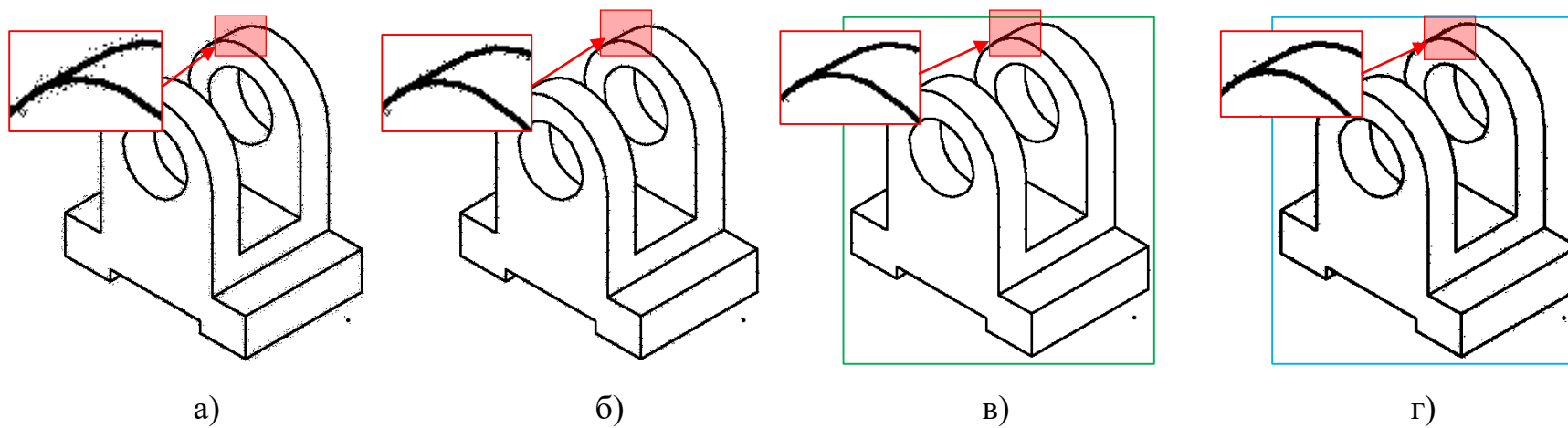


Рисунок Г.9

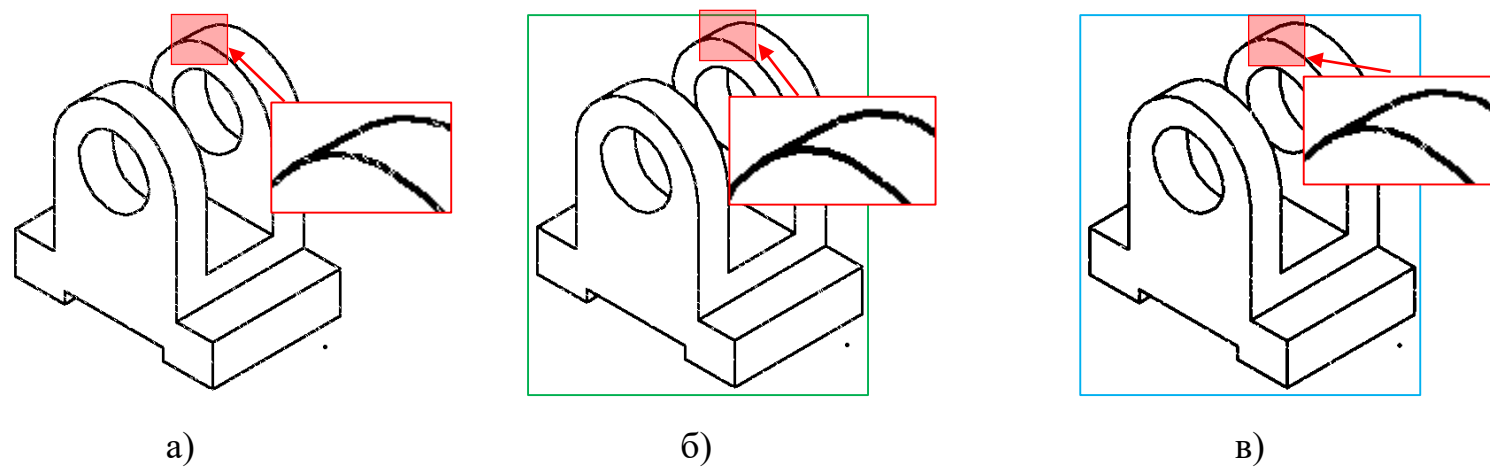


Рисунок Г.10

Продовження додатку Г

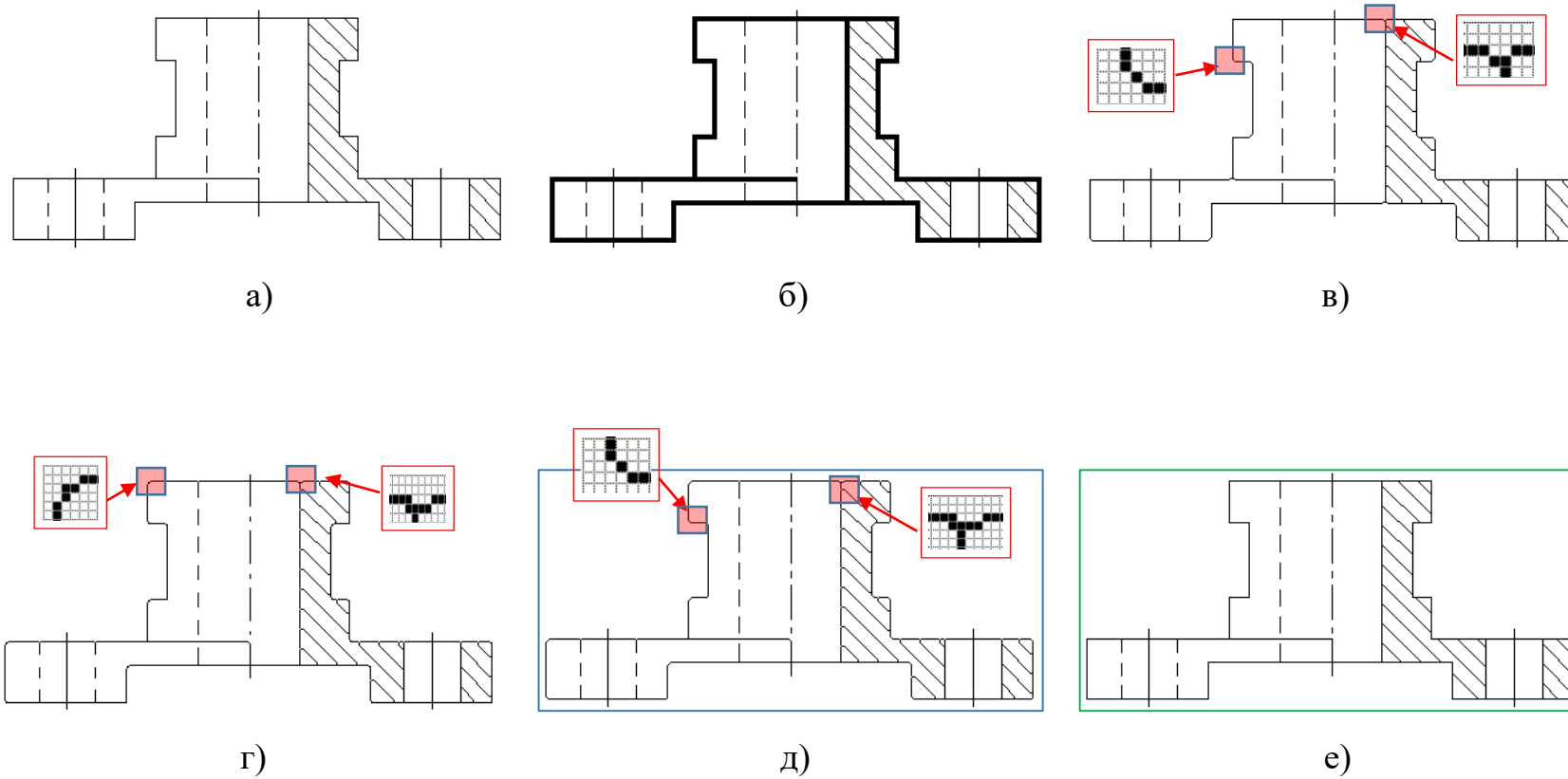


Рисунок Г.11

Продовження додатку Г

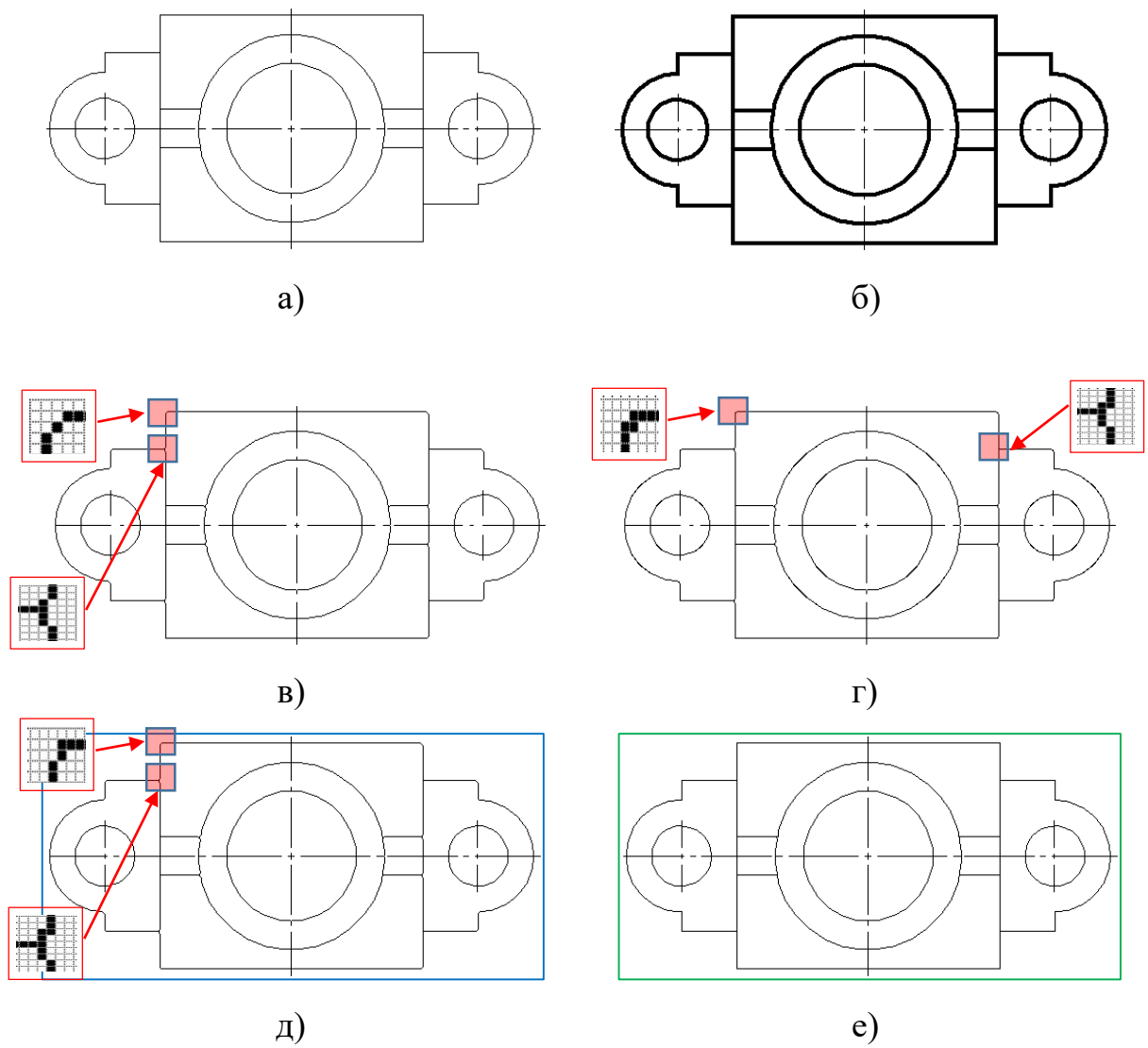
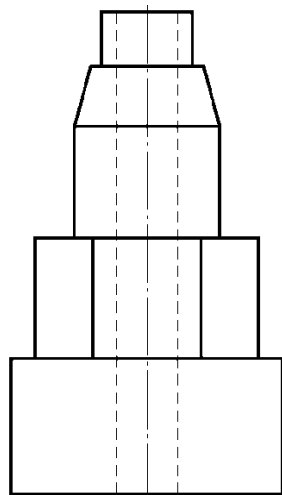
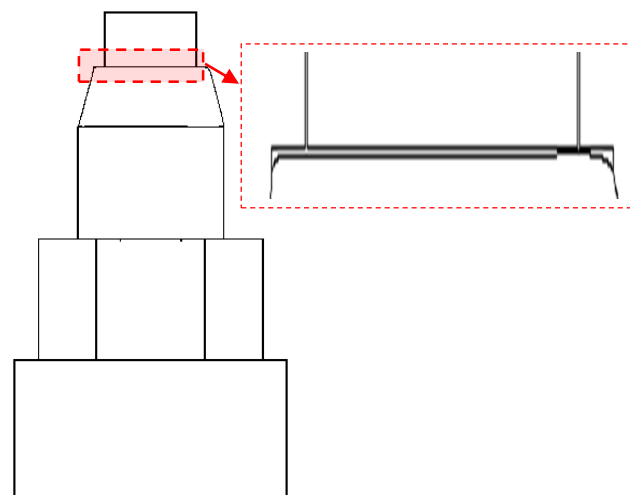


Рисунок Г.12

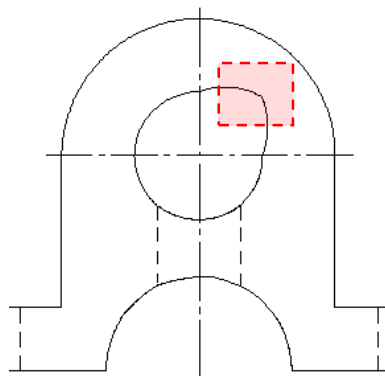
Продовження додатку Г



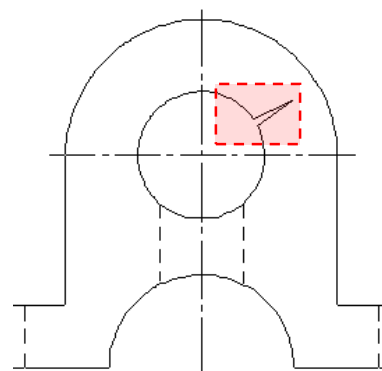
а)



б)



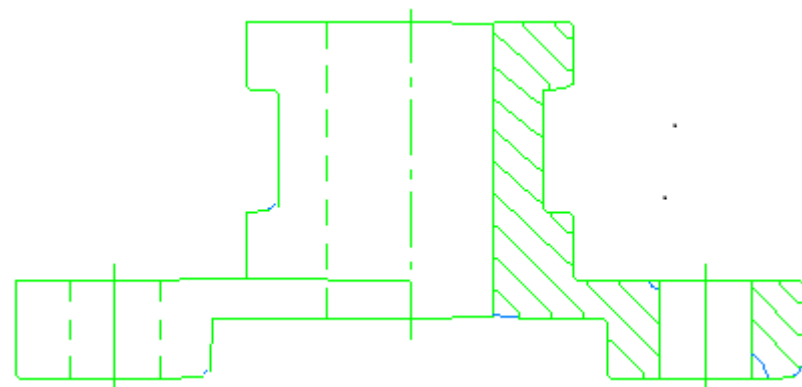
в)



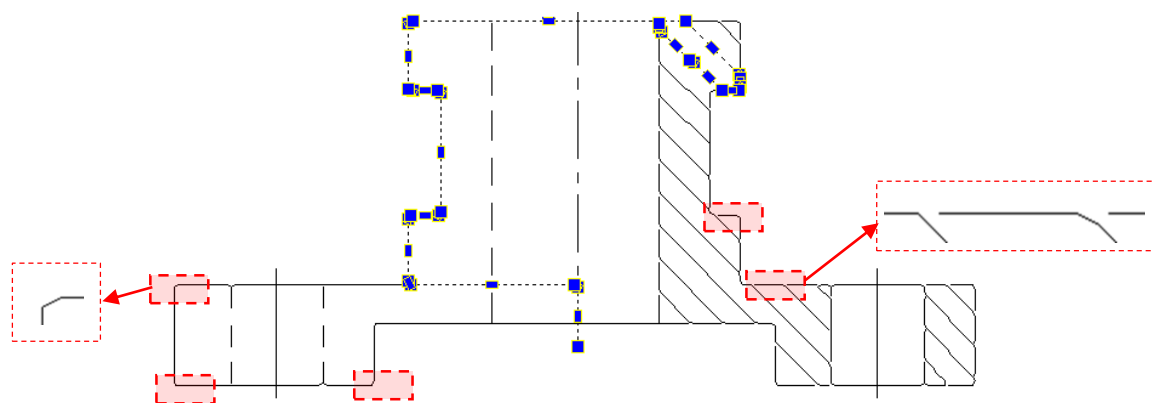
г)

Рисунок Г.13

Продовження додатку Г



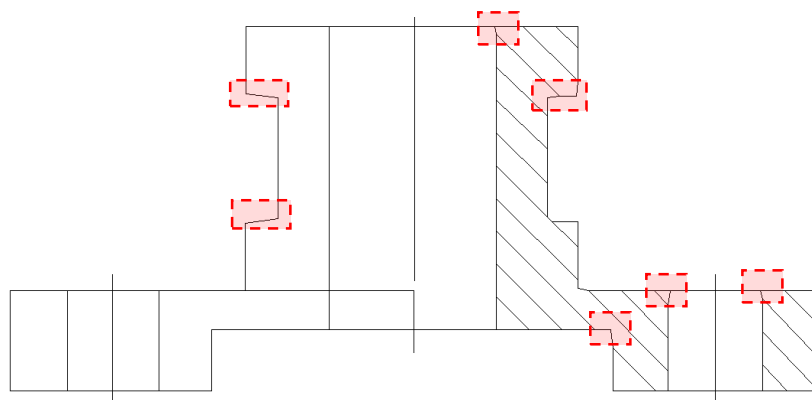
а)



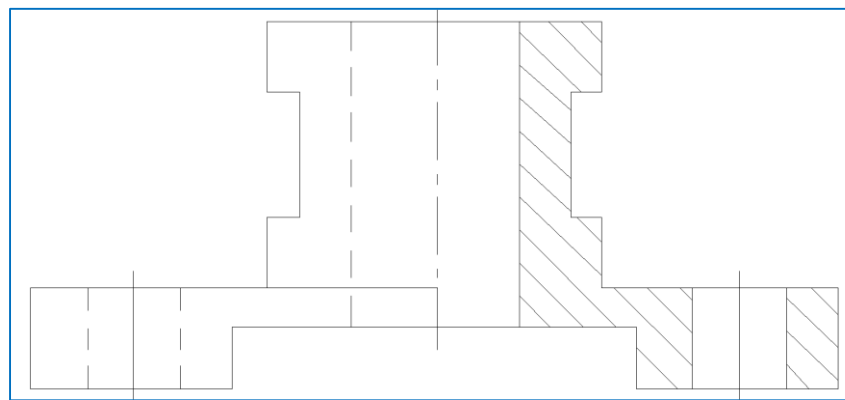
б)

Рисунок Г.14

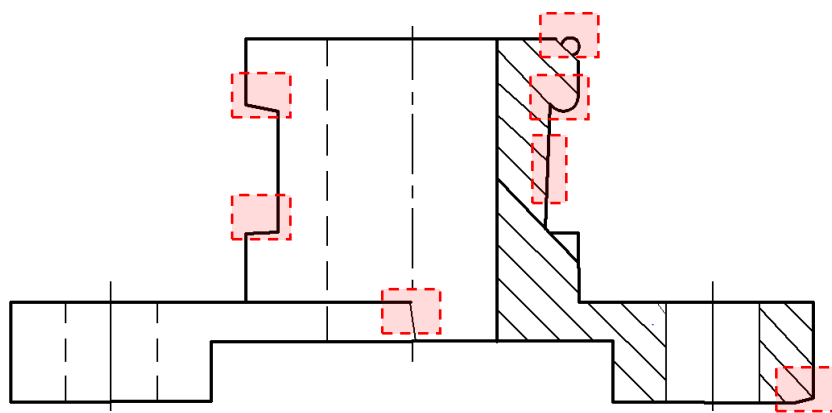
Продовження додатку Г



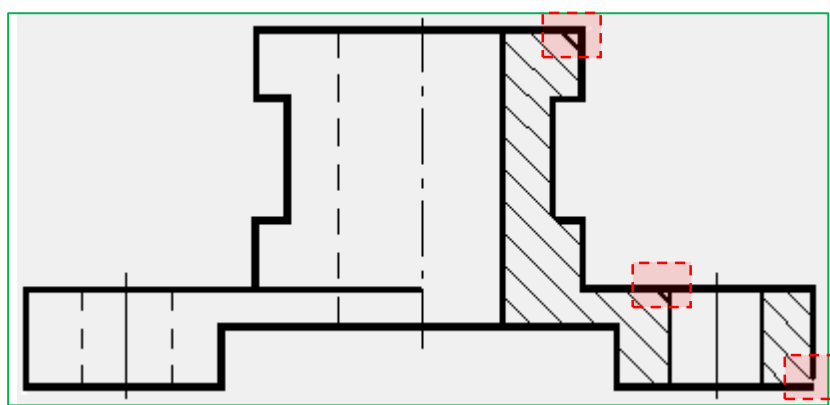
а)



б)



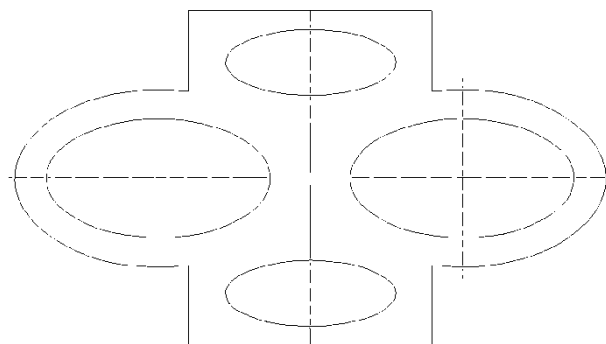
в)



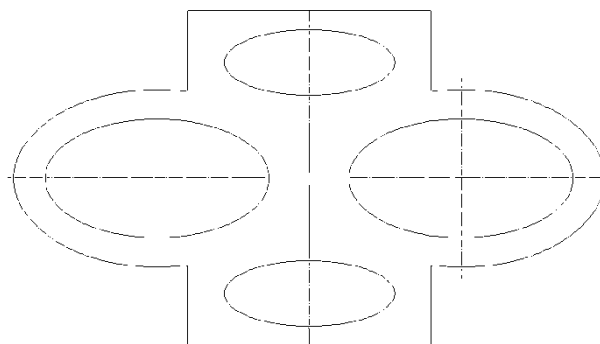
г)

Рисунок Г.15

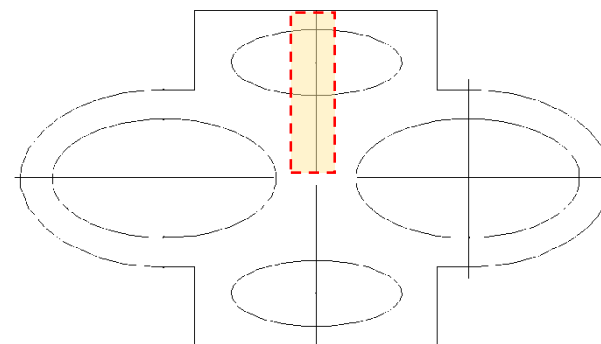
Продовження додатку Г



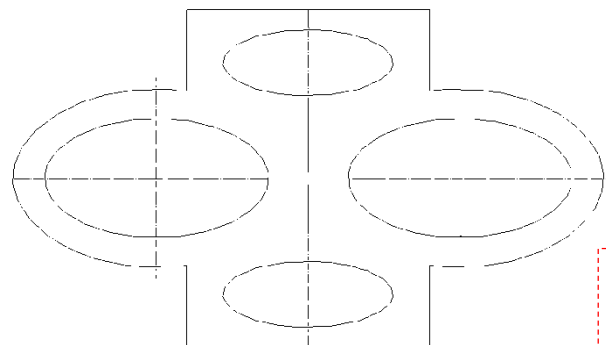
а)



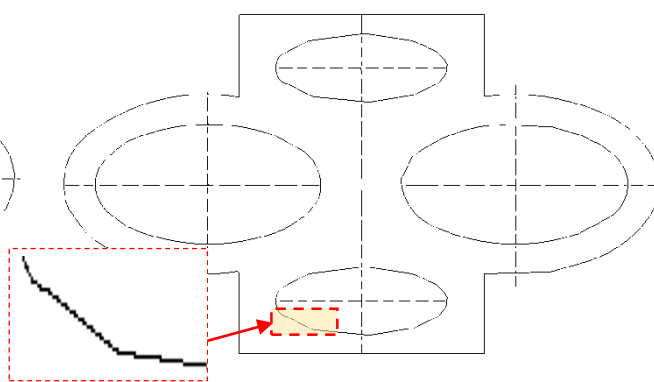
б)



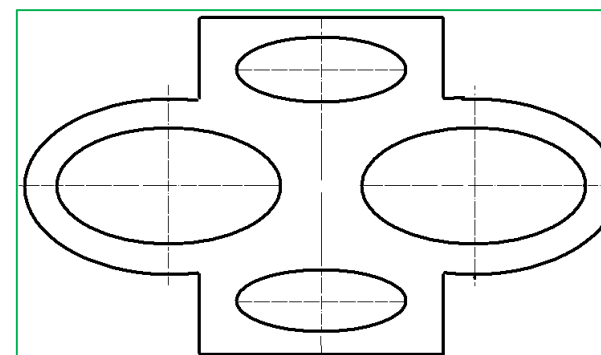
в)



г)



д)



е)

Рисунок Г.16

Продовження додатку Г

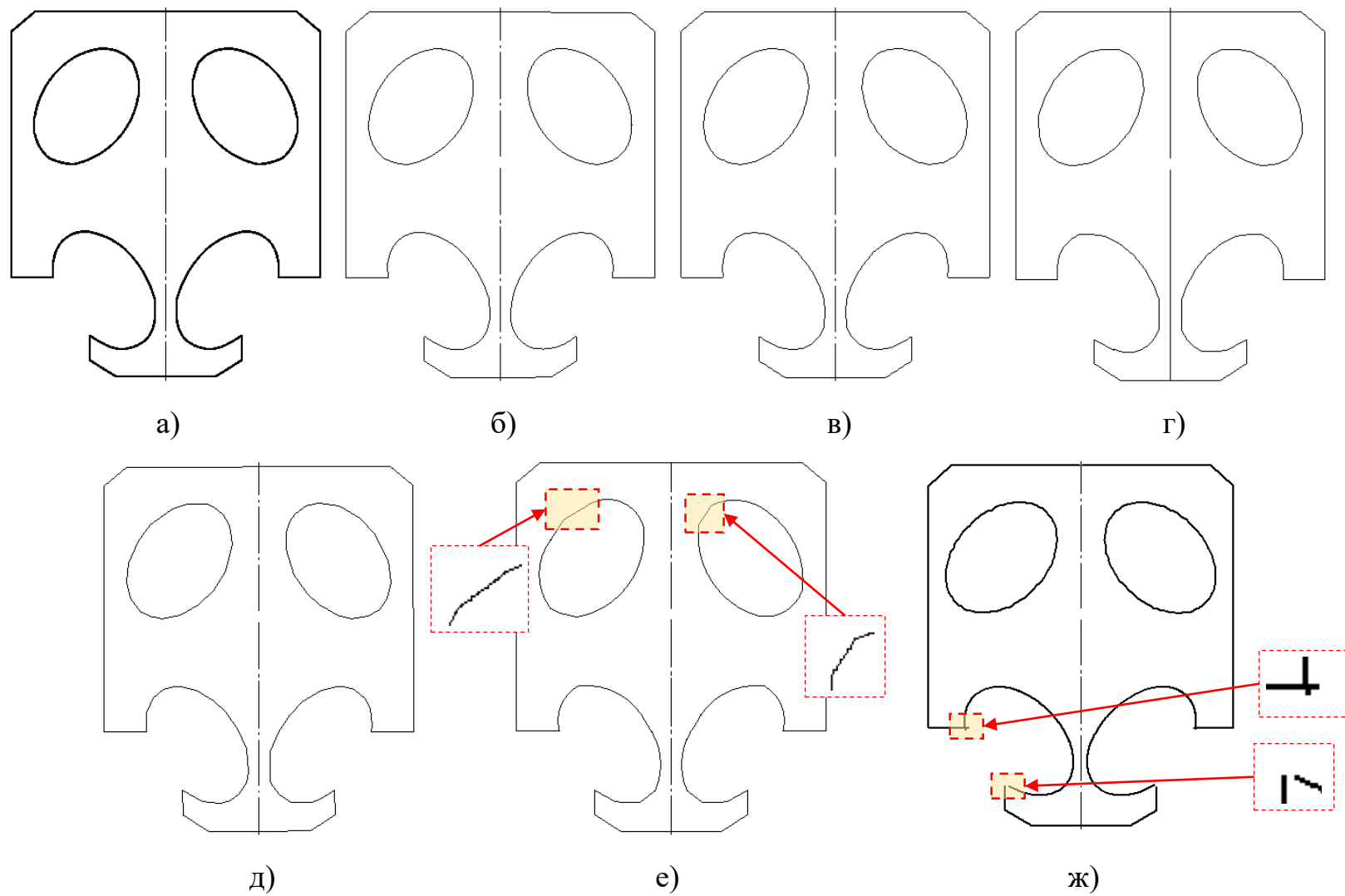


Рисунок Г.17

ДОДАТОК Д

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Продовження додатку Д

Публікації у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Молчанова В. С. Адаптивный пороговый метод бинаризации растровых изображений технических чертежей // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2015. – 2(33). – С.62-70.

2. Молчанова В. С. Разработка гибридного адаптивного метода подавления шума в растровом образе чертежа детали // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 4(74). – С.35-43.

3. Чичкарёв Е. А., Молчанова В. С. Модель и метод векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей // Проблеми інформаційних технологій. – 2016. – 1(19). – С.64-74.

4. Molchanova V. S. The technique of homotopic skeletonization of bit-mapped drawings of parts of sea transport // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – 1(44). – P. 139-148.

Публікації у фахових виданнях

5. Деглина Ю. Б., Денисова В. С. Автоматные алгоритмы синтеза образов // Искусственный интеллект. – 2008. – №3. – С.290-295.

6. Козловский В. А., Молчанова В. С. Построение автоматных моделей простейших графических примитивов // Искусственный интеллект. – 2010. – №4. – С.375-380.

7. Молчанова В. С. Автоматный алгоритм распознавания геометрических примитивов на растровом изображении // Наук. вісник Чернівецького нац. ун-ту ім. Ю. Федьковича. Серія: комп'ютерні системи та компоненти. – 2012. – Том 3, випуск 2. – С.49-55.

8. Молчанова В. С. Восьмисвязный асимметричный алгоритм скелетизации бинарных изображений // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія: Техн. Науки. – 2013. – №2. – С.43-50.

9. Молчанова В. С. Задача классификации сложных специфических объектов на растровых изображениях технических чертежей // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – 1(15). – С.155-160.

Продовження додатку Д

10. Бурса А. Г., Молчанова В. С. Комплекс методов фильтрации сканированных изображений графиков функций // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2016. – №2(33). – С.159-168.

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи

11. Козловский В. А., Молчанова В. С., Деглина Ю. Б. Синтез автоматически представленных образов // Сборник тезисов Двенадцатой международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» (Донецк, 16-23 сентября 2009). – Донецк-Москва: ИПММ НАНУ. – 2009. – С.47-48.

12. Молчанова В. С, Деглина Ю. Б. Автоматное представление дуги окружности // Тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, 25-27 листопада 2009). – Дніпропетровськ: видавництво ДНУ ім. Олеса Гончара. – 2009. – С.190-191.

13. Козловский В. А., Молчанова В. С. Синтез автоматов, описывающих графические примитивы // Збірка праць VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 23-25 листопада 2010). – Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – С.337-342.

14. Молчанова В. С. Модели графических примитивов и их композиций // Збірка матеріалів II Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг» (Донецьк, 11-13 квітня 2011). – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – С.247-250.

15. Козловский В. А., Молчанова В. С., Бурса А. Г. Модель растрового изображения и её преобразование // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (17-22 апреля 2011). – Харьков: Апостроф. – 2011. – С.178-179.

Продовження додатку Д

16. Молчанова В. С. (2013). Решение задачи топологического утончения объектов бинарного растра с использованием специализированных агентов // Збірка матеріалів IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг». Донецьк: ДонНТУ. – 2013. – С.743-747.

17. Молчанова В. С. Эффективный алгоритм фильтрации изображений в процессе обработки специализированной конструкторской документации. Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения в естественных науках и информационных технологиях» (29 сентября-4 октября 2014). – Харьков: Апостроф. – 2013. – С.133-134.

18. Молчанова В. С. Метод распознавания характеристических точек скелета контура растрового образа чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2015». Мариуполь: ПГТУ. – 2015. – С.193-195.

19. Чичкарев Е. А., Молчанова В. С. Метод формирования векторной модели чертежа детали // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2016». Мариуполь: ПГТУ. – 2016. – С.147-148.

20. Молчанова В. С., Чичкарев Е. А. Модель процесса бинаризации в задаче растр-векторной трансформации изображений машиностроительных чертежей деталей // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем» (Київ, 5-9 грудня 2016). – Кіровоград: Центр оперативної поліграфії «Авангард». – 2016. – С.182-187.