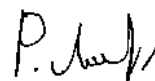


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЛІЩУК РОМАН ІГОРОВИЧ



УДК 004.93

**Комп'ютерна система для випробувань стрілочних
вимірювальних приладів**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
доктор технічних наук,
професор **Кучерук В. Ю.**

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар спеціалізованої

вченої ради



/ Я. Луцик/

Вінниця - 2016

Зміст

Вступ.....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОБРОБЛЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	11
1.1 Аналіз та класифікація існуючих шкал стрілочних вимірювальних приладів.....	11
1.2 Сучасні комп'ютерні системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів	14
1.3 Аналіз існуючих методів бінаризації.....	31
1.4 Аналіз та класифікація існуючих методів скелетизації.....	35
1.5 Обґрунтування розробки нової комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.....	40
1.6 Вибір напрямку та постановка задач досліджень	42
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.....	43
2.1 Розробка методу та структури комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.....	43
2.2 Розробка методу адаптивної бінаризації зображень	48
2.3 Фільтрація зображення медіанним фільтром	51
2.4 Розробка методу скелетизації зображень	56
2.5 Розпізнавання положення стрілки.....	57
2.6 Висновки до розділу	61
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ	62
3.1 Перетворення кута повороту стрілки у вимірне значення приладу.....	62
3.2 Визначення статичних характеристик стрілочних вимірювальних приладів.....	71

3.3	Визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів	79
3.4	Висновки до розділу	94
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.....		96
4.1	Розробка архітектури комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.....	96
4.2	Реалізація програмного забезпечення процесу оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів для їх випробування	103
4.3	Синтез структури бази даних комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.....	118
4.4	Висновки до розділу	121
	Висновки.....	123
	Перелік використаних джерел.....	125
ДОДАТОК А ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ		138
ДОДАТОК Б ФОТОГРАФІЯ РОБОЧОГО МІСЦЯ ПРИ КОНТРОЛЬНО-ЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАННЯХ.....		139

Вступ

Актуальність теми.

Стрілочні вимірювальні прилади є найбільш масовим засобом вимірювань, тому потреба в них зберігається стабільно високою.

Для зниження собівартості продукції й підвищення якості потрібно переходити на автоматизовані технології виробництва, контролю, зокрема, автоматизації приймально-здавальних випробувань. Розв'язок задачі підвищення рівня автоматизації виробництва стрілочних приладів передбачає розробку й впровадження гнучких виробничих систем випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

У даний час системи автоматизації активно впроваджуються в технологічні процеси різних підприємств. Найчастіше керуючі пульти обладнані різноманітними стрілочними приладами, які дозволяють операторові стежити за станом технологічного процесу. Виникає ситуація, коли втручання в технологічний процес є неможливим або економічно недоцільне, проте дублювання або заміна оператора автоматикою необхідні.

Роботи в області автоматизації перевірки стрілочних вимірювальних приладів ведуться в нашій країні й за кордоном близько 30 років, є численні публікації й авторські свідоцтва.

Результати досліджень Д. Б. Волегова, Д. В. Юріна [38], Ю. Г. Свинолупова [28, 90-95], В. П. Войтко, Д. Л. Удута [99, 100], М. С. Ройтмана, Є. Н. Сєдова [96], С. К. Кисельова [50-53, 80-83], В.А. Мішина [29, 73] присвячені автоматизації контролю виробництва стрілочних індикаторів за допомогою оптико-електронних систем, що розпізнають покази стрілочних приладів, виявляють високий рівень розвитку технічних і алгоритмічних засобів. Американська компанія National Instruments є одним зі світових лідерів у технології віртуальних приладів і в розробці й

виготовленні апаратного й програмного забезпечення для систем автоматизованого тестування. За допомогою програмного комплексу LabVIEW (анг. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) побудована автоматизована система розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів [8].

Незважаючи на досягнення, невирішеною залишається задача створення комп'ютерних систем, що забезпечують побудову універсальних автоматизованих комплексів для випробувань аналогових стрілочних індикаторів у статичному та динамічному режимах роботи з підвищеною ефективністю.

Отже, актуальним є розробка методів і засобів оптичного зчитування та визначення статичних і динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, що дозволить підвищити точність вимірювання та знизити часові та трудові витрати. Цього можна досягти шляхом розвитку сучасних комп'ютерних систем для автоматизації основних етапів процесу виробництва та контролю стрілочних вимірювальних приладів, при використанні сучасних методів цифрової оброблення зображень. До їх складу входять методи бінаризації, фільтрації, скелетизації та розпізнавання об'єктів на зображенні.

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

Науково-дослідна робота проводилася протягом 2011-2014 років відповідно до наукового напрямку кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертація відповідає пріоритетному напрямку у приладобудуванні 1.2.8.3 "Розробка нових інформаційних технологій на основі вимірювань електричних, магнітних і оптичних сигналів та їх просторово-часовий аналіз", затвердженому НАН України і Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України (наказ 1066/609 від 26.11.2009 р.) "Про затвердження

основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 роки".

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи полягає у підвищенні точності визначення та зменшення часу випробувань стрілочних вимірювальних приладів у статичному та динамічному режимах роботи на основі оброблення їхнього візуального зображення.

Для досягнення цієї мети поставлені та розв'язані наступні задачі:

- проаналізувати точність вимірювання, швидкодію роботи та вимоги до існуючих комп'ютерних систем для випробувань стрілочних вимірювальних приладів;

- розробити метод та інформаційне забезпечення оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів на основі аналізу відеозображення;

- розробити метод адаптивної бінаризації зображень;

- розробити метод скелетизації напівтонових зображень;

- розробити алгоритм та програмне забезпечення для реалізації та впровадження комп'ютерної системи оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів

- провести експериментальні дослідження якості роботи комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів з метою підтвердження основних теоретичних і наукових результатів роботи.

Об'єктом дослідження є процеси, що протікають в комп'ютерній системі під час під час випробувань стрілочних вимірювальних приладів у статичному і динамічному режимах роботи.

Предметом дослідження є розробка й оптимізація методів, алгоритмів, програмного забезпечення автоматизованої системи оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів в режимі реального часу.

Методи дослідження. У роботі використані узагальнюючий аналіз літературних джерел методів оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів; методи цифрового оброблення зображень: бінаризації, фільтрації, скелетизації, розпізнавання для виділення стрілки на зображенні та знаходження кута відхилення стрілки; теорії математичної статистики та математичного моделювання для перевірки адекватності та точності побудованої математичної моделі. Розробка програмного забезпечення була проведена з використанням принципів об'єктно-орієнтованого та візуального програмування.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше запропоновано структурну схему комп'ютерної системи оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів, що складається з веб-камери, генератора випробувальних сигналів та програмного забезпечення, що дає змогу керувати випробувальним сигналом в статичному та динамічному режимах роботи і розпізнавати покази зі шкал стрілочних вимірювальних приладів;

– вперше розроблено метод оптичного визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, що дає можливість автоматизувати процес їх визначення шляхом покращення об'єктів на зображенні за рахунок зменшення часу експозиції веб-камери;

– вперше розроблено метод адаптивної бінаризації, який відрізняється від існуючих тим, що він побудований на основі подання зображення як інтегрального, що дає змогу підвищити швидкодію його роботи та забезпечує стійкість до шуму на зображенні;

– удосконалено хвильовий метод скелетизації бінарних зображень, який передбачає використанням кіл, кожне наступне з яких, генерується на знайдений точці середньої вісі об'єкта на зображенні, що підвищує точність розпізнавання прямої;

– удосконалено метод оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів, який, на відміну від існуючих, працює в статичному та динамічному режимах роботи за рахунок використання адаптивного методу бінаризації та удосконаленого хвильового методу скелетизації, що дає змогу підвищити швидкодію роботи та точність вимірювання, що дозволяє використовувати даний метод при повірці.

Практичне значення одержаних результатів.

– визначено особливості та сформульовано вимоги до методів і засобів автоматизації процесу оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів;

– розроблено інформаційне та програмне забезпечення процесу оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів для автоматизованого процесу випробувань, що дозволяє зчитувати покази незалежно від типу шкали;

– розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення керуванням процесу оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів в статичному або динамічному режимах роботи;

Результати досліджень впроваджені (акт впровадження № 9 від 7 серпня 2013 р.) на ПАТ "Уманський завод "Мегомметр" при проведенні приймально-здавальних випробувань відділом технічного контролю у процесі виготовлення стрілочних вимірювальних приладів.

ПАТ "Уманський завод "Мегомметр" виготовляє прилади, які наведені в табл. 1.

Близько 80% продукції це стрілочні вольтметри, амперметри мегомметри. Використання запропонованих методів та алгоритмів оброблення візуальної інформації дозволило зменшити час та підвищити точність, достовірність проведення приймально-здавальних випробувань.

Науково-практичні результати дозволяють в середньому на 15% зменшити час та автоматизувати процес випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

Таблиця 1.1 Продукція ПАТ "Уманський завод "Мегомметр"

Назва продукції	2013	2014
ЭВ 0201	2096	1804
ЭВ 0202	95	76
ЭВ 0203	1	1
ЭА 0203	15656	12524
ЭВ 0203	4643	4003
ЭА 0203/1	1011	854
ЭВ 0203/1	571	457
ЭА 0203/1У	176	154
ЭВ 0203/1У	78	65
ЭА 0300-3	604	497
ЭВ 0300-3	220	183
ЭА 0300-2	109	88
ЭВ 0300-2	120	97
МА 0201	1713	1462
МА 0202	744	612
МА 0203	95	81

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі ідеї і розробки: [62, 20] – розроблено метод адаптивної бінаризації на основі інтегральних зображень, який стійкий до шуму; [35] – розроблено метод скелетизації, який дозволяє більш точно визначити середню вісь об'єкта; [63, 65] – розроблено алгоритм функціонування та програмне забезпечення комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися на таких міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, зокрема: X міжнародна конференція "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)"; X Всеукраїнська міжнародна конференція УкрОбраз 2010, м. Київ, 2010; III Міжвузівська науково-практична конференція, м. Умань, 2010; I Міжнародна наукова конференція "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах" (ВКДТС-2011); VI International Conference On Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2012", Vinnytsia, III Міжнародна наукова конференція "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах" (ВКДТС-2015).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 13 наукових працях, серед яких 5 статей у фахових виданнях України, з них 2 статті у журналах, що реферуються у наукометричних базах (Index Copernicus International, РІНЦ), 1 патент України на корисну модель та 7 тезах доповідей у матеріалах конференцій.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОБРОБЛЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

1.1 Аналіз та класифікація існуючих шкал стрілочних вимірювальних приладів

Відповідно до [42] шкали, які наносять на циферблат вимірювальних приладів, поділяють:

- 1) за формою на прямолінійні, дугові, кругові. Прямолінійні шкали в свою чергу поділяються на горизонтальні та вертикальні шкали;
- 2) по відношенню цін поділок в межах однієї шкали на рівномірні, нерівномірні;
- 3) за кількістю стрічок в одній шкалі на однострічкові, багатострічкові;
- 4) за світлотехнічними характеристиками на світловідбивні, світловипромінюючі.

Приклади шкал показані на рис. 1.1.

Будова шкали повинна базуватися на основних графічних елементах, що описують шкалу (рис. 1.2):

- позначки шкали – основні або числові (A);
- середні (B) і малі (C);
- довжина поділу шкали (Δ);
- базовий блок шкали – L ;
- число відліку вимірюваної величини;
- висота шрифту відліку – H ;
- товщина обводу шрифту – $a=H/6$.

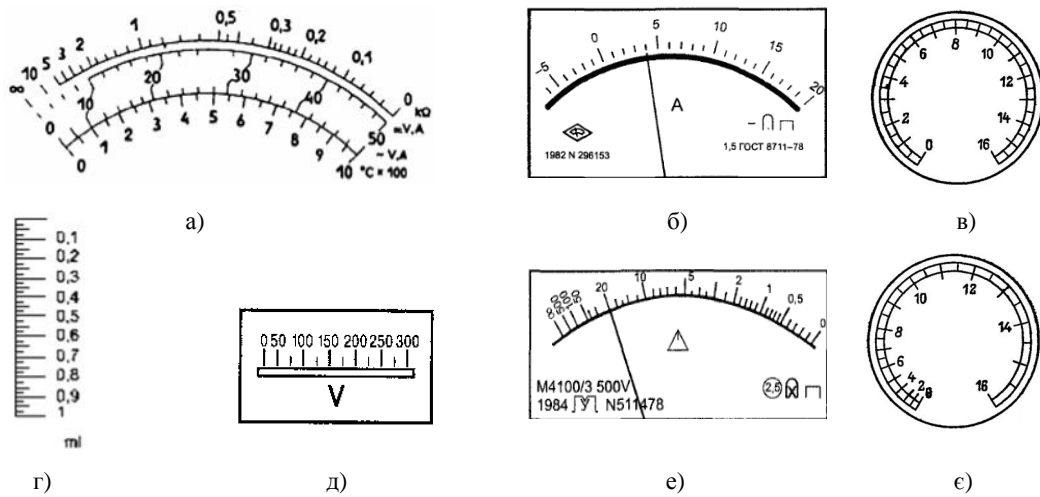


Рисунок 1.1 – Типи шкал: а) приклад багатострічкової шкали; б) приклад дугової рівномірної шкали; в) приклад кругової рівномірної шкали; г) приклад прямолінійної вертикальної шкали; д) приклад прямолінійної горизонтальної шкали; е) приклад дугової нерівномірної шкали; е) приклад кругової нерівномірної шкали

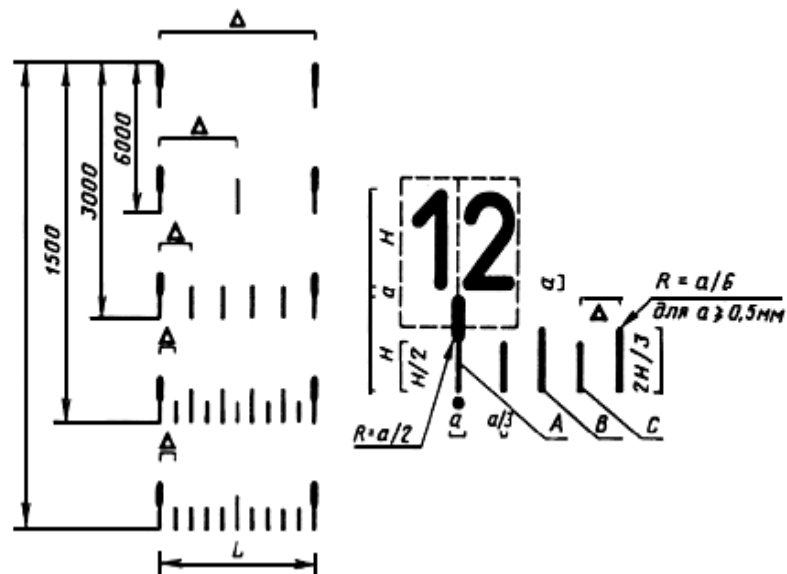


Рисунок 1.2 – Графічні елементи шкали

Позначення на шкалах приладів несуть інформацію про призначення приладу, одиниці вимірювання, на які він розрахований, клас точності (у відсотках від нормованого значення вимірюваної ним величини, що відповідає останній цифровій позначці шкали приладу), систему

вимірювального механізму, який використовується у даному приладі; нормальне положення приладу; величину опору електричних кіл переносних приладів (а для послідовних кіл – і величину їхніх індуктивностей); про наявність власного захисту від дії сторонніх магнітних чи електричних полів; захист від впливу зовнішнього середовища; про необхідність попереднього ознайомлення з додатковими вказівками, що є у паспорті чи описі приладу; відомості про підприємство, де цей прилад виготовлено, та рік його виготовлення.

Класифікація шкал приладів зображено на рис. 1.3.

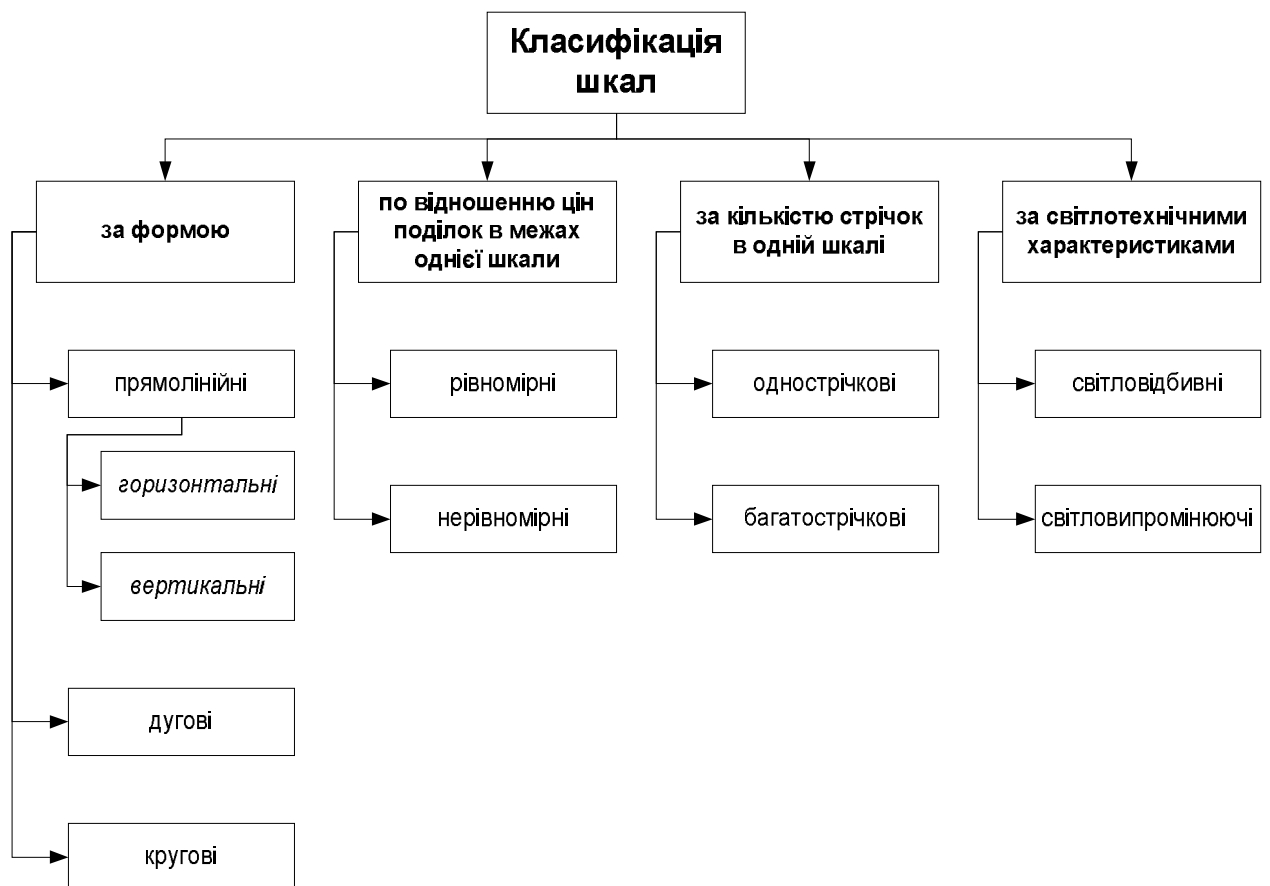


Рисунок 1.3 – Класифікація шкал

1.2 Сучасні комп'ютерні системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

Сучасний рівень комп'ютерних систем з використанням засобів технічного зору дають широкі можливості автоматизації випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

На сьогодні в галузі автоматизації повірки стрілочних вимірювальних приладів склалося два напрямки, що відрізняються по методу розв'язку задачі, але досягаючи приблизно однакових результатів. До першого напрямку відносяться методики оптичного розпізнавання показів приладу, які не зв'язані з шкалою. Сюди можна віднести методику, яка розроблена в Уляновському політехнічному університеті, під керівництвом д.т.н. професора Мішина В.А. До другого напрямку можна віднести методики, що здійснюють безпосереднє зчитування показів зі шкал приладів засобами технічного зору.

Роботи з автоматизації повірки й градування стрілочних приладів, у тому числі – манометрів, проведені в Томському політехнічному університеті разом з ВАТ "Манотомь" у 1989 року, спрямовані на створення контрольних-вимірювальних систем, призначених для контролю характеристик стрілочних приладів [90, 91].

Основними складовими комп'ютерної системи є: комп'ютер з пакетом прикладного програмного забезпечення; джерело тестового сигналу, яке керується оператором; стенд для розміщення приладів, що повіряються; відеоблок; принтер для друкування висновку протоколів перевірки (рис. 1.4).

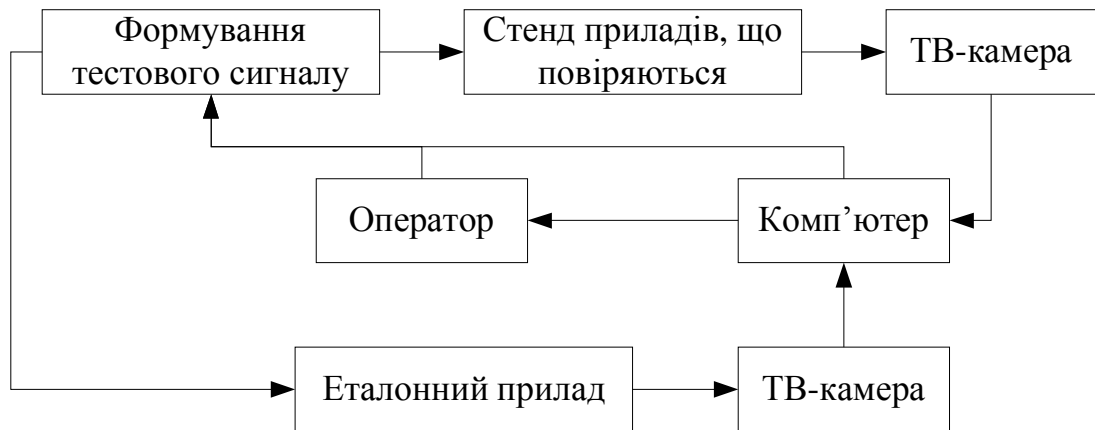


Рисунок 1.4 – Будова комп'ютерної системи

Формування тестового сигналу здійснюється залежно від наявності програмно-керованих засобів задання тиску – автоматично по заданій програмі, або оператором, по запиту програми за допомогою еталонного приладу засобами формування тиску з ручним керуванням. У свою чергу, при використанні програмно-керованого генератора тестового сигналу, що не має достатнього метрологічного запасу стосовно приладу, що повіряється, значення тестового сигналу визначається по еталонному манометру автоматично за допомогою додаткової тв-камери. Таким чином, стосовно до різних видів вимірювань розроблена універсальна конфігурація контрольно-вимірювальної системи, що забезпечує перевірку стрілочних манометрів, як по методу еталонного сигналу, так і по методу еталонного приладу.

При переході з одного виду вимірювання на інший у структурі контрольно-вимірювальної системі змінюється тільки генератор тестового сигналу.

Відеоблок призначений для оброблення телевізійного зображення приладу й передачі його в комп'ютер. До складу відеоблоку входить телевізійна камера й обладнання керування введенням зображення в комп'ютер, яке дозволяє послідовно звертатися до ТВ-камер.

Кількість приладів, що одночасно повіряються, є обмежений, з одного боку, формуванням тестового сигналу, а з іншого – типами шкали манометрів, їх метрологічними характеристиками й пропускнуою здатністю відеоблоку. Тому застосування розглянутих вимірювальних систем у виробництві в першу чергу визначається наявністю швидкодіючих алгоритмів оброблення зображень, точністю вимірювання, простотою апаратної частини системи та швидкістю прийняття рішень про якість приладів, що повіряються.

Розпізнавання на індикаторній частині приладу об'єктів стрілочного показчика є ключовою ланкою процесу знімання показань.

Тому систему розпізнавання в цьому випадку слід розглядати, як вимірювальний засіб, а якість розпізнавання слід розглядати як точність вимірювань.

Дотепер у теорії розпізнавання не піднімалося питання про розпізнавання з метою виміру. У силу вимоги адаптивності до різних типів приладів, що повіряються, специфіки роботи з відеосигналом і ряду інших причин, значення більшості параметрів алгоритмів розпізнавання, необхідних для роботи комплексу в режимі перевірки й розбраковування, апріорі відомі.

Алгоритмічне забезпечення комп'ютерної системи, що містить апаратно-програмний блок розпізнавання зображення, що й забезпечує зчитування показів зі шкал стрілочних приладів, будується на основі нейронних мереж.

Значення всіх необхідних для експлуатації параметрів системи, що забезпечують досягнення нею необхідних метрологічних характеристик, надаються в спеціальному режимі попереднього навчання. На першому етапі в діалоговому режимі для певного типу приладів вводиться інформація, така

як клас точності або число відміток приладу; формуються дані про шкалу приладу. На другому етапі ітераційним методом визначаються значення параметрів алгоритму розпізнавання стрілочного: об'єм кадру, що вводиться, граничні значення бінаризації відеосигналу, кількість послідовних введень зображення, коефіцієнт кореляції розподіленої статистики координат стрілочного індикатора, статистичні й геометричні параметри фрагмента оцифрованої оцінки та інші. Заключним етапом навчання для приладів з типовими шкалами є формування шкали з максимальною апроксимацією. Результатом навчання є досягнення вимірювальною системою характеристик, розрахованих від класу точності приладу, що повіряється. Якість навчання враховується на етапах експериментального визначення систематичної похибки та оцінки середньоквадратичного відхилення випадкової похибки й контрольної перевірки, що є останнім етапом ітераційного процесу навчання. Другою задачею навчання є оптимізація параметрів, що впливають на швидкодію зняття показів, а саме – точність вимірювання і максимальна швидкодія.

Етап перевірки містить у собі наступні кроки: попередня прив'язка приладів до системи координат, корекція похибок через їхній зсув у площині оптичної системи; визначення кутового положення стрілочного покажчика на відмітках, що повіряються, і зняття показів; визначення основної похибки, варіації показів, залишкового відхилення від нуля; накопичення статистики прийнятих рішень.

Необхідною умовою експлуатації контрольно-вимірювальної системи є періодична перевірка відповідності параметрів алгоритмів розпізнавання вихідним умовам і корекція їх значень (самодіагностика).

Очевидно, що такі апаратні складові, як телевізійна передавальна камера й обладнання оброблення відеосигналу не є вимірювальними

приладами, і вони не можуть бути поелементно атестовані як частини вимірювальної системи. Далі, алгоритмічні й програмні засоби повинні забезпечувати нормальну роботу системи при різних умовах експлуатації, таких як нерівномірність освітлення, позиціонування приладу в площині оптичної системи і т.д. Тому до оцінки точності вимірювання не можна підходити традиційними методами оцінки характеристик вимірювальних засобів.

Метрологічна атестація установки для перевірки манометрів проводилися по методу еталонного приладу за допомогою фізичного імітатора манометра, тому що це не вимагає перенавчання системи й не спричиняє зміни досягнутих параметрів алгоритмів перевірки. Такі імітатори являють собою програмно-керовану кутову міру, зовнішню копію реального вимірювального приладу з електричним приводом від комп'ютера.

Що стосується автоматизації градуювання, то по практичній цінності результатів слід виділити роботу, виконану в Томському університеті систем керування й радіоелектроніки по «Дослідженню можливості створення автоматизованої технології й технічних засобів її промислової реалізації» для автоматизації виготовлення шкал стрілочних приладів, у тому числі прецизійних стрілочних манометрів [91].

Впровадження такої технології в промислове виробництво манометрів або інших стрілочних приладів дозволить значно знизити трудомісткість операцій налаштування точних приладів.

Здійснюють це в такий спосіб. На підготовлений до операції шкало-гравірувальний пристрій, на індикаторній частині якого розміщують технологічний, вільний від написів циферблат і стрілочний індикатор, аналогічний реальному, встановлюють перед об'єктивом передавальної телевізійної камери. Попередньо в комп'ютер задають геометричні параметри

зображення майбутньої шкали. За допомогою обладнання введення зображення перетворюють зображення в бінарне й вводять його в комп'ютер для оброблення. Встановлюють на вході приладу послідовно еталонні сигнали, у тому числі й нульові. Після того, як стрілочний індикатор встановиться в положення, відповідне до вхідного сигналу, вводять послідовно відповідні зображення в комп'ютер і запам'ятовують їх. Здійснюють оброблення отриманих масивів зображень таким чином, що одержують відповідні до еталонних сигналів зображення стрілочного індикатора на вільному від інших зображень індикаторному просторі приладу. Знаходять точку перетину середніх ліній зображень стрілочного індикатора як дійсне положення центру його обертання, одержують рівняння прямої – середньої лінії відповідного зображення – у полярній системі координат, одержують рівняння шкали приладу у вигляді полінома або набору функцій, що зв'язують залежностями отримані кути повороту стрілки й вхідні сигнали.

Отримане рівняння шкали передають на автоматизований шкало-гравірувальний пристрій і наносять малюнок шкали на поверхню заготовки індикаторної частини приладу з урахуванням попередньо заданих параметрів зображення шкали.

Таким способом можна одночасно робити градування групи приладів, тим самим у кількості раз підвищувати ефективність способу.

На рис. 1.5 показана структурна схема установки. До її складу входять: 1 – автоматизований калібратор тестових сигналів (для манометрів – це калібратор тиску), 2 – керуючий комп'ютер, 3 – засіб технічного зору – передавальна телевізійна камера, з обладнанням введення зображення в комп'ютер, 4 – автоматизований шкало-гравірувальний пристрій, керований комп'ютером.

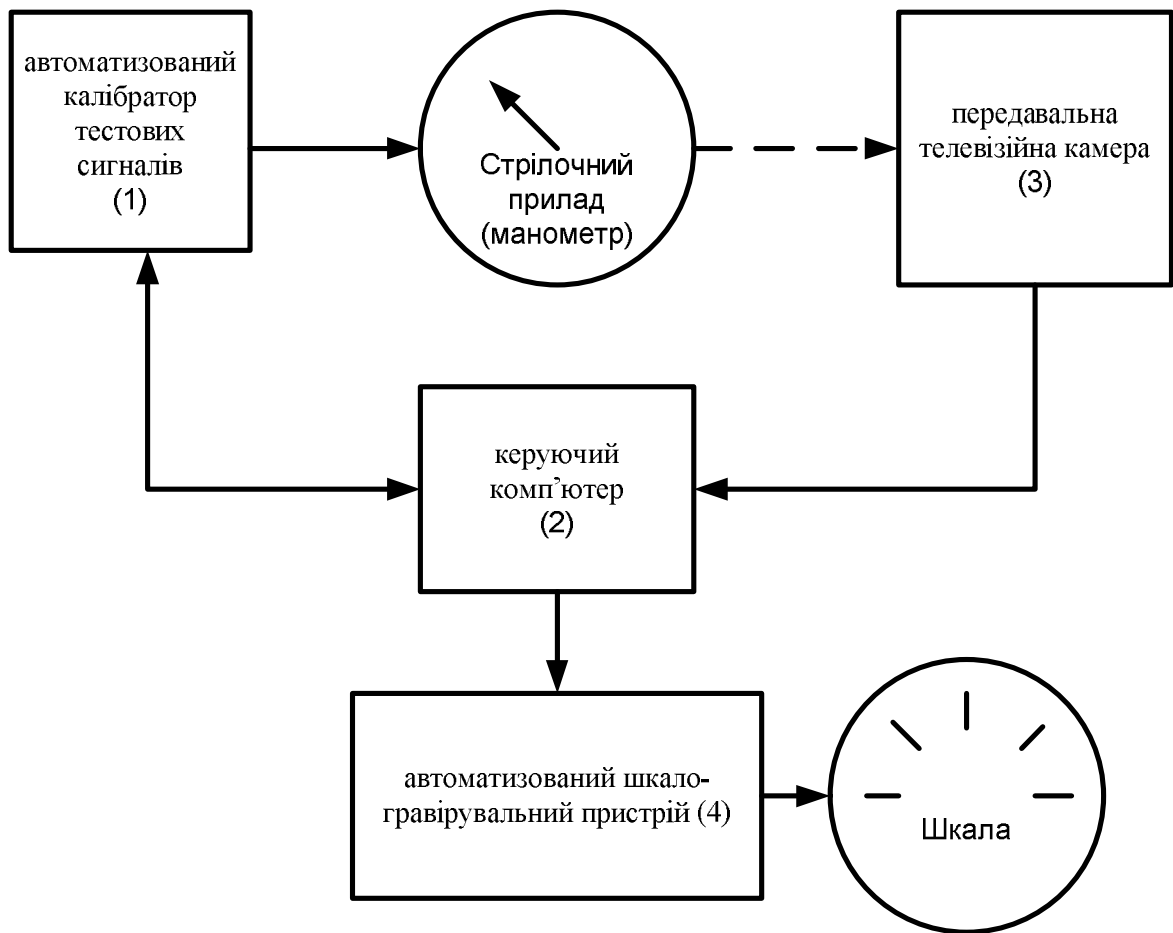


Рисунок 1.5 – Структурна схема автоматизованої градуювальної системи

Американська компанія National Instruments є одним зі світових лідерів у технології віртуальних приладів і в розробці й виготовленні апаратного й програмного забезпечення для систем автоматизованого тестування. За допомогою програмного комплексу LabVIEW побудована автоматизована система розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів (рис. 1.6).

Необхідне програмно-апаратне забезпечення: система технічного зору на базі аналогової камери й плати National Instruments PCI-1405 або цифрової камери з інтерфейсом Fireware (IEEE-1394) або USB, аналоговий стрілочний вольтметр, програмний комплекс LabVIEW, додаткові модулі IMAQ, Vision Assistant.

Задача складається з декількох пунктів:

- одержання зображення з відеокамери;
- усунення паралакса зображення;
- бінаризація зображення;
- зчитування показів стрілочного приладу.

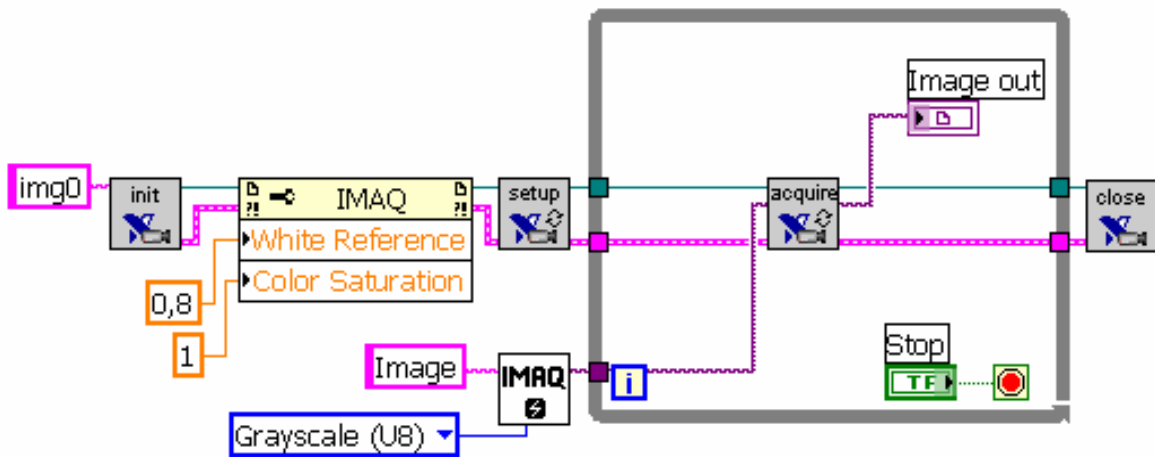


Рисунок 1.6 – Автоматизована система розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів

Зображення вводиться за допомогою стандартних засобів NI Vision. Для кращого розпізнавання показів стрілочного приладу налаштовують параметри камери, такі як яскравість, контраст, рівень посилення й інші.

Через коротку фокусну відстань камери зображення, одержуване з неї, має яскраво виражені геометричні викривлення (ефект "риб'яче око"). Для збільшення точності розпізнавання необхідно усунути паралакс. Для цього фотографується тестове зображення, що складається із точок, розташованих у вершинах прямокутної сітки. Потім відбувається перетворення, що переводить спотворене зображення в правильне.

Метод розпізнавання базується на порівнянні трьох кадрів: з поточним, мінімальним і максимальним показаннями стрілочного приладу (рис. 1.7).

Якщо досягнути повної нерухомості всієї експериментальної установки, то ці кадри повинні відрізнятися лише положенням стрілки. Віднявши попіксельно отримаємо зображення трьох стрілок. На зображенні, крім необхідних трьох стрілок присутні шуми, обумовлені власними шумами матриці камери, шуми, що, з'явилися в результаті тремтіння установки або зміни освітлення. Усунути ці дефекти можна за допомогою бінаризації зображення. У підсумку, програмно вимірявши кути між стрілками, отримуємо необхідні покази стрілочного приладу.

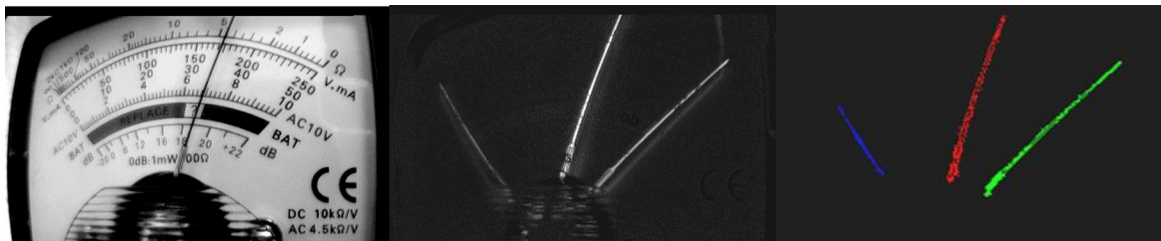


Рисунок 1.7 – Зображення приладу, які демонструють етапи розпізнавання

Пакет NI Vision містить готові засоби для зчитування показів стрілочних приладів. Для роботи алгоритму потрібно вказати на зображенні координати трьох точок – початок та кінець стрілки у крайніх положеннях [8].

У роботі [24] розроблена імітаційна модель функціонування системи автоматизації повірки, яка дозволяє імітувати різні способи повірки. Розглядаючи повірку, як процес, ефективність якого характеризується ймовірністю P виконання задачі

$$P = P(\delta < \delta_{\text{дон.}}) \cap (t < t_{\text{дон.}}), \quad (1.1)$$

де, δ – помилка виконання задачі повірки; t – час виконання задачі повірки; $\delta_{\text{дон.}}$ – гранично допустима помилка при повірці; $t_{\text{дон.}}$ – гранично допустимий час на виконання повірки; в якості показників ефективності функціонування

системи автоматизації повірки взятий вектор параметрів $\{\delta, t\}$. На основі аналізу основних методів автоматичної повірки показано, що в якості керуючих змінних моделі найбільш підходящими є швидкість S зміни сигналу на вході приладу, що повіряють, і швидкість v сканування шкали цього приладу. Найбільш ефективним при цьому буде рахуватися той спосіб автоматичної повірки, який при мінімальних обмеженнях на керуючі змінні забезпечує мінімум вектора параметрів $\{\delta, t\}$. Процес автоматичної повірки розглядається як сукупність трьох основних операцій:

- подача вхідного випробувального сигналу з метою переміщення стрілки до відповідної відмітки, що повіряється;
- зчитування показів приладу в даній відмітці;
- обчислення приведеної похибки і управління роботою системи в цілому.

До складу системи автоматичної повірки входять:

- генератор вхідних сигналів;
- відліковий пристрій;
- пристрій оброблення інформації.

Прилад в процесі повірки також розглядають як частину системи, так як він входить в ланцюг перетворення величини. Таким чином, побудована схема системи автоматичної повірки, яка зображена на рис. 1.8. При роботі імітаційної моделі автоматичної повірки реалізуються одночасно множина процесів. Для їх імітаційного представлення в якості основної структурної одиниці моделі вибрана алгоритмічна компонента і функціонування кожного елемента системи подано алгоритмом. Вони представлені математичними виразами, які описують функціонування кожного алгоритмічного блоку.

Так для опису сигналу на виході відлікового пристрою в залежності від елементів шкали приладу та їх взаємного розташування і режиму зчитування показів розроблена спеціальна експоненціальна функція

$$L = \max \left(\exp \left(-2 \left(\frac{\alpha_{oy} - \alpha_k^*}{\varepsilon_{отм.}} \right)^2 \right) \cdot \exp \left(-2 \left(\frac{\alpha_{oy} - \alpha_c}{\varepsilon_{стр.}} \right)^2 \right) \right), \quad (1.2)$$

де $\alpha_{oy}, \alpha_k^*, \alpha_c$ –кутові положення відлікового пристрою k -ї відмітки стрілки приладу; $\varepsilon_{отм.}$ – центральний кут, який дорівнює

$$\varepsilon_{отм.} = \arccos \left(1 - \frac{d_0^2}{2R^2} \right), \quad (1.3)$$

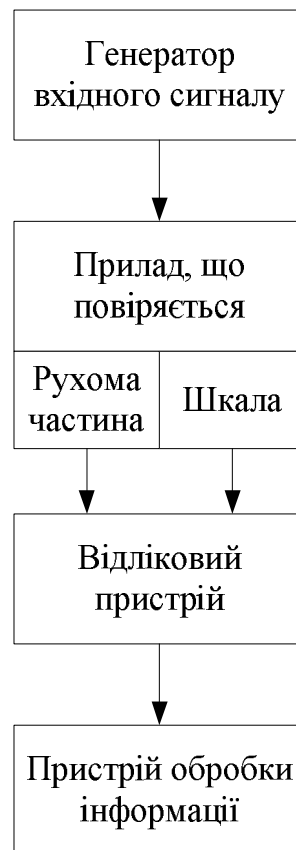


Рисунок 1.8 – Схема системи автоматичної повірки

де d_0 – ширина відмітки, що повіряють, яка розташована від центра сканування на радіусі R ; $\varepsilon_{стр.}$ – центральний кут, який визначається аналогічно до $\varepsilon_{отм.}$ з шириною стрілки d_k .

Імітаційна модель представляє собою сукупність восьми алгоритмічних компонентів (рис. 1.9):

- аналіз завершення зчитування шкали приладу;
- вибір режиму роботи генератора вхідних сигналів;
- модель генератора вхідних сигналів;
- визначення показів приладу;
- модель шкали приладу;
- модель рухомої частини приладу;
- модель відлікового пристрою;
- визначення максимуму сигналу з відлікового пристрою.



Рисунок 1.9 – Схема функціональної взаємодії алгоритмічних компонентів системи автоматичної повірки

В моделі реалізований спосіб [48] автоматичного зчитування показань зі шкал стрілочних вимірювальних приладів при їхній повірці. Він реалізується в так. Оптично сканують всю шкалу приладу в напрямку, що збігається з напрямком шкали при встановленому на нульову відмітку шкали стрілку (такий випадок буде при нульовому вхідному сигналі, тому що для усунення систематичної помилки у вимірюванні перед повіркою показчик виставляють на нуль). У зчитаному рядку виділяються сигнали, положення φ_i , які відповідають положенням відміток, а їх кількість дорівнює N . Після цього на вхід приладу, що повіряють, подають задане значення вхідного сигналу й знову здійснюють сканування всієї шкали. Зі зчитаного рядка виділяються сигнали та визначаються їхні положення

$$\varphi_j^l = \varphi_1^l, \varphi_2^l, \varphi_j^l, \quad (1.4)$$

і їх число L . У випадку збігу числа L виділених сигналів із числом N відміток шкали ($L=N$) фіксують суміщення вказівника з відміткою шкали, що повіряють. А якщо ні, то ($L=N+1$) послідовно порівнюють кожен координату φ_j^l з L з кожною координатою φ_i з N . Координата φ_j^l , для якої виконується умова

$$|\varphi_i - \varphi_j^l| \geq \Delta\varphi, \quad (1.5)$$

де $\Delta\varphi$ похибка отримання координат, є положенням показчика, а різниця $\varphi_i - \varphi_j^l$ є відстань від показчика до відмітки шкали приладу, що повіряють. Аналогічно визначають покази у всіх відмітках, що повіряють. Похибка отримання координат $\Delta\varphi$ визначається чутливістю граничних елементів, що формують відеосигнал, або дискретністю матриці фотосенсора.

Способи автоматичної повірки в динамічному режимі орієнтовані на відмітки відлікового пристрою, що повіряють.

Основною причиною, що обмежує використання при повірці динамічного вхідного сигналу, є інерційність рухомої частини системи живлення приладу. В результаті чого стрілка прямує за сигналом, який подається на вхід приладу, який відстає від його значення на динамічну похибку, яка складається із двох складових: постійної та затухаючої змінних.

При автоматичній повірці на перших відмітках шкали стрілка є інертною по відношенню до вхідного сигналу. Для запобігання динамічної похибки є розрахунок її значення через динамічні характеристики рухомої частини приладу, що повіряється: власну кругову частоту коливаль ω_0 і коефіцієнт затухання β .

Розрахунок значень власної кругової частоти і коефіцієнта затухання проводять за результатами вимірювання моментів накладання стрілки приладу з контрольними відмітками, які задаються вхідним сигналом.

Запропонований спосіб автоматичної повірки вимірювальних приладів складається з двох циклів.

В основному циклі подають вхідний сигнал, що змінюється за лінійним законом

$$I = S_c \cdot t, \quad (1.6)$$

де t – час; S_c – швидкість зміни вхідного сигналу, яка дорівнює

$$S_c = \frac{I_n}{T}, \quad (1.7)$$

де I_n – значення вхідного сигналу, яке відповідає кінцевій точці шкали приладу, що повіряють; T – час збільшення вхідного сигналу від нуля до I_n .

Далі визначають моменти часу

$$t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_n \quad (1.8)$$

в яких відбувається співпадіння стрілки з відмітками на шкалі приладу, що повіряється

$$I'_1, I'_2, \dots, I'_k, \dots, I'_n \quad (1.9)$$

та знаходять відповідні моменти часу t_k значенням вхідного сигналу I

$$I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_n \quad (1.10)$$

Ряд (1.9) – значення вхідного сигналу, а ряд (1.10) – значення вхідного сигналу вимірюваного приладом. Тому їх різниця є абсолютною похибкою вимірювального приладу

$$\Delta_k = I'_k - I_k \quad (1.11)$$

По відношенню до вхідного сигналу стрілка є інертною. Це призводить до виникнення динамічної похибки повірки

$$\Delta_k = I'_k - I_k + \Delta_{gk} \quad (1.12)$$

де $\Delta_{gk} = \Delta_{g_0} + \Delta_{gt_k}$; Δ_{g_0} – постійна складова динамічної похибки; Δ_{gt_k} – змінна складова динамічної похибки.

Через технологічні похибки виробництва електровимірювальних приладів класу точності 1,5 і нижче значення β і ω_0 сильно змінюються, тому значення β і ω_0 визначають для кожного приладу, що повіряється, у допоміжному циклі.

Для цього подають на прилад вхідний сигнал, який відповідає кінцевій точці шкали I_n . Рух стрілки приладу описується рівняннями:

$$I'_k |_{\beta < 1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot e^{\beta \omega_0 t_k} \cdot \sin \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1 - \beta^2} + \arctg \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta} \right) \right) \right], \quad (1.13)$$

$$I_k' |_{\beta>1} = I_n \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot e^{\beta\omega_0 t_k} \cdot \text{sh} \left(\omega_0 \cdot t_k \cdot \sqrt{1-\beta^2} + \text{arth} \left(\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \right) \right) \right], \quad (1.14)$$

що є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} + 2\beta\omega_0 \frac{\partial I'}{\partial t} + \omega_0^2 I' = \omega_0^2 I_n \quad (1.15)$$

Випадок, $\beta=1$, можливий тільки теоретично і тому не розглядається.

Безпосереднє використання виразів (1.13) і (1.14) для визначення β і ω_0 неможливе через нелінійність отриманих системи алгебраїчних рівнянь, а вирішення цієї системи потребує багато часу. Так як спосіб автоматичної перевірки вимірювальних приладів повинен працювати в реальному часі, то затримка, яка необхідна для обчислення β і ω_0 досить суттєво впливає на швидкодію перевірки.

Тому розрахунок β і ω_0 за допомогою рівнянь (1.13), (1.14), (1.15) виконують у два етапи. Спочатку знаходять наближені значення, а потім точні значення величин.

Для знаходження наближених величин рівняння (1.15) розкладають в ряд Тейлора

$$I'(t) = I'(0) + \frac{1}{11} \frac{\partial I'}{\partial t} |_{t=0} \cdot t + \frac{1}{21} \frac{\partial^2 I'}{\partial t^2} |_{t=0} \cdot t^2 + \dots \quad (1.16)$$

В динамічному режимі, що відповідає допоміжному циклу перевірки, задають такі початкові умови:

$$I'(0) = 0; \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial I'}{\partial t} |_{t=0} = 0 \quad (1.18)$$

Беручи до уваги лише два члени розкладу в (1.16) і враховуючи (1.17), (1.18), отримаємо

$$I'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t^3 \right] \quad (1.19)$$

Так як вираз (1.19) отримано за допомогою розкладу в ряд Тейлора (1.16), в допоміжному циклі для підвищення точності повірки після подачі вхідного сигналу I_n визначають моменти часу t_1 та t_2 , що відповідають двом першим відміткам на початку шкали I_1' та I_2'

$$\begin{cases} I_1'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_1^3 \right] \\ I_2'(t) = \omega_0^2 I_n \left[\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \beta \omega_0 t_2^3 \right] \end{cases} \quad (1.20)$$

З системи рівнянь (1.20) знаходять власну кругову частоту коливань ω_0 і коефіцієнт затухання β :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{I_2'}{I_n \left(\frac{1}{2} t_2^2 - \frac{1}{3} \lambda t_2^3 \right)}} \quad (1.21)$$

$$\beta = \frac{\lambda}{\omega_0} \quad (1.22)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \left(t_1^2 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^2 \right) \cdot \left(t_1^3 - \frac{I_1'}{I_2'} t_2^3 \right)^{-1} \quad (1.23)$$

Для значень кругової частоти коливань ω_0 і коефіцієнт затухання β була проведена оцінка похибок рівнянь (1.21) і (1.22) за допомогою моделювання на ПК процесів (1.13) і (1.14). В результаті було показано, що при використанні двох перших відміток на шкалі для серійних приладів їх

похибка у визначенні кругової частоти коливань ω_0 по формулі (1.21) складає соті долі відсотка і її можна вважати надзвичайно малою, а похибка у визначенні коефіцієнт затування β за формулою (1.22) складає не більше 15 відсотків.

Розглянуті вище методики дають добрі результати у статичному режимі, але в динамічному режимі роботи, похибка визначення коефіцієнта затування β складає не більше 15 відсотків, що досить суттєво впливає на визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів.

1.3 Аналіз існуючих методів бінаризації

Бінаризація зображення – процес перетворення кольорової палітри зображення до двох кольорів.

У більшості випадків для виділення потрібних об'єктів, їх структури достатньо два класи. В залежності від порогу бінаризації, кожен піксель буде належати до одного з класів – фону чи об'єкту. Головною задачею бінаризації є вибір оптимального порогу, при якому точно передавалась структура шуканого об'єкта [62,19].

Одним з найпростіших методів бінаризації є глобальна бінаризація. Для використання цього методу потрібно встановити поріг бінаризації. Порівняти значення яскравості кожного пікселя із заданим порогом та віднести піксель до об'єкта зображення чи фону.

Недоліком такого методу те, що він враховує лише характеристики поточного пікселя й використовує глобальний для всього зображення поріг бінаризації, що робить його майже непридатним для застосування на практиці [9, 11].

Для відділення об'єкту від фону необхідно виконати бінаризацію всього масиву пікселів зображення. Для цього розглянемо та проведемо

аналіз найбільш використовуваних методів бінаризації: метод Отсу, метод Ніблека, метод Бернса.

Одним із ефективних методів глобальної бінаризації, як за якістю так і за швидкістю виконання, є метод Отсу. Метод використовує гістограму розподілу значень яскравостей пікселів растрового зображення [6]. Будується гістограма за значеннями

$$p_i = n_i / N, \quad (1.24)$$

де N – це загальна кількість пікселів на зображенні; n_i – це кількість пікселів з рівнем яскравості i .

Діапазон яскравостей ділиться на два класи за допомогою порогового значення рівня яскравості k (k – ціле значення від 0 до L). Кожному класу відповідають відносні частоти ω_0 та ω_1 :

$$\omega_0(k) = \sum_{i=1}^k p_i; \quad (1.25)$$

$$\omega_1(k) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega_0(k). \quad (1.26)$$

Середні рівні для кожного з двох класів зображення розраховуються за формулами:

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0}; \quad (1.27)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1}. \quad (1.28)$$

Далі обчислюється максимальне значення оцінки якості поділу зображення на дві частини

$$\eta(k) = \max_{k=1}^{l-1} \left(\frac{\sigma_{кл}^2(k)}{\sigma_{заг}^2} \right), \quad (1.29)$$

де $\sigma_{кл}^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2$ – міжкласова дисперсія; $\sigma_{заг}^2$ – загальна дисперсія для всього зображення [15].

До недоліків методу Отсу відноситься розмиття ліній, що зумовлюється, в більшості випадках, нерівномірним освітленням об'єкту бінаризації.

У методі Ніблека значення порогу T обирається в межах певного околу (маски) пікселя розміру $N \times N$ при $(N=2k+1)$, що бінаризується, виходячи зі співвідношення

$$T = m + k \cdot \sigma, \quad (1.30)$$

де m – середнє значення яскравості I ; σ – середньоквадратичне відхилення в межах маски; k – константа, яка підбирається так, щоб забезпечити найбільш якісну бінаризацію [12].

Розмір околу повинен бути мінімальним, але таким, щоб зберегти локальні деталі зображення. У той же час розмір повинен бути достатньо великим, щоб зменшити вплив шуму на результат. Величина k визначає, яку частину контуру об'єкта взяти як об'єкт. При $k=-0,2$ задається досить чітке розділення об'єктів, якщо вони представлені чорним кольором, а при $k=+0,2$ – якщо об'єкти представлені білим кольором. Даний метод в областях з плавною зміною рівнів сірого призводить до виникнення артефактів та шумів.

Метод Бернсена [2] базується на ідеї зіставлення рівня яскравості перетворюваного пікселя зі значеннями локальних середніх, обчислюваних в його околі. Пікселі зображення обробляються по черзі шляхом порівняння їх

інтенсивності з середніми значеннями яскравості у вікнах (масках) з центрами в точках P_l ($l = 0, 1, \dots, 7$) (рис. 1.10).

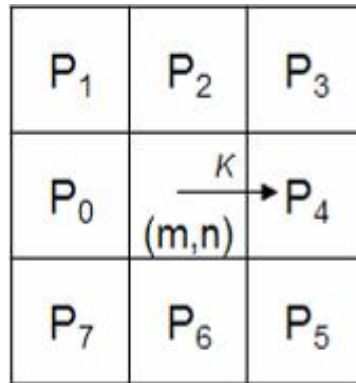


Рисунок 1.10 – Оброблення пікселя

Якщо символ "1" означає елемент об'єкта, а "0" – елемент фону в результуючому бінарному зображенні, то значення перетвореного пікселя (m, n) стає рівним 1 тоді, коли для всіх $l = 0, 1, \dots, 7$ виконується умова

$$P_l - f(m, n) > t, \quad (1.31)$$

де t – параметр;

$$P_l = \frac{1}{(2K+1)^2} \sum_{-K \leq i, j \leq K} f(m_l + i, n_l + j) - \text{середня локальна яскравість; } f(m_l, n_l)$$

– яскравість в точці P_l з координатами (m_l, n_l) .

Автоматичне та адаптивне визначення величини локального параметра t замість використання глобального значення дозволяє усунути помилки порогового перетворення. Параметр t обчислюється за таким алгоритмом.

1. У вікні $(2K+1) \times (K+1)$ з центром у перетворюваних пікселів $f(m, n)$ обчислюються значення:

$$f_{\max} = \max_{-K \leq i, j < K} f(m + i, n + j); \quad (1.32)$$

$$f_{\min} = \min_{-K \leq i, j < K} f(m+i, n+j). \quad (1.33)$$

2. Обчислюються величини:

$$\Delta f_{\max} = |f_{\max} - P|; \quad (1.34)$$

$$\Delta f_{\min} = |f_{\min} - P|. \quad (1.35)$$

3. Якщо $\Delta f_{\max} > \Delta f_{\min}$, то локальне вікно $(2K+1) \times (2K+1)$, швидше за все, містить більше локальних низьких яскравостей, тому

$$t = \alpha \left(\frac{2}{3} f_{\min} + \frac{1}{3} P \right), \quad (1.36)$$

де α – константа з діапазону $[0,3; \dots; 0,8]$.

4. Якщо $\Delta f_{\max} < \Delta f_{\min}$, то в локальному вікні $(2K+1) \times (2K+1)$ міститься більше локальних високих яскравостей, тому

$$t = \alpha \left(\frac{1}{3} f_{\min} + \frac{2}{3} P \right). \quad (1.37)$$

5. Якщо $\Delta f_{\max} = \Delta f_{\min}$, то слід збільшити розмір вікна до $(2K+3) \times (2K+3)$ і повторити операції, починаючи з 1-го кроку. Якщо ж і в цьому випадку $\Delta f_{\max} = \Delta f_{\min}$, то піксель $f(m, n)$ відноситься до фону (або ж шуканий параметр вибирається як $t = \alpha P$).

Однак швидкість роботи даного алгоритму виявилася низькою.

1.4 Аналіз та класифікація існуючих методів скелетизації

Скелетизація є одним із кроків підготовки зображення до розпізнавання. Методи аналізу форми плоского об'єкта на основі побудови його скелета широко застосовується в обробленні зображень, розпізнаванні образів, геометричним моделюванні й візуалізації [27-29]. Багато методів працюють по принципу багаторазового "проходу" по зображенню. Це, у свою

чергу, впливає на швидкість роботи та впливає на якість представлення об'єктів для розпізнавання.

Для бінарних зображень із складною границею скелет не завжди вдається коректно визначити й побудувати. Крім того, для бінарних зображень з низькою роздільною здатністю растровий скелет часто є малоінформативним і неточним.

Скелетизація – це процес звуження ліній до товщини в 1 піксель. Скелетне представлення використовується для виділення признаков (характеристик) на зображенні. При цьому основну увагу слід звернути на збереження властивостей об'єктів, що будуть розпізнаватися (векторизуватися). Основна задача полягає у тому, що часто неможливо адекватно визначити ознаки, на основі яких слід здійснювати розпізнавання.

Для одержання скелетного зображення використовують різні методи скелетизації бінарного зображення.

Шаблонний метод [24]. Реалізація шаблонного методу базується на 8 масивах розміром 3×3 (рис. 1.11), де центральний елемент є поточним пікселем. У будь-якій області, що відповідає одному із шаблонів (сірим кольором позначені пікселі будь-якого кольору), видаляється чорний центральний піксель. Здійснюється кілька проходів по зображенню, поки не залишиться пікселів, що підлягають видаленню.

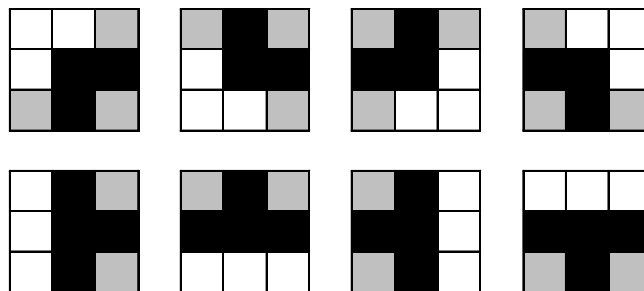


Рисунок 1.11 – Шаплони для скелетизації

Для підготовки до етапу розпізнавання в отриманому скелеті виділяються ключові точки: точки з'єднання трьох або чотирьох ребер скелета та кінцеві точки. Створюється порожній стек для зберігання координат початку й кінця ребер, точок розгалуження скелета. Заносимо в нього будь-яку точку скелета, поки стек не порожній, продовжуємо далі заносити координати в стек. Далі вибираємо точку зі стека і будуємо послідовність ребер з обраної точки зображення, поки не відбудеться розгалуження скелета, або не дійдемо до кінцевої точки. Якщо досягли кінцевої точки або позначеного раніше ребра, то в масив заноситься пройдений шлях. Якщо відбулося розгалуження скелета, то знайшли місце з'єднання ребер, і в масив заноситься послідовність ребер і у стек заносимо точку розгалуження і так далі продовжуємо.

Недоліком є невисока швидкодія алгоритму.

Хвильовий метод.

Метод полягає [54] в аналізі шляху проходження сферичної хвилі по зображенню. На кожному кроці аналізується зсув центру мас точок, що утворюють нову генерацію хвилі, щодо його попередніх положень. Метод складається з побудова скелета зображення за допомогою сферичної хвилі та оптимізація отриманого скелета.

Відстеження ліній зображення проводиться шляхом відстеження руху центру відрізка, утвореного крайніми точками генерації хвилі (рис. 1.12 а)). Після відстеження можливе згладжування відрізків.

Виявлення збільшення "ширини" хвилі й поділу хвилі на дочірні дозволяє визначити точку передбачуваного з'єднання двох відрізків. Визначення збільшення "ширини" хвилі проводиться шляхом порівняння "ширини" наступної генерації хвилі і її середнього значення за N попередніх генерацій (N задається). Причому одержуємо дві точки (A, B) відрізка. Після

поділу хвилі на дві півхвилі, одержуємо ще дві пари точок (C,D) і (E,F) . Точка з'єднання відрізків лежить у шестикутнику $ABCDEF$ і спочатку встановлюється як центр мас цього багатокутника (рис. 1.12 б)). Корекція отриманого скелетного образу буде проводитися оптимізацією.

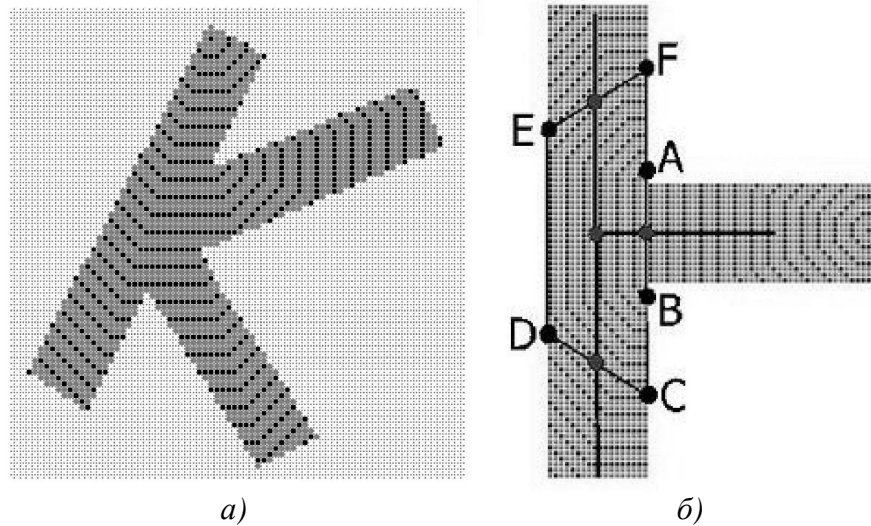


Рисунок 1.12 а) проходження сферичної хвилі по зображенню;

б) знаходження місця з'єднання відрізків

Оптимізація скелетного зображення полягає у заміні послідовності ребер одним відрізком [54].

Даний метод, в порівнянні з методом Зонга-Суня, є більш трудомісткий.

Метод Зонга-Суня.

Для вирішення задачі скелетизації було вибрано найпоширеніший метод – метод Зонга-Суня, що є модифікацією алгоритму Хілдіча [7].

В основі цього методу лежить покрокове видалення точок на границях зображення.

На зображенні послідовно вибирається матриця розміром 3×3 , елементи якої представлені (1.38).

$$\begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_8 & P_0 & P_4 \\ P_7 & P_6 & P_5 \end{pmatrix} \quad (1.38)$$

При виконанні кожної ітерації видаляються зовнішній шар точок. На першій підітерації видаляються точки, які відповідають таким умовам:

$$2 \leq \sum_{i=1}^8 P_i \leq 6; \quad (1.39)$$

$$A(P_i) = 1; \quad (1.40)$$

$$P_2 * P_4 * P_6 = 0; \quad (1.41)$$

$$P_4 * P_6 * P_8 = 0, \quad (1.42)$$

де $A(P_i)$ – кількість конфігурацій $[0;1]$ в послідовності $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ та

$$B(P_0) = \sum_{i=1}^8 P_i, \quad (1.43)$$

де $B(P_0)$ – кількість не нульових сусідів. Якщо умова не виконується $A(P_i)=2$, наприклад

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & P_0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.44)$$

то піксель P_0 не може бути видалений із зображення.

На другій підітерації виконуються аналогічні умови (1.39), (1.40), (1.43) крім умов (1.41), (1.42). Вони замінюються відповідними умовами:

$$P_2 * P_4 * P_8 = 0; \quad (1.45)$$

$$P_2 * P_6 * P_8 = 0. \quad (1.46)$$

Отже, на першій підітерації видаляємо точки на південно-східній границі і північно-західні кутові точки, а на другій підітерації видаляємо точки на північно-західній границі і південно-східні кутові точки [1].

При проведення експериментів із застосуванням цього методу було виявлено такий недолік – залишаються зайві пікселі в кутах перетину зв'язаних ребер об'єктів зображення. Але його достатньо для скелетизації прямих. Результат роботи алгоритму Зонга-Суня представлений на рис. 1.13.

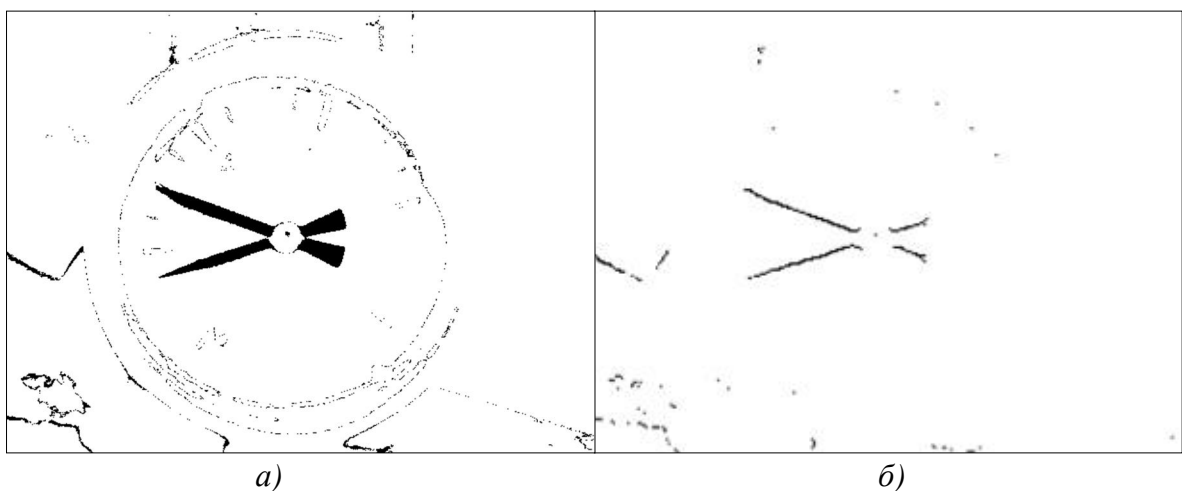


Рисунок 1.13 а) зображення до скелетизації; б) зображення після скелетизації

На рис. 1.13 показана "різниця" зображень показів значень манометра. Як бачимо, стрілка манометра – це не зовсім пряма (рис. 1.13 а)). Але даний алгоритм показав добрий результат, незважаючи, навіть, на шум зображення (рис. 1.13 б)).

1.5 Обґрунтування розробки нової комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

У зв'язку з тривалою процедурою повірки на підприємствах виникає необхідність автоматизувати процес зчитування показів зі шкал приладів. Це істотно підвищить контроль в процесі виробництва та дозволить виявити неякісні прилади. Розширення обсягу випробувань

приведе до необхідності розробки нових комп'ютерних систем їх забезпечення.

Процес автоматизованих випробувань готових приладів складається з подачі тестових сигналів, автоматизованого розпізнавання, обчислення статичних і динамічних характеристик, обчислення похибок.

При автоматизованому розпізнаванні розглянуті методи бінаризації враховують глобальний поріг бінаризації і тому вони не справляються з зображеннями приладів, які нерівномірно освітлені. Помилку під час розрахунку кута відхилення стрілки додають вище описані методи скелетизації, які трактують стрілку як криву.

Автоматизація процесу оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів та визначення їх статичних і динамічних характеристик дозволить підняти рівень контролю та продуктивності виробництва приладів.

На основі вищесказаного можна зробити наступні узагальнюючі висновки:

- кількість приладів і частота їх випробувань визначають необхідність автоматизації процесу перевірки, що підвищить якість виробництва приладів;

- автоматизації зчитування показів зі шкал стрілочних приладів зумовлена практичною відсутністю випробувального обладнання. Таке обладнання має високі вартісні показники або низьку якість зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Необхідне апаратне, математичне та програмно-інформаційне забезпечення повинно проводити вимірювання в режимі реального часу та відповідати точності вимірюваних значень. Впровадження цієї системи, саме

для приймально-здавальних робіт, дозволить вести обліку випробувань приладів та накопичувати відповідні їх розраховані параметри.

1.6 Вибір напрямку та постановка задач досліджень

Виходячи з проведеного аналізу існуючих комп'ютерних систем, що використовуються для випробувань стрілочних вимірюваних приладів, були поставлені наступні задачі досліджень:

1. Розробка методу та алгоритму та програмного забезпечення оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

2. Розробка методу та алгоритму бінаризації зображення, який буде стійкий до шуму.

3. Розробка методу та алгоритму скелетизації, що дозволить більш точно описати стрілку для подальшого розпізнавання.

4. Розробка автоматизованої системи розрахунку статичних і динамічних характеристик.

5. Дослідження точності вимірювання та швидкодії роботи розроблених методів і алгоритмів, перевірка розроблених теоретичних положень, методів та моделей на практичних прикладах.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

2.1 Розробка методу та структури комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

Основна ідея методу оптичного розпізнавання значень стрілочних приладів полягає у чіткому виділенні стрілок приладу при подальшому визначенні кута відхилення між ними. Значення показу стрілочного приладу розраховується як відношення кута відхилення стрілки до конкретного значення на шкалі.

Для зйомки зображень приладу використовується звичайна веб-камера з роздільною здатністю 640x480 пікселів та частотою до 30 кадрів за секунду. Отримане зображення має 24 бітну RGB модель. Його потрібно перетворити у бінарне (бінаризувати) для подальшого оброблення.

Для знаходження кута відхилення стрілки, фотографується положення стрілки приладу в початковому положенні та на конкретному значенні [61].

Матриця A відповідає за зображення приладу в початковому положенні стрілки

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

де $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{m1}, a_{m2}, a_{mn}$ – значення яскравостей пікселів. $m = \{1, \dots, 480\}$, $n = \{1, \dots, 640\}$.

Матриця B відповідає за зображення приладу при деякому відхиленні стрілки

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

де $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}, b_{m1}, b_{m2}, b_{mn}$ – значення яскравостей пікселів $m = \{1, \dots, 480\}$, $n = \{1, \dots, 640\}$.

Після бінаризації зображень адаптивним методом отримаємо зображення, пікселі яких можуть приймати одне з двох значень – 0 або 1, де 0 відповідає за фон, а 1 – за об'єкт.



Рисунок 2.1 – Приклади фотографій приладу з різними положеннями стрілок

Ці зображення однакові – відмінність між ними буде в положенні стрілки [67].

Для знаходження кута відхилення стрілки знайдемо різницю між матрицями A і B . Утвориться нова матриця C , елементи якої формуються за таким правилом: якщо $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{m1}, a_{m2}, a_{mn} = b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}, b_{m1}, b_{m2}, b_{mn}$, то $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}, c_{m1}, c_{m2}, c_{mn} = 0$, тобто пікселі матриці C приймають значення фону, якщо елементи $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{m1}, a_{m2}, a_{mn} \neq b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}, b_{m1}, b_{m2}, b_{mn}$, то $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1n}, c_{m1}, c_{m2}, c_{mn} = 1$, тобто пікселі матриці C приймають значення об'єкту.

$$C = A - B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix} \begin{cases} \text{якщо } a_{11} \dots a_{mn} = b_{11} \dots b_{mn}, c_{11} \dots c_{mn} = 0 \\ \text{якщо } a_{11} \dots a_{mn} \neq b_{11} \dots b_{mn}, c_{11} \dots c_{mn} = 1 \end{cases}$$

У результаті різниці між цими зображення буде нове зображення з чітко виділеними стрілками (рис. 2.1) та залишковими пікселями (шум), які усуваються медіанним фільтром.

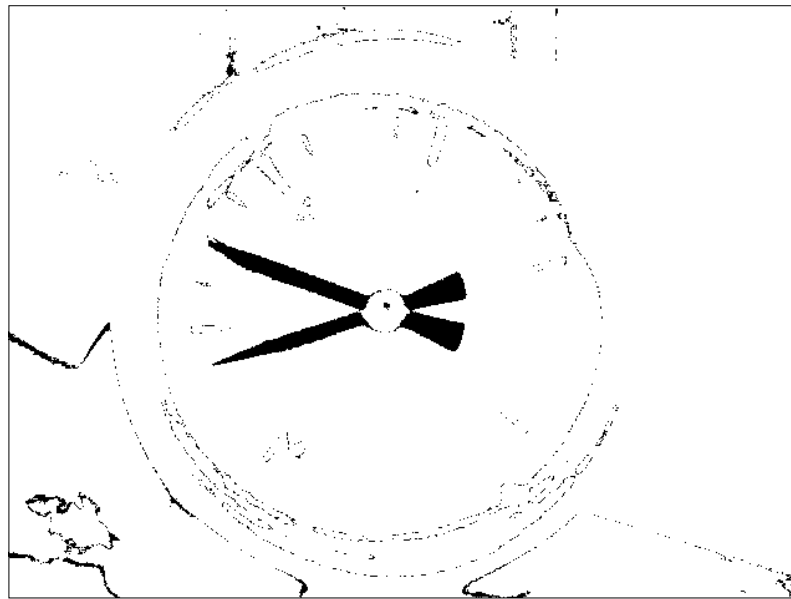


Рисунок 2.2 – Різниця зображень без застосування медіанного фільтра

З рис. 2.2 бачимо, що стрілки громіздкі і за допомогою них не можна точно визнати кут відхилення. Для вирішення цієї проблеми потрібно звузити товщину стрілок до 1 пікселя. Тобто, потрібно отримати скелетне представлення даного зображення.

За допомогою перетворення Хафа визначаємо координати прямих (стрілок):

Пряма задається рівнянням

$$y = mx + b \quad (2.3)$$

За допомогою рівняння (2.3) можна знайти координати точок прямої (x, y) . Використовуючи коефіцієнти b та m пряму можна представити у вигляді точки з координатами (b, m) у параметричному просторі, де m – коефіцієнта нахилу, а b – точка перетину.

Але вертикальні прямі мають нескінченні значення для параметрів m і b . Тому краще представити пряму за допомогою інших параметрів ρ, φ .

Через точку в Декартовій площині XU може проходити нескінченно багато прямих. Якщо ця точка має координати (x, y) , то всі прямі, що проходять через неї відповідають рівнянню

$$\rho(\varphi) = x \cos \varphi + y \sin \varphi. \quad (2.4)$$

Це відповідає синусоїдальній кривій в параметричному просторі $\rho\varphi$, яка, у свою чергу, унікальна для даної точки. Якщо криві відповідні двом точкам накладаються одна на одну, то точка, де вони перетинаються, відповідає прямим (в справжньому місці зображення), які проходять через обидві точки. У загальному випадку, ряд точок, які формують пряму лінію визначають синусоїди, які перетинаються в точці для тієї лінії у параметричному просторі. Таким чином, виявлення точок може приводить до пошуку кривих, що перетинаються.

Однією з основних особливостей роботи алгоритму є використання процедури голосування, коли для кожної точки вхідного зображення з координатами (x, y) розраховуються всі можливі значення параметрів $\rho\varphi$ параметричному просторі та шукають максимальні значення акумулятора для даної точки.

У результаті виконання даного методу синтезуємо структуру комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів (рис 2.3).

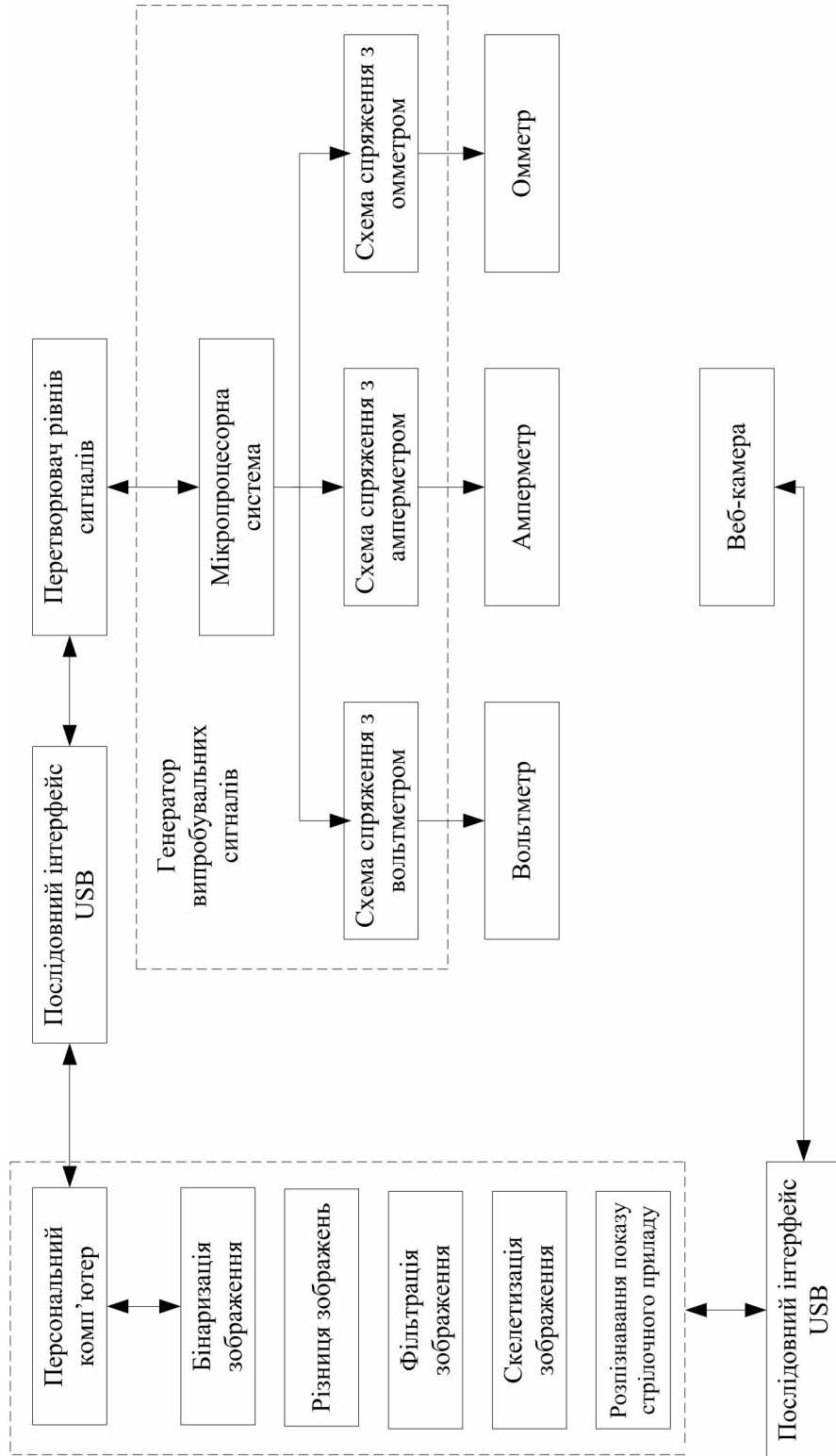


Рисунок 2.3 – Структурна схема комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

2.2 Розробка методу адаптивної бінарizaції зображень

Для розробки даного алгоритму, зображення, що обробляється, представимо у вигляді інтегрального. Інтегральне зображення може бути використане при наявності функції $f(x, y)$, що представляє деяку залежність між пікселями і дійсними числами (наприклад, яскравість пікселів), і необхідності обчислити суму цієї функції на деяких ділянках зображення [20].

Введемо поняття інтегральної матриці зображення. Інтегральна представлення зображення являє собою матрицю, розмірність якої збігається з розмірністю вихідного зображення. Елементи матриці розраховуються по наступній формулі:

$$I(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq x, j \leq y} I(i, j), \quad (2.5)$$

де, $I(i, j)$ – яскравість пікселя вихідного зображення. Кожний елемент матриці $I(x, y)$ являє собою суму пікселів прямокутника від $(0, 0)$ до (x, y) .

Розрахунок проводиться по наступній формулі

$$I(x, y) = I(x, y) - I(x - 1, y - 1) + I(x, y - 1) + I(x - 1, y) \quad (2.6)$$

Інтегральне представлення має цікаву особливість. По інтегральній матриці можна дуже швидко розрахувати суму пікселів довільного прямокутника. Нехай потрібно знайти суму пікселів прямокутника $ABCD$ (рис. 2.4).

З рис. 2.4 видно, що суму яскравостей пікселів прямокутника $ABCD$ можна виразити через суми і різниці сусідніх прямокутників по наступній формулі

$$Sum(ABCD) = I(A) + I(C) - I(B) - I(D) \quad (2.7)$$

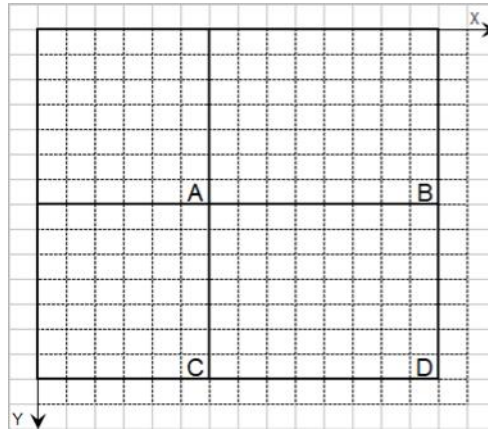


Рисунок 2.4 – Прямокутна область зображення

Розглянемо це на прикладі. На рис. 2.5 є матриця яскравостей зображення.

1	2	3	4	5	6	7	8
8	9	10	11	12	13	14	15
15	14	13	12	11	10	9	8
22	20	18	16	14	12	10	8
12	11	10	9	8	7	6	5
26	23	20	17	14	11	8	5
2	4	6	8	10	12	14	16
7	9	11	13	15	17	19	21

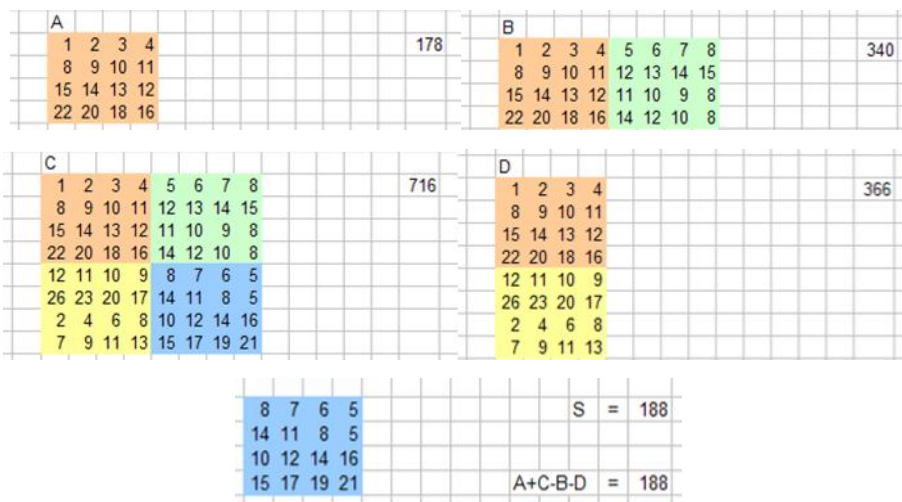


Рисунок 2.5 – Методика знаходження матриці яскравості зображення

З формули (2.7) слідує, що всі компоненти для розрахунку зберігаються в інтегральній матриці і обчислення займає чотири звертання до масиву і три арифметичні операції.

Таким чином, зображення можна поділити на однакові прямокутні області. Потім всередині цієї області розрахувати поріг бінаризації. У кожному з прямокутників значення порогу буде різним, тому що він "адаптується" до конкретної області.

Щоб обчислити інтегральне зображення, необхідно зберігати для кожної з прямокутних областей зображення число $I(x, y)$ – суму всіх значень $f(x, y)$ для пікселів, розташованих лівіше і вище пікселя (x, y) . Для кожного пікселя вірна формула

$$I(x, y) = f(x, y) - I(x - 1, y - 1) + I(x, y - 1) + I(x - 1, y) \quad (2.8)$$

При наявності розрахованого інтегрального зображення сума функції $f(x, y)$ для будь-якої прямокутної області з верхнім лівим кутом в пікселі (x_1, y_1) і нижнім правим кутом в пікселі (x_2, y_2) може бути за короткий час обчислена за допомогою виразу [68]

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y) = I(x_2, y_2) - I(x_2, y_1 - 1) - I(x_1 - 1, y_2) + I(x_1 - 1, y_1 - 1) \quad (2.9)$$

Наведений метод адаптивної порогового оброблення є простим розширенням методу Бернсена [2], основною ідеєю якого є порівняння кожного пікселя із середнім арифметичним оточуючих його пікселів.

На першому проході по зображенню обчислюється інтегральне зображення. На другому проході обчислюється середнє в прямокутнику розміром $s \times s$, використовуючи інтегральне зображення для кожного пікселя, а потім здійснюється порівняння. Якщо значення поточного пікселя на t

відсотків менше, ніж середнє, воно встановлюється в чорний колір на бінарному зображенні, інакше – в білий.

Використовуючи інтегральне представлення зображення отримали значне скорочення часу роботи алгоритму, за рахунок того, що всі компоненти для розрахунку зберігаються в інтегральній матриці і обчислення займає чотири звертання до масиву і три арифметичні операції. Запропонований метод дозволяє уникнути різких контрастних ліній та ігнорує невеликі градієнтні зміни.

2.3 Фільтрація зображення медіанним фільтром

Зображення, сформовані різними інформаційними системами, спотворюються під дією перешкод. Це ускладнює як їхній візуальний аналіз, так і автоматичне оброблення в ЕОМ. При розв'язку деяких задач оброблення зображень у ролі перешкод можуть виступати ті чи інші компоненти самого зображення.

Ослаблення дії перешкод досягається фільтрацією. При фільтрації яскравість (сигнал) кожної точки вихідного зображення, що спотворюється перешкодою, замінюється деяким іншим значенням яскравості, яке зазнає найменшої дії спотворення.

Медіанна фільтрація – це метод нелінійної фільтрації зображень, запропонований Дж. Тьюкі в 1971 р. для аналізу економічних процесів [60].

При медіанній фільтрації використовується двовимірне вікно (апертура фільтра), що має центральну симетрію, при цьому його центр розташовується в поточній точці фільтрації. Специфічною особливістю медіанного фільтра є те, що він діє безпосередньо на точку зображення, а не на її окіл. Завдяки цій особливості, медіанні фільтри при оптимально обраній апертурі можуть, зберігати без спотворень різкі границі об'єктів, ефективно подавляючи

некорельовані або слабо корельовані перешкоди. Ця властивість дозволяє застосовувати медіанну фільтрацію для усунення імпульсного шуму. При його впливу на зображення спостерігаються білі або (і) чорні точки, хаотично розкидані по кадру. Застосування лінійної фільтрації в цьому випадку неефективно – кожний із вхідних імпульсів впливає на імпульсну характеристику фільтра, а їх сукупність сприяє поширенню перешкоди на всю площу зображення.

Характерною рисою медіанного фільтра є його нелінійність. У багатьох випадках застосування медіанного фільтра виявляється більш ефективним у порівнянні з лінійними фільтрами, оскільки процедури лінійного оброблення є оптимальними при рівномірному або гаусовому розподілі шумів, що в реальних сигналах може бути далеко не так. У випадках, коли перепади значень сигналів великі в порівнянні з дисперсією адитивного білого шуму, медіанний фільтр дає менше значення середньоквадратичної помилки в порівнянні з оптимальними лінійними фільтрами [33].

Медіанний фільтр являє собою віконний фільтр, що послідовно ковзає по масиву зображення, і змінює на кожному кроці один з пікселів, що потрапили у апертуру фільтра. Позначимо вибірку у вигляді одномірного масиву $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$; число його елементів відповідає розміру вікна, а їх розташування довільне. Звичайно застосовують вікна з непарним числом точок n (це автоматично забезпечується при центральній симетрії апертури й при входженні самої центральної точки до її складу). Якщо впорядкувати послідовність $\{y_i, i = \overline{1, n}\}$ по зростанню, то її медіаною буде той елемент, який займає центральне положення в цій упорядкованій послідовності. Отримане в такий спосіб число i є продуктом фільтрації для поточної точки зображення. Зрозуміло, що результат такого оброблення насправді не

залежить від того, у якій послідовності представлені елементи зображення в робочій вибірці Y . Позначимо описану вище процедуру у вигляді

$$x = \text{med}(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (2.10)$$

Медіанна фільтрація усуває будь-який випадковий шум, що залишається на зображенні. Це відбувається тому, що будь-яка випадкова різка зміна яскравості елемента в межах апертури фільтра буде максимумом або мінімумом відсортованих значень одномірного масиву апертури фільтра та нове значення оброблюваного пікселя завжди вибирається як медіана [57]. Медіанна фільтрація показана на схемі (рис. 2.6).

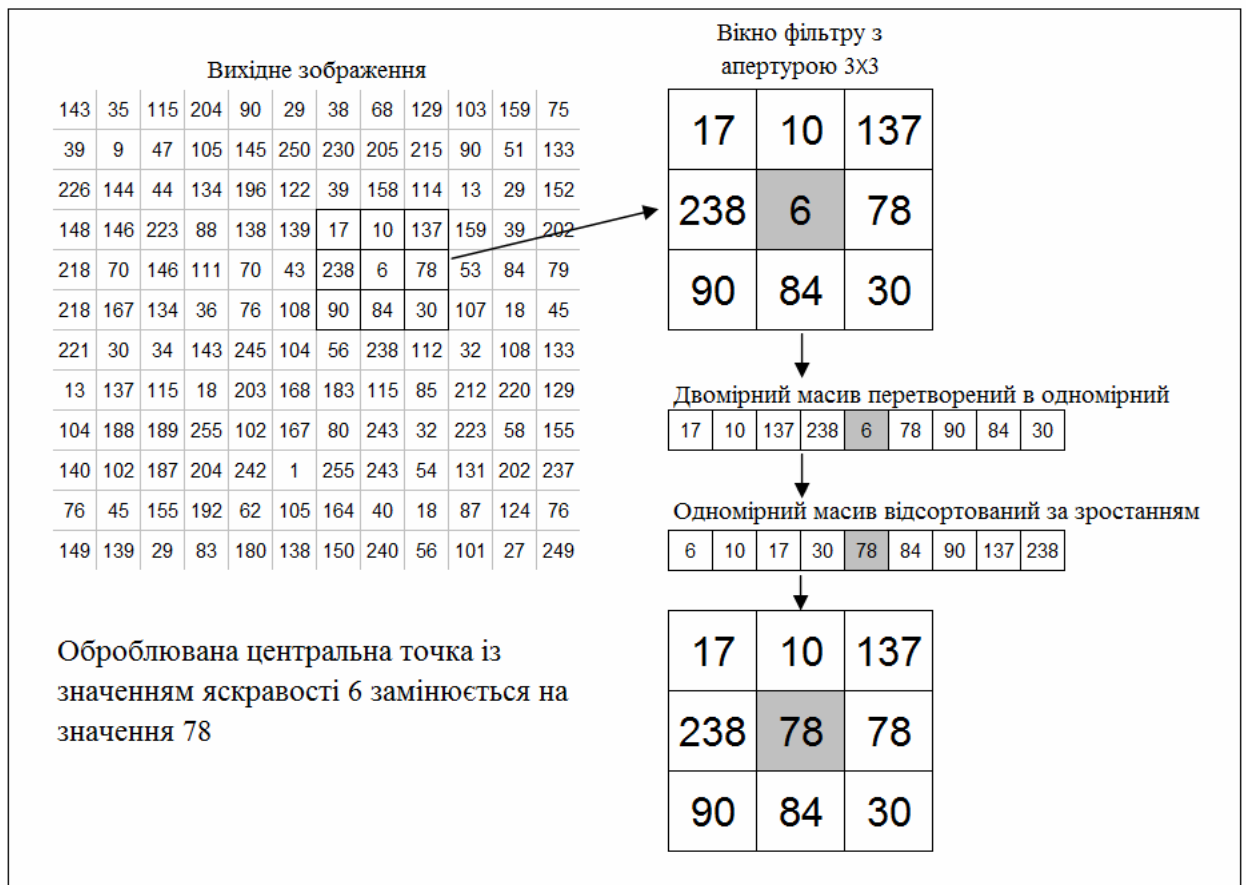


Рисунок 2.6 – Схема роботи медіанного фільтра

Таким чином, медіанна фільтрація здійснює заміну значень яскравостей пікселя у центрі апертури медіанним значенням. На практиці апертура фільтра для спрощення алгоритмів оброблення даних, як правило, встановлюється з різним непарним розміром апертури фільтру – 3×3 , 5×5 , 7×7 та 9×9 .

Розглянемо приклад. Нехай дано два зображення (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Вихідні зображення

У результаті різниці цих зображень отримаємо зображення (рис. 2.8), яке має шуми.

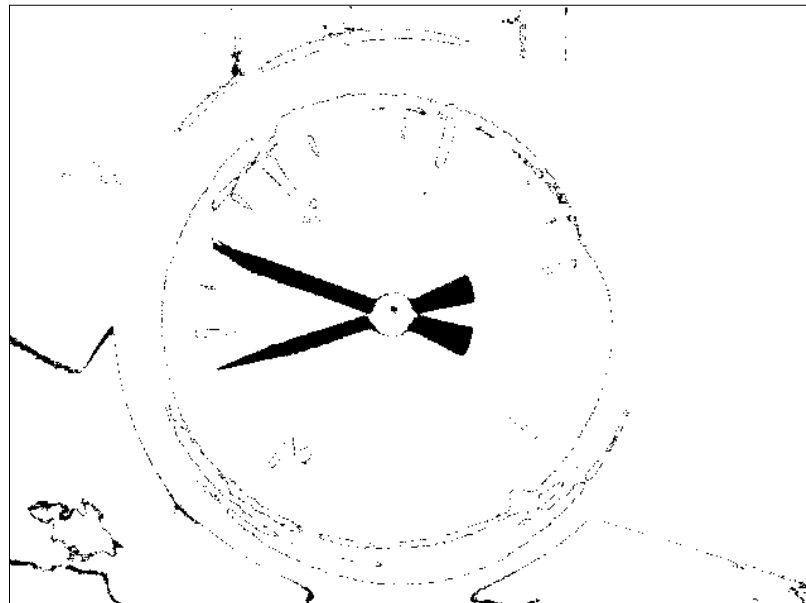
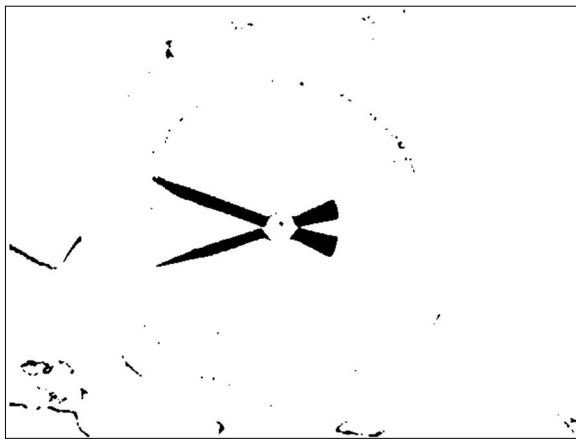
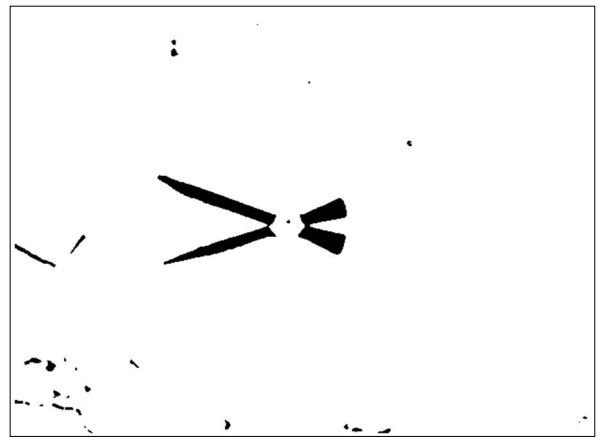


Рисунок 2.8 – Зображення зі шумом

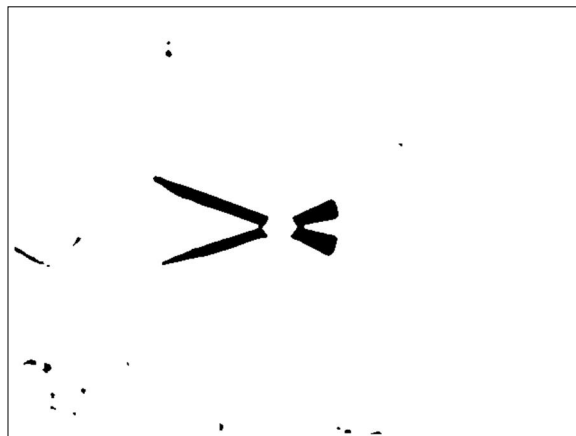
В процесі використання медіанного фільтру з різним розміром маємо такі зображення (рис. 2.9).



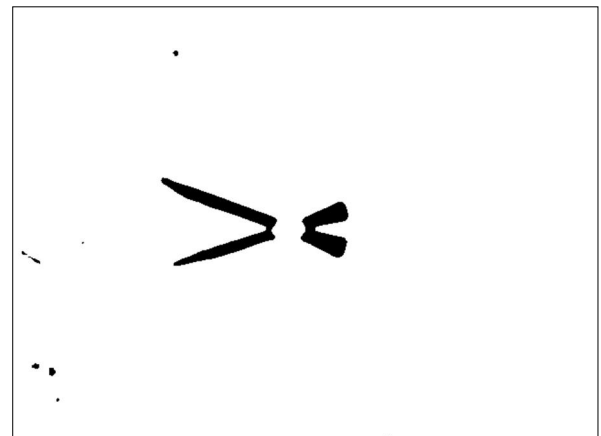
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.9 а) – апертура фільтру 3×3 ; б) – апертура фільтру 5×5 ;

в) – апертура фільтру 7×7 ; г) – апертура фільтру 9×9

Як бачимо, при збільшенні розміру апертури медіанного фільтру шуму на зображенні стає все менше. Але при розмірах апертур 7×7 та 9×9 границі об'єктів починають спотворюватися. Тому, в даному випадку для видалення шуму достатньо використати медіанний фільтр з апертурою 5×5 або 3×3 .

2.4 Розробка методу скелетизації зображень

Основна ідея була взята з хвильового методу. Відмінністю від хвильового методу є те, що генерація кожного наступного кола відбувається на знайдений точці середньої вісі об'єкта. Для вирішення цієї задачі пропонується наступний алгоритм:

1. Маємо бінарне зображення, на якому є об'єкт.
2. Скануємо зображення по стрічках або стовпчиках для пошуку крайньої точки об'єкту.
3. З цієї точки будуємо коло, яке більше за ширину об'єкта. (Далі показано пошук точки O – точки середньої вісі об'єкта. Точка A шукається аналогічно). Коло перетинає об'єкт у двох точках. Центр кола та ці дві точки утворюють рівнобедрений трикутник (відрізки AB і AC – радіуси). За властивістю медіани рівнобедреного трикутника, проведена до основи трикутника, точка O є серединою відрізка BC та точкою середньої вісі об'єкта (рис. 2.10).

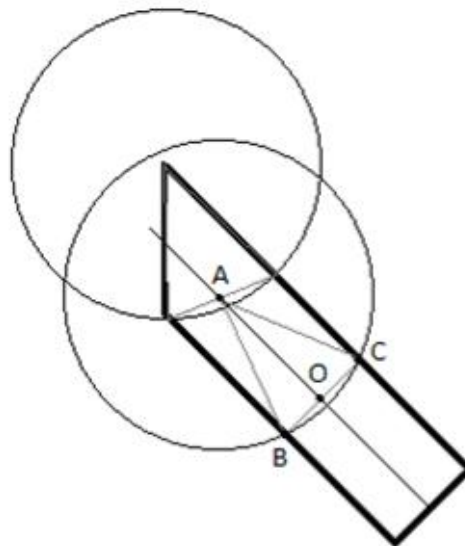


Рисунок 2.10 – Схематичне представлення пропонованого способу скелетизації зображення

4. З точки O будемо наступне коло (повторити пункт 3).

У результаті виконання алгоритму будемо мати точки середньої вісі об'єкта, які можуть бути використані для векторизації або представлення скелетного зображення [64].

Реалізація алгоритму продемонстрована на рис. 2.11.

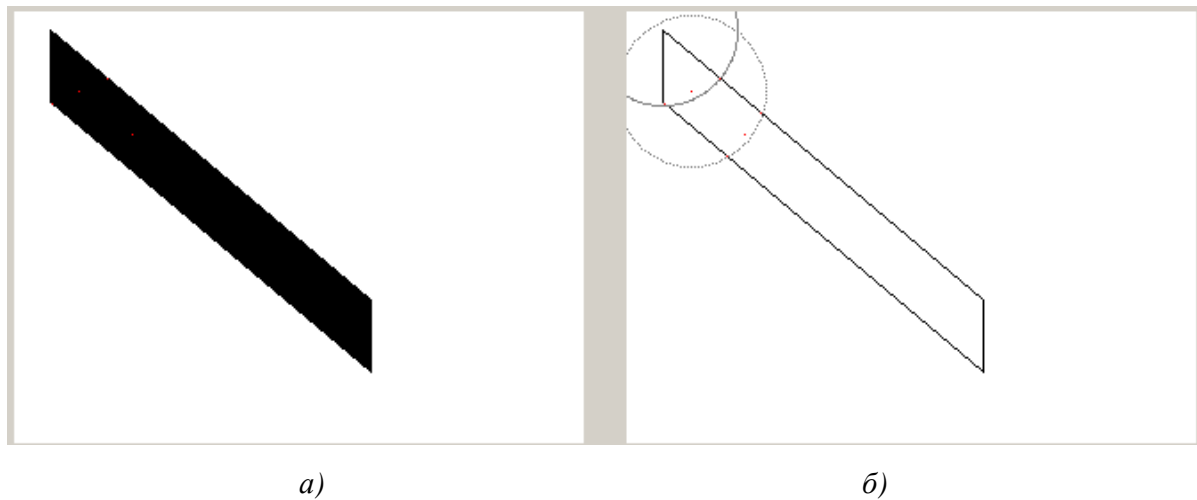


Рисунок 2.11 – Демонстрація роботи пропонованого способу скелетизації зображень

Як бачимо з рис. 2.11 б) червоні точки знаходяться на середній вісі об'єкта та є центрами генерованих кіл. Знайдений масив точки можна легко апроксимувати у пряму, тобто це дає можливість векторизації прямих. Пропонований метод може враховувати розширення (звуження), поворот об'єкта. Він стійкий до шуму на зображенні.

2.5 Розпізнавання положення стрілки

При автоматизованому аналізі цифрових зображень дуже часто виникає задача визначення простих фігур, таких як прямі, кола або еліпси. У багатьох випадках використовується алгоритм детектування границь у якості попереднього оброблення для одержання точок, які належать кривій у зображенні. Однак, або через шум на зображенні, або через недосконалість

алгоритму детектування границь можуть з'явитися "загублені" точки на кривій, так само як і невеликі відхилення від ідеальної форми прямої, кола або еліпса. Із цих причин часто досить складно згрупувати виділені границі у відповідний набір прямих, кіл і еліпсів. Призначення перетворення Хафа в тому, щоб розв'язати проблему групування граничних точок шляхом застосування певної процедури голосування до набору параметризованих об'єктів зображення [4, 5].

У найпростішому випадку перетворення Хафа є лінійним перетворенням для виявлення прямих. Пряма може бути задана рівнянням $y = mx + b$ і може бути обчислена для будь-якої пари точок на зображенні (x, y) . При перетворенні Хафа основна ідея – врахувати характеристики прямої не як точок зображення, а в межах її параметрів, тобто m – коефіцієнта нахилу й b – точка перетину. Ґрунтуючись на цьому факті пряма $y = mx + b$ може бути представлена у вигляді точки з координатами (b, m) у параметричному просторі [3, 18].

Однак, вертикальні прямі мають нескінченні значення для параметрів m і b . Тому зручніше представити пряму за допомогою інших параметрів ρ , φ . Параметр ρ – це довжина радіус вектора найближчої до початку координат точки на прямій (тобто нормалі до прямої, проведеної з початку координат), а φ – це кут між цим вектором і віссю абсцис.

У такий спосіб рівняння прямої можна записати як

$$y = \left(-\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right) x + \left(\frac{\rho}{\sin \varphi} \right) \quad (2.11)$$

або після перетворення

$$\rho = x \cos \varphi + y \sin \varphi . \quad (2.12)$$

Тому очевидний зв'язок кожної прямої на початковому зображенні у площині XU з точкою з координатами (ρ, φ) у параметричному просторі, яка є унікальною за умови, якщо $\varphi \in [0, 2\pi]$, $\rho \geq 0$.

Через точку в площині XU може проходити нескінченно багато прямих. Якщо ця точка має координати (x_0, y_0) , то всі прямі, що проходять через неї відповідають рівнянню

$$\rho(\varphi) = x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi. \quad (2.13)$$

Через кожну точку зображення (x_0, y_0) можливо провести декілька прямих з різним значеннями параметрів (ρ, φ) . Їх кількість обумовлена дискретністю представлення зображення та обраною в параметричному просторі сіткою. Отже, кожній точці зображення відповідає множина комірок в параметричному просторі (ця множина утворює синусоїду (2.13)). Одночасно кожній точці в параметричному просторі відповідає пряма в просторі XU .

Рівняння (2.13) відповідає синусоїдальній кривій в параметричному просторі $\rho\varphi$, яка, у свою чергу, унікальна для даної точки. Якщо криві відповідні двом точкам накладаються одна на одну, то точка (у параметричному просторі), де вони перетинаються, відповідає прямим (в справжньому місці зображення), які проходять через обидві точки. У загальному випадку, ряд точок, які формують пряму лінію (рис. 2.12), визначають синусоїди, які перетинаються в точці параметрів для тієї лінії. Таким чином, задача виявлення точок може бути зведена до пошуку кривих, що перетинаються.

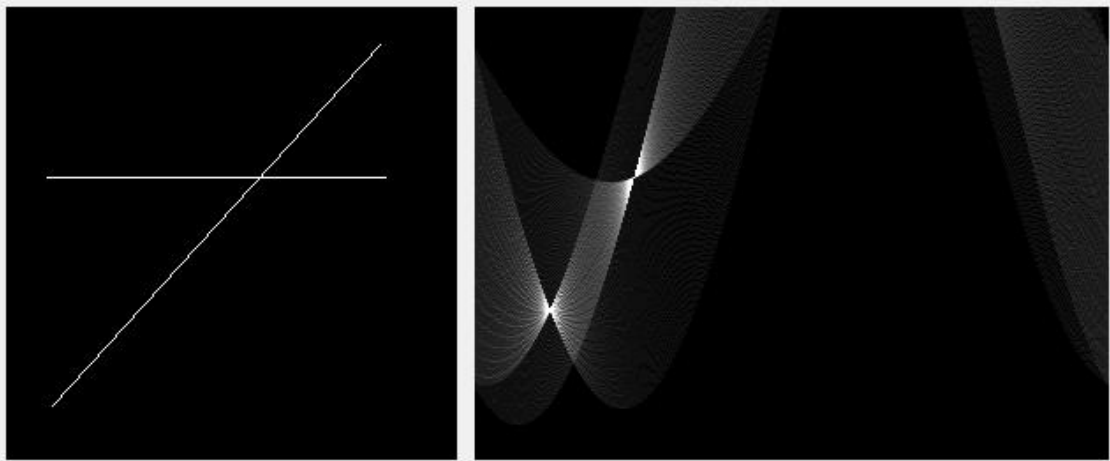


Рисунок 2.12 – Результат перетворення Хафа

Алгоритм перетворення Хафа використовує масив, називаний акумулятором, для визначення наявності прямої $y = mx + b$. Розмірність акумулятора дорівнює кількості невідомих параметрів простору $\rho\phi$. Наприклад, для лінійної трансформації потрібно використовувати двовимірний масив, тому що є два невідомі параметри: m і b . Два виміри акумулятора відповідають квантованим значенням параметрів m і b . Для кожної точки і її сусідів алгоритм визначає чи достатня вага границі в цій точці. Якщо так, то алгоритм обчислює параметри прямої й збільшує значення в комірці акумулятора, відповідному до даних параметрів.

Потім, знайшовши комірки акумулятора з максимальними значеннями, звичайним пошуком локального максимуму в просторі акумулятора, найбільш відповідні прямі можуть бути визначені. Найпростіший спосіб – це гранична фільтрація. Однак у різних ситуаціях різні методи можуть давати різні результати. Тому що отримані прямі не містять інформацію про довжину, наступним кроком є знаходження частин зображення відповідних до знайдених прямих. Більше того, через помилки на етапі детектування границь у просторі акумулятора також будуть залишатися помилки. Це робить пошук відповідних ліній нетривіальним.

Підводячи підсумок, можна сказати, що в результаті виконання алгоритму отримали координати двох прямих, які відповідають стрілкам, у параметричній площині $\rho\phi$.

2.6 Висновки до розділу

1. Запропонована структурна схема комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів, яка дозволяє керувати випробувальним сигналом за рахунок використання генератора випробувальних сигналів.

2. Розроблено метод та алгоритм оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів, що включає етапи бінаризації, фільтрації, скелетизації об'єктів зображення та розпізнавання значень за допомогою перетворення Хафа.

3. Розроблено метод адаптивної бінаризації зображення, що дозволяє підвищити точність розпізнавання стрілки та стійкість до шуму за рахунок представлення зображення у вигляді інтегральної матриці та використання простих математичних операцій.

4. Розроблено метод скелетизації, що дозволяє підвищити якість розпізнавання стрілки за рахунок використання концентрованих кіл, центри яких будуються по центральній вісі об'єкта та є координатами скелетизованого об'єкта, що легко апроксимуються у пряму.

Результати проведених досліджень опубліковано у [59,60, 62, 63, 64, 68].

РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

3.1 Перетворення кута повороту стрілки у вимірне значення приладу

При використанні програмного засобу необхідно ініціалізувати оптичний прилад (веб-камеру, цифрову відеокамеру, цифровий фотоапарат, сканер). Для зручності у використанні та економічній ефективності використовується звичайна веб-камера (з роздільною здатністю 640x480 пікселів та частотою до 30 кадрів за секунду), яка направляється на вимірювальний прилад так, щоб чітко було видно весь прилад.

У якості стрілочного вимірювального приладу є манометр та навчальний вольтметр. Манометр має рівномірну кругову шкалу, навчальний вольтметр – дугову кругову шкалу (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Випробувальні прилади

Для чіткого виділення стрілки налаштовують поріг бінаризації. Далі, в автоматичному режимі, йде процес оптичного розпізнавання значень зі шкали стрілочного вимірювального приладу [65].

Так як сказано було вище, параметр ρ – це довжина радіус вектора найближчої до початку координат точки на прямій (тобто нормалі до прямої, проведеної з початку координат), а φ – це кут між цим вектором і віссю абсцис, то, ці координати можна перевести у Декартові за допомогою рівнянь:

$$x = r \cos \varphi ; \quad (3.1)$$

$$y = r \sin \varphi . \quad (3.2)$$

Координати точок для побудови однієї прямої:

$$x_{11} = 0; y_{11} = \frac{r_1}{\sin \varphi_1}; \quad (3.3)$$

$$x_{12} = \frac{r_1}{\cos \varphi_1}; y_{12} = 0. \quad (3.4)$$

Координати точок для побудови іншої прямої:

$$x_{21} = 0; y_{21} = \frac{r_2}{\sin \varphi_2}; \quad (3.5)$$

$$x_{22} = \frac{r_2}{\cos \varphi_2}; y_{22} = 0. \quad (3.6)$$

При знаходженні кута повороту стрілки потрібно врахувати тип шкали: дугова чи кругова.

Для прикладу, розглянемо дугову шкалу. При знаходженні кута повороту стрілки для дугової шкали вибрано два випадки:

$$\frac{x - x_{11}}{x_{12} - x_{11}} = \frac{y - y_{11}}{y_{12} - y_{11}}; \quad (3.7)$$

$$\frac{x - x_{21}}{x_{22} - x_{21}} = \frac{y - y_{21}}{y_{22} - y_{21}}. \quad (3.8)$$

У результаті перетворень знаходимо точку перетину прямих $O'=(x; y)$ (рис. 3.4).

$$x = \frac{(x_{11} \cdot y_{12} - x_{21} \cdot y_{11}) \cdot (x_{22} - x_{21}) - (x_{21} \cdot y_{22} - x_{22} \cdot y_{21}) \cdot (x_{21} - x_{11})}{(y_{11} - y_{12}) \cdot (x_{22} - x_{21}) - (y_{21} - y_{22}) \cdot (x_{12} - x_{11})}; \quad (3.9)$$

$$y = \frac{(y_{21} - y_{22}) \cdot x - (x_{21} \cdot y_{22} - x_{22} \cdot y_{21})}{(x_{22} - x_{21})}. \quad (3.10)$$

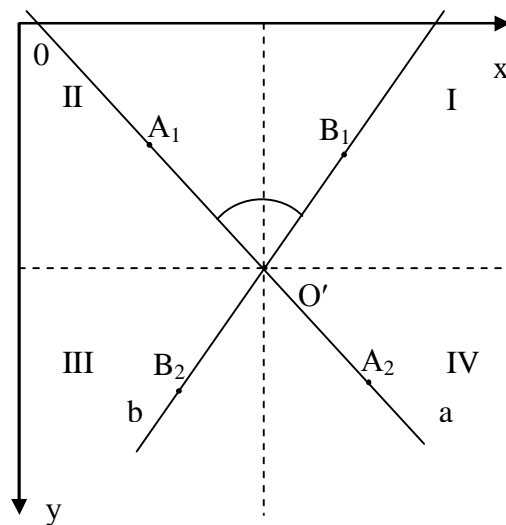


Рисунок 3.4. – Знаходження точки перетину прямих a і b

В точку O' поставимо початок координат. Від точки перетину O' прямих a і b будемо відрізки з однаковою довжиною в різні боки по прямих a і b .

В околі точок A_1, A_2, B_1, B_2 в 1 піксель шукаємо пікселі, які належать стрілкам. Якщо їх більше двох, то це стрілка. На рис. 3.5 стрілка позначена чорними пікселями, а сірими – прямі, знайдені після перетворення Хафа:

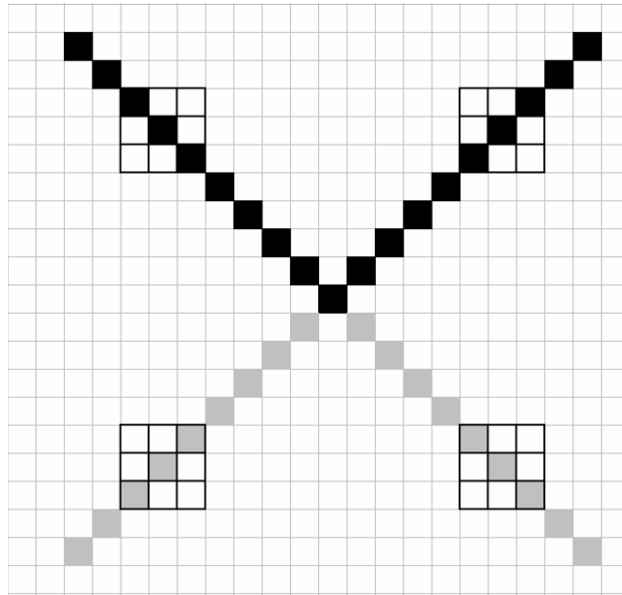


Рисунок 3.5 – Визначення точного розташування стрілок по чвертях

Після цього обчислюємо кутові коефіцієнти прямих a і b :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = k_1 = \frac{x_{12} - x_{11}}{y_{12} - y_{11}}; \quad (3.11)$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_{12} - x_{11}}{y_{12} - y_{11}} \right); \quad (3.12)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = k_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{y_{22} - y_{21}}; \quad (3.13)$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_{22} - x_{21}}{y_{22} - y_{21}} \right). \quad (3.14)$$

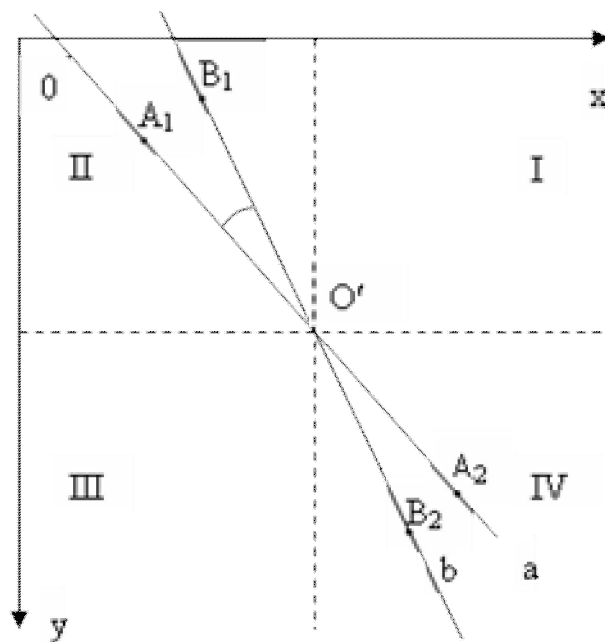
При визначенні положення стрілки враховується кутовий коефіцієнт.

До цього випадку можна сформулювати таку умову: якщо $A_1 \in II$ і $B_1 \in I$, $k_1 < 0$ і $k_2 \geq 0$. Тоді можна обчислити кут за такою формулою

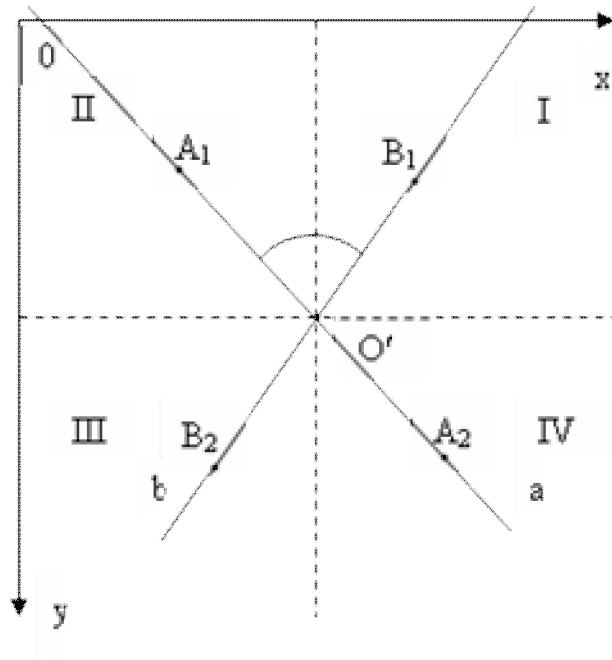
$$\varphi = 180 - (\varphi_1 + \varphi_2). \quad (3.15)$$

Розглянемо всі можливі варіанти. Для дугової шкали їх буде 2, а для кругової – 5. Пряма a – це нульове положення стрілки.

Для дугової шкали рисунки представлені по руху стрілки по шкалі (рис. 3.6).



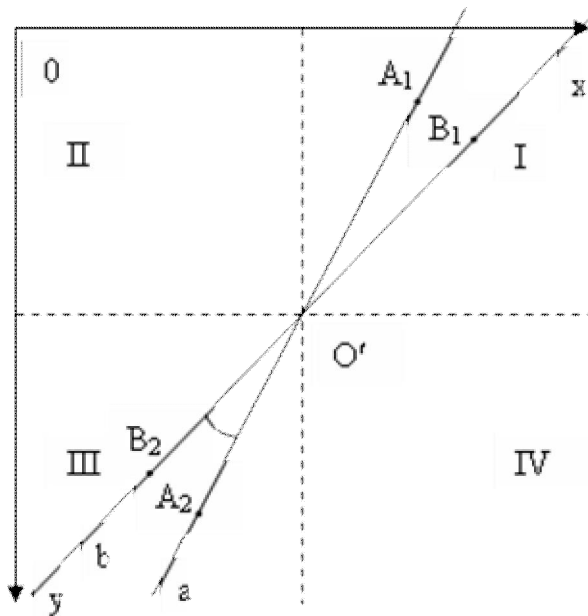
a)



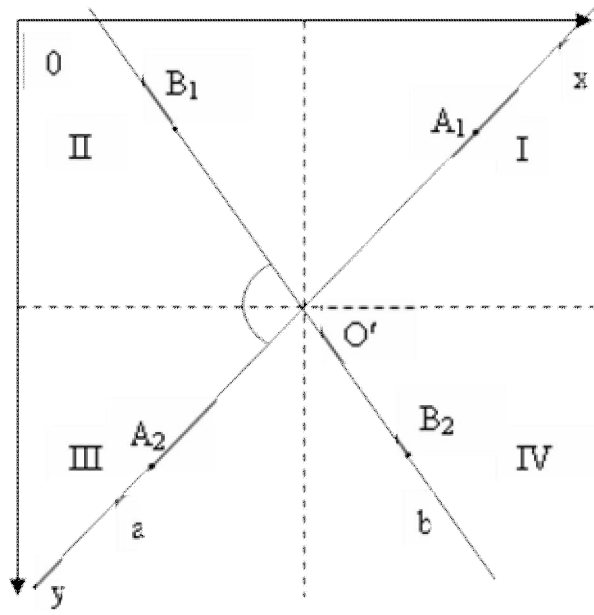
б)

Рисунок 3.6 – Варіанти положень стрілок для дугової шкали

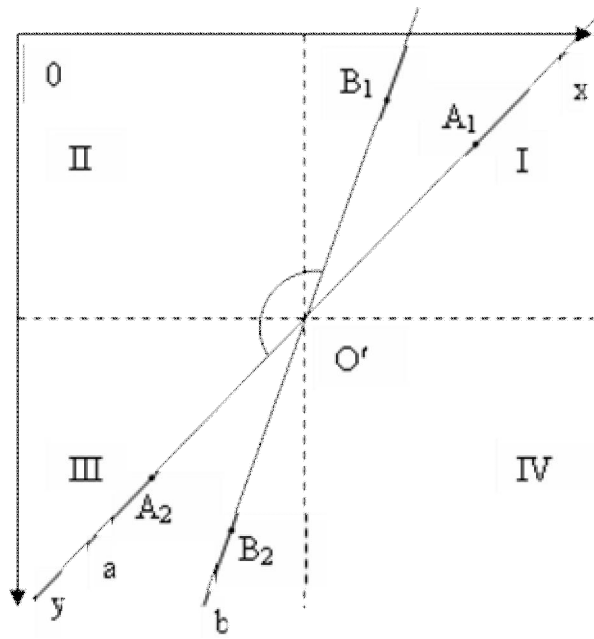
Для дугової та кругової шкал рисунки представлені по руху стрілки по шкалі (рис. 3.7).



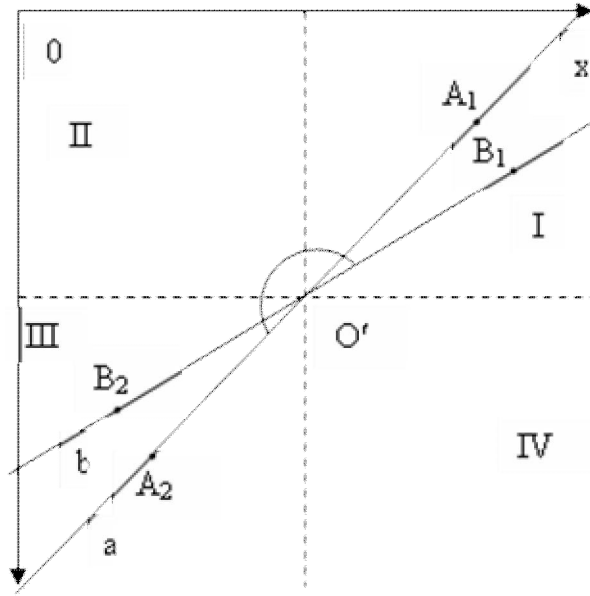
а)



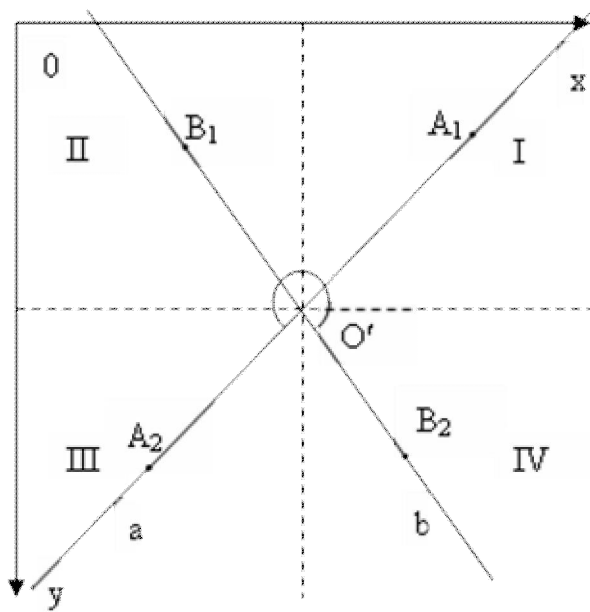
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.7 – Варіанти положень стрілок для кругової шкали

Узагальнена формула (3.16) для знаходження кута відхилення стрілки [63].

$$\varphi = \begin{cases} \|\varphi_1 - \varphi_2\|, & \text{якщо } A_1 \in II \text{ і } B_1 \in II, k_1 \geq 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ \|\varphi_1 - \varphi_2\|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_2 \in III, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \leq 0; \\ |\varphi_1| + |\varphi_2|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in II, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ 180 + |\varphi_1| + |\varphi_2|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_2 \in IV, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ 180 - (|\varphi_1| + |\varphi_2|), & \text{якщо } A_1 \in II \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ 180 - |\varphi_1| + |\varphi_2|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 < 0; \\ 180 + |\varphi_1| - |\varphi_2|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 < 0. \end{cases} \quad (3.16)$$

3.2 Визначення статичних характеристик стрілочних вимірювальних приладів

Основною метрологічною характеристикою в статичному режимі є функція (рівняння) перетворення – залежність інформативного параметра вихідного сигналу від інформативного параметра його вхідного сигналу.

У загальному виді вона може бути записана у вигляді

$$y = f(x), \quad (3.17)$$

де f – деяка функція, що описує ряд певних математичних операцій, здійснених над вхідною величиною x . Функція перетворення є функцією багатьох змінних і може бути подана у вигляді

$$y = y(x, p), \quad (3.18)$$

де, y – вихідна величина засобу вимірювання, p – впливні величини.

Для дослідження та аналізу основних статичних характеристик розкладемо рівняння (3.18) в ряд Тейлора

$$y = y_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 \cdot x + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 \cdot x^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 \cdot x^3 + \dots + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial p}\right)_0 \cdot x \cdot p + \left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)_0 \cdot p + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial p^2}\right)_0 \cdot p^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 \cdot x^3 + \dots \quad (3.19)$$

Отримаємо такі аналітичні залежності:

1. вільний член розкладу y_0 ;
2. чутливість засобу вимірювання

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_0 = S_0; \quad (3.20)$$

3. зміна чутливості в діапазоні перетворення:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)_0 = S_0', \quad (3.21)$$

$$\frac{1}{6}\left(\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}\right)_0 = S_0''; \quad (3.22)$$

4. коефіцієнти впливу впливних величин на вихідний параметр y засобу вимірювання:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)_0 = \beta_0', \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial p^2}\right)_0 = \beta_0''; \quad (3.24)$$

5. коефіцієнт впливу виливної величини на чутливість

$$\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial p}\right)_0 = \alpha_0; \quad (3.25)$$

6. рівняння розкладу (3.19) в ряд Тейлора з урахуванням рівнянь (3.20), (3.21), (3.22), (3.23), (3.24), (3.25) має вигляд

$$y = y_0 + S_0 \cdot x + S_0' \cdot x^2 + S_0'' \cdot x^3 + \dots \\ + \alpha_0 \cdot x \cdot p + \beta_0 \cdot p + \beta_0' \cdot p^2 + \beta_0'' \cdot x^3 + \dots, \quad (3.26)$$

де $y = S_0 \cdot x + S_0' \cdot x^2 + S_0'' \cdot x^3$ – номінальна функція перетворення;

7. абсолютна мультиплікативна похибка перетворення при зміні p_0 на величину p

$$\Delta y_m = \alpha_0 \cdot x \cdot p; \quad (3.27)$$

8. абсолютна адитивна похибка перетворення при зміні p_0 на величину p

$$\Delta y = \beta_0 \cdot p + \beta_0' \cdot p^2. \quad (3.28)$$

Статична характеристика засобу вимірювань може бути як лінійною, так і нелінійною. Остання може бути з достатнім ступенем точності лінеаризована.

Градувальна характеристика – залежність між значеннями вимірюваної величини на виході та вході засобу вимірювань, що отримані під час градування (калібрування) та подані у вигляді таблиці, графіка або формули.

Чутливість – відношення зміни вихідної величини засобу вимірювань до зміни вхідної величини, що її викликає,

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (3.29)$$

Тобто чутливість характеризує здатність засобу вимірювання реагувати на зміну вхідного сигналу.

При лінійному рівнянні перетворення $S = const$. В даному випадку шкала засобу вимірювань рівномірна, що є досить суттєвою перевагою порівняно із засобами вимірювань із нерівномірною шкалою.

Величину, обернену до чутливості, називають ціною поділки ($C = 1/S$).

Крім чутливості засоби вимірювань характеризуються порогом чутливості і зоною нечутливості.

Поріг чутливості – найменше значення вимірюваної величини, яке може бути виявлене засобом вимірювань.

Зона нечутливості – діапазон значень вимірюваної величини, в межах якого її зміни не викликають зміни показу засобу вимірювань.

Досить важливою характеристикою є діапазон вимірювань. У [38] розрізняють діапазон показів і діапазон вимірювань.

Діапазон показів – інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений початковим та кінцевим її значеннями.

Початковим значенням вимірюваної величини називають найменше в діапазоні показів її значення, а кінцевим – її найбільше значення.

Діапазон вимірювань – інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого пронормовані похибки засобу вимірювань.

Нормованими є верхня x_{\max} і нижня x_{\min} межі вимірювання.

У вимірювальній практиці широко використовується також термін "повний діапазон", під яким розуміють відношення верхньої межі вимірювання x_{\max} до порогу чутливості

$$D = \frac{x_{\max}}{X}, \quad (3.30)$$

де X – поріг чутливості.

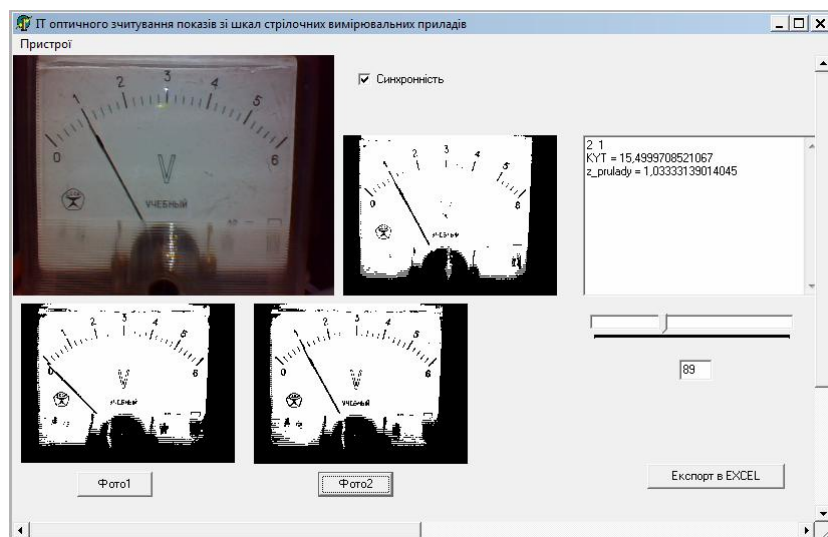
Швидкодія – час, витрачений на вимірювання, під яким розуміють проміжок часу з моменту зміни вимірюваної величини до моменту встановлення показу приладу.

Показ – значення вимірюваної величини, створене за допомогою засобу вимірювань та подане сигналом вимірювальної інформації.

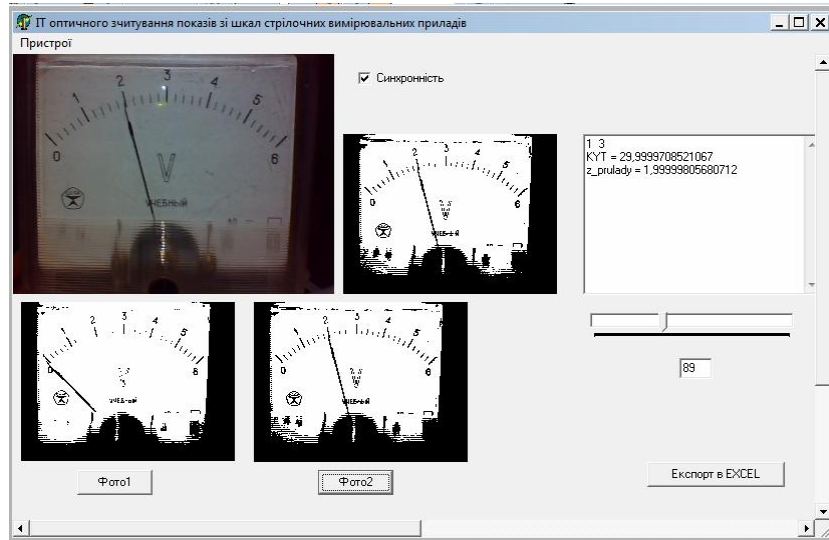
Час встановлення – інтервал часу від моменту початку дії вхідного сигналу до моменту, коли показ досягає і залишається в середині повних меж навколо усталеного значення.

Варіація показу засобу вимірювань – різниця між двома показами засобу вимірювання, коли одне й те ж значення вимірюваної величини досягається внаслідок її збільшення чи зменшення.

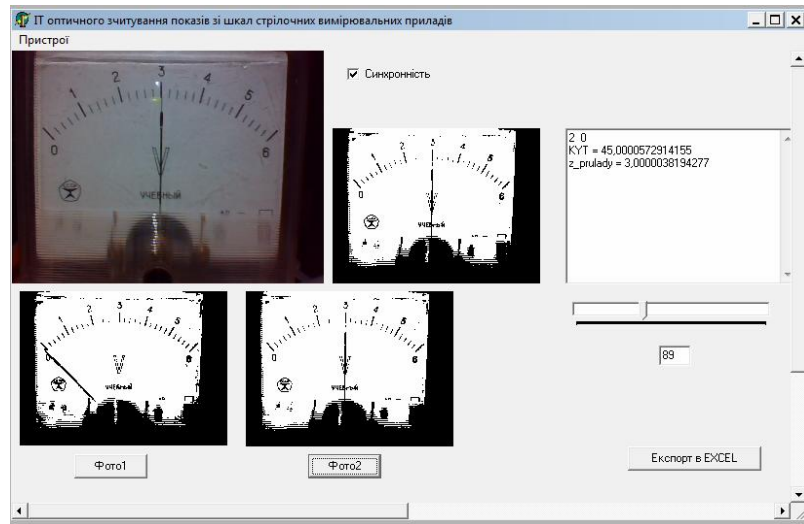
Усі розглянуті вище характеристики є метрологічними. Крім них існує більша група характеристик, названих неметрологічними. До них належать показники надійності, стійкості до кліматичних і механічних впливів, напруга живлення та ін. [16]. Використовуючи комп'ютерну систему для випробувань стрілочних вимірювальних приладів розпізнано значення напруг вольтметра при $U=1\text{ В}$, $U=2\text{ В}$, $U=3\text{ В}$, $U=4\text{ В}$, $U=5\text{ В}$ та $U=6\text{ В}$, (рис. 3.8).



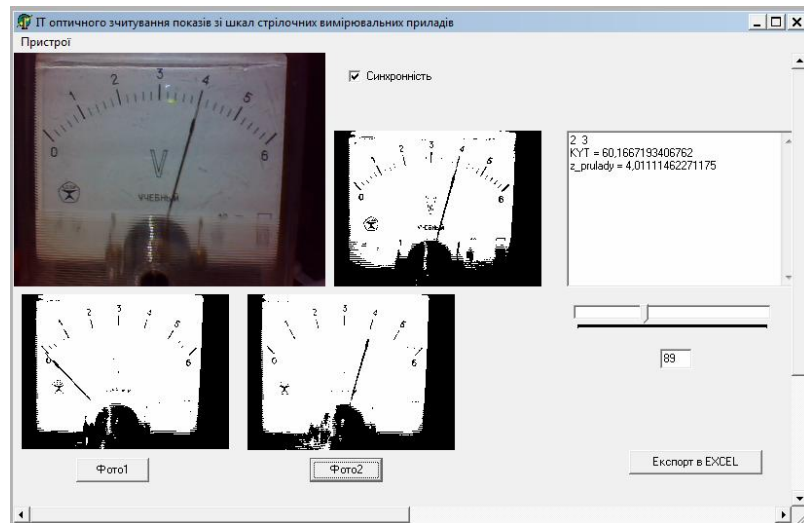
a) $U=1\text{ В}$



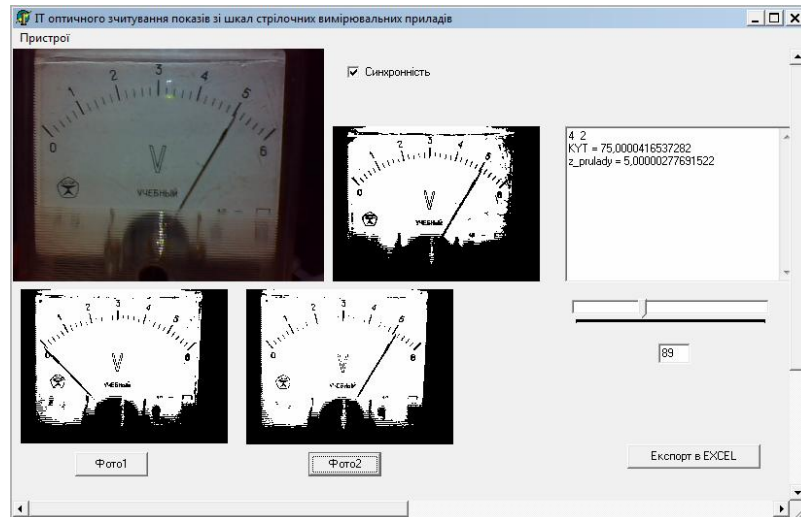
б) $U = 2 \text{ В}$



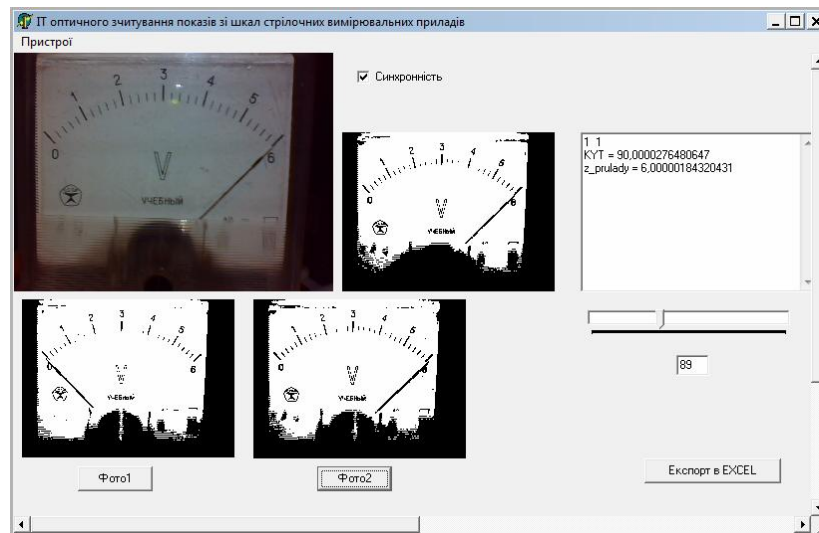
в) $U = 3 \text{ В}$



г) $U = 4 \text{ В}$



д) $U = 5 \text{ В}$



е) $U = 6 \text{ В}$

Рисунок 3.8 – Демонстрація роботи програмного засобу при розпізнаванні значень приладу при: а) $U = 1 \text{ В}$, б) $U = 2 \text{ В}$, в) $U = 3 \text{ В}$, г) $U = 4 \text{ В}$, д) $U = 5 \text{ В}$ е)

$U = 6 \text{ В}$

Розпізнані значення напруги наведені в таблиці табл. 3.1

Таблиця 3.1 Розпізнані значення напруги

№	Виміряне значення напруги, В	Розпізнане значення напруги, В	Похибка	
			абсолютна, В	відносна
1	1	1,01	0,01	1,00%
2	2	2,00	0,00	0,00%
3	3	3,00	0,00	0,00%
4	4	4,01	0,01	0,25%
5	5	5,00	0,00	0,00%
6	6	6,00	0,00	0,00%

Аналізуючи отримані результати можна спостерігати незначне явище паралаксу та положення площини циферблату приладу до веб-камери, що є основними фактором похибки. Це явище виникає між веб-камерою та центральною вертикальною віссю приладу.

Абсолютна статична похибка визначається за формулою

$$\Delta_{\text{стат}} = \Delta_{\text{макс}} \quad (3.31)$$

Тобто $\Delta_{\text{стат}} = 0,01 \text{ В}$.

Відносна статична похибка визначається за формулою

$$\delta_{\text{стат}} = \frac{\Delta_{\text{стат}}}{x_{\text{норм}}}, \quad (3.32)$$

де $x_{\text{норм}}$ – максимальне значення, яке може виміряти прилад.

Підставляючи значення, отримаємо

$$\delta_{\text{стат}} = \frac{0,01 \text{ В}}{6 \text{ В}} = 0,0017 \cdot 100\% = 0,17\% \quad (3.33)$$

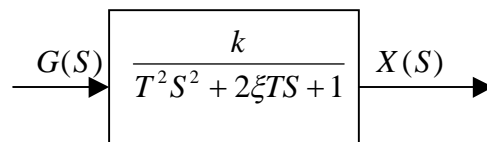
Отримані результати похибок свідчать про незначні відхилення в статичному режимі роботи.

3.3 Визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів

Коливальною ланкою називається найпростіший динамічний елемент системи автоматичного керування або його складова частина, що має передаточну функцію виду

$$W(S) = \frac{k}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1}. \quad (3.34)$$

На структурних схемах коливальна ланка зображується в такий спосіб:



Динамічні властивості коливальної ланки визначаються трьома параметрами

k – коефіцієнтом підсилення (передачі) коливальної ланки;

T – постійна часу коливальної ланки;

ξ – відносний коефіцієнт затухання коливальної ланки $0 \leq \xi < 1$.

Дріб виду $\frac{1}{d_2 S^2 + d_1 S + d_0}$ можна перетворити до виду (3.34) у такий

спосіб

$$W(S) = \frac{1}{d_2 S^2 + d_1 S + d_0} = \frac{\frac{1}{d_0}}{\frac{d_2}{d_0} S^2 + \frac{d_1}{d_0} S + 1}. \quad (3.35)$$

Введемо позначення:

$$k = \frac{1}{d_0}; \quad (3.36)$$

$$T^2 = \frac{d_2}{d_0}; \quad (3.37)$$

$$T = \sqrt{\frac{d_2}{d_0}}; \quad (3.38)$$

$$\xi T = \frac{d_1}{d_0}; \quad (3.39)$$

$$\xi = \frac{d_1}{2Td_0} = \frac{d_1\sqrt{d_0}}{2d_0\sqrt{d_2}} = \frac{d_1}{2\sqrt{d_0d_2}}. \quad (3.40)$$

Тоді остання рівність приймає вигляд (3.34). Отримаємо математичну модель коливальної ланки у вигляді диференціального рівняння:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1} = \frac{X(s)}{G(s)}; \quad (3.41)$$

$$(T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1) \cdot X(s) = k \cdot G(s); \quad (3.42)$$

$$T^2 \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = k \cdot g(t). \quad (3.43)$$

Це лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Отже, математичною моделлю коливальної ланки є диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Диференціальному рівнянню (3.43) відповідає характеристичне рівняння

$$T^2 \cdot \lambda^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \lambda + 1 = 0 \quad (3.44)$$

(порівняємо зі знаменником передаточної функції (3.34)), його корінь обчислюємо за формулою

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\xi}{T} \pm \sqrt{\frac{\xi^2 - 1}{T^2}} = -\frac{\xi}{T} \pm \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{T}. \quad (3.45)$$

Якщо $0 \leq \xi < 1$, то корінь характеристичного рівняння (3.44) – комплексно-спряжені

$$\lambda_1 = -\alpha + j \cdot \beta; \quad (3.46)$$

$$\lambda_2 = -\alpha - j \cdot \beta, \quad (3.47)$$

де:

$$\alpha = \frac{\xi}{T}; \quad (3.48)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}. \quad (3.49)$$

Таким чином, загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння ($g(t) = 0$) визначальне власне динамічні властивості коливальної ланки має вигляд

$$x_0(t) = e^{-\alpha t} (c_1 \sin \beta \cdot t + c_2 \cos \beta \cdot t), \quad (3.50)$$

де C_1 і C_2 – постійні інтегрування.

Якщо $\xi > 1$, то коливальна ланка розпадається на дві аперіодичні ланки.

Якщо $\xi = 0$, то власний рух коливальної ланки – незатухаючі коливання із частотою $\omega = \frac{1}{T}$. При $\xi = 0$ коливальна ланка називається консервативним.

Початкові умови для рівняння (3.43) – нульові. Загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння (3.43) визначається рівністю (3.50).

Частинний розв'язок неоднорідного рівняння

$$T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = k(t) \quad (3.51)$$

буде $x_H(t) = k$. Тоді розв'язок неоднорідного рівняння (3.51) буде мати вигляд

$$x_0(t) = e^{-\alpha t} (c_1 \sin \beta t + c_2 \cos \beta t) + k. \quad (3.52)$$

Постійні інтегрування C_1 і C_2 визначаються нульовими початковими умовами:

$$x(0) = 0; \quad (3.53)$$

$$\frac{dx(0)}{dt} = 0. \quad (3.54)$$

Маємо:

$$\dot{x}(t) = -\alpha e^{-\alpha t} (c_1 \sin \beta t + c_2 \cos \beta t) + e^{-\alpha t} \beta (c_1 \cos \beta t - c_2 \sin \beta t); \quad (3.55)$$

$$\left. \begin{aligned} x(0) = C_2 + k = 0 \\ \frac{dx(0)}{dt} = -\alpha C_2 + \beta C_1 = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.56)$$

Це система лінійних рівнянь щодо постійних інтегрування C_1 і C_2 .

Розв'язок цієї системи рівнянь із урахуванням значень α і β дає:

$$C_1 = -\frac{\xi k}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad (3.57)$$

$$C_2 = -k. \quad (3.58)$$

Перетворимо рівність (3.52) у такий спосіб

$$x(t) = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \cdot e^{-\alpha t} \left[\frac{C_1}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \sin \beta t + \frac{C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \cos \beta t \right] + k. \quad (3.59)$$

Позначимо:

$$\cos \varphi = \frac{C_1}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}}; \quad (3.60)$$

$$\sin \varphi = \frac{C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}}; \quad (3.61)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{C_2}{C_1} \quad (3.62)$$

Тоді рівність (3.59) приймає вигляд (з урахуванням обчислених значень постійних інтегрування C_1 і C_2):

$$\sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \frac{k}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad (3.63)$$

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= k \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T} t} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t + \varphi \right) \right] = h(t) \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

Рівняння (3.64) яке описує затухаючий коливальний процес з відносним коефіцієнтом затухання ξ та частотою $\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$. Значення, що встановилось, цільової функції визначається як $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$. Графік функції $h(t)$ показаний на рис. 3.9:

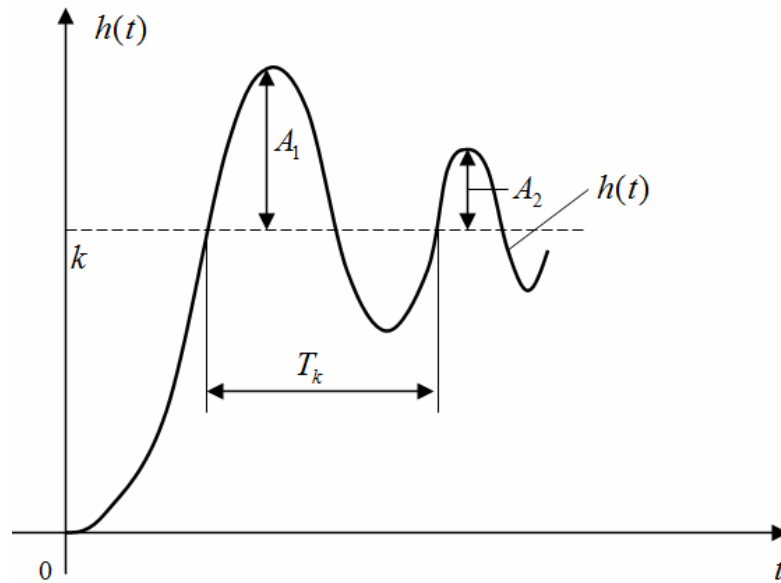


Рисунок 3.9 – Затухаючий коливальний процес де, T_k – період коливань, A_1, A_2 – амплітуди двох сусідніх коливань.

За графіком функції $h(t)$ можна визначити параметри коливальної ланки в такий спосіб:

1. Коефіцієнт підсилення коливальної ланки визначають за встановленим значенням перехідної функції $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$.
2. Постійну часу T і коефіцієнт затухання ξ можна знайти з рівнянь:

$$\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot T_k = 2 \cdot \pi ; \quad (3.65)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\frac{\xi}{T} T_k} \quad (3.66)$$

Для визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів потрібно мати ряд значень показів приладу та часовий ряд, що відповідає часу в момент фотографування приладу.

Для цього потрібно сфотографувати покази приладу (стрілки) через певний дискретний час. Чим крок дискретності буде меншим, тим більше значень показів приладу можна буде отримати, що дасть можливість більш точно визначити параметри динамічної характеристики.

При фотографуванні приладу стрілка була розмита на зображенні. Іншою проблемою було неможливість встановити 30 кадрів за секунду при фотографуванні.

Як виявилось, у налаштуваннях веб-камери експозиція була в автоматичному режимі. Експозиція у фотографії – кількість освітлення, що падає на опромінюваний фотографічний матеріал. Експозиція дорівнює добуткові освітленості фотоматеріалу на час освітлення (витримку). Тобто, при автоматичному налаштуванні експозиції веб-камера була "інертною". Внаслідок цього експозицію не можна було налаштувати та регулювати освітленість.

Зображення при мінімальному значенню експозиції було темним, але веб-камера була менш інертною. Для цього на прилад направляють джерело світла. При практичних випробуваннях встановлено, що один кадр зображення одержувався в середньому за 15-40 мс. До цього проміжку часу додавався час на запис зображення на НЖМД (вінчестер). При циклічному фотографуванні приладу створюється папка з цифровими зображеннями приладу. Далі, ці зображення також у циклічному режимі розпізнають.

У результаті маємо масив зображень показів приладу з відповідним їм рядом часу, в моменти якого ці зображення були отримані. Для визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів ці масиви імпортуються в пакет прикладних програм – MatLab.

За допомогою пакету Curve Fitting апроксимуємо ці значення відповідно до рівняння, яке описує затухаючий коливальний процес. Результат представлений на рис. 3.10.

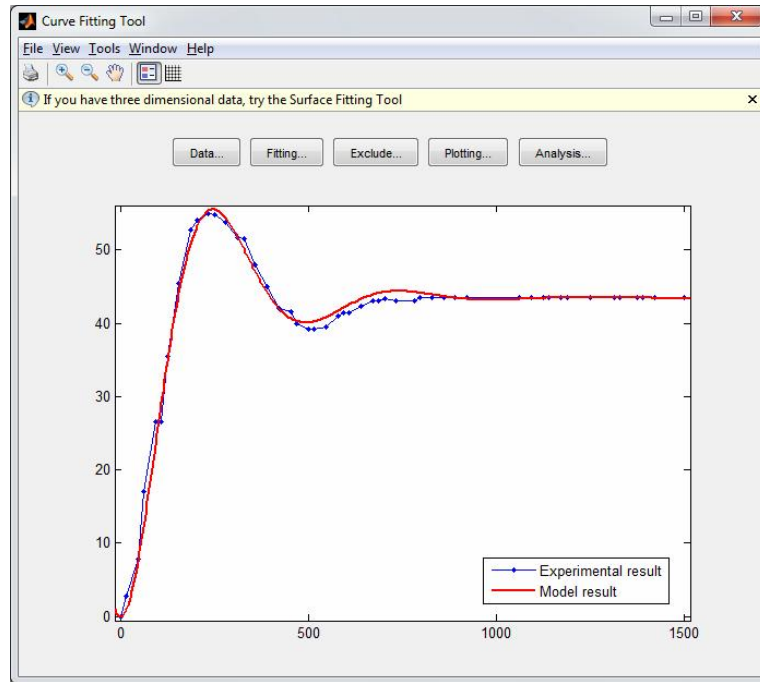


Рисунок 3.10 – Результат апроксимації

Візуальний аналіз графіка побудованої моделі показує добре наближення між емпіричними даними та теоретичними даними [66].

На рис. 3.11 показані визначені параметри за допомогою математичної моделі та визначені статистичні показники:

Результати статистичних показників:

$$SSE = 10,41;$$

$$R\text{-square} = 0,9984;$$

$$\text{Adjusted } R\text{-square} = 0,9983;$$

$$RMSE = 0,4706;$$

Параметри математичної моделі (довірчий інтервал з надійністю 95%):

$$T = 72.53 \quad (71.92, 73.15);$$

$$k = 43.44 \quad (43.3, 43.59);$$

$$\xi = 0.3776 \quad (0.3697, 0.3855).$$

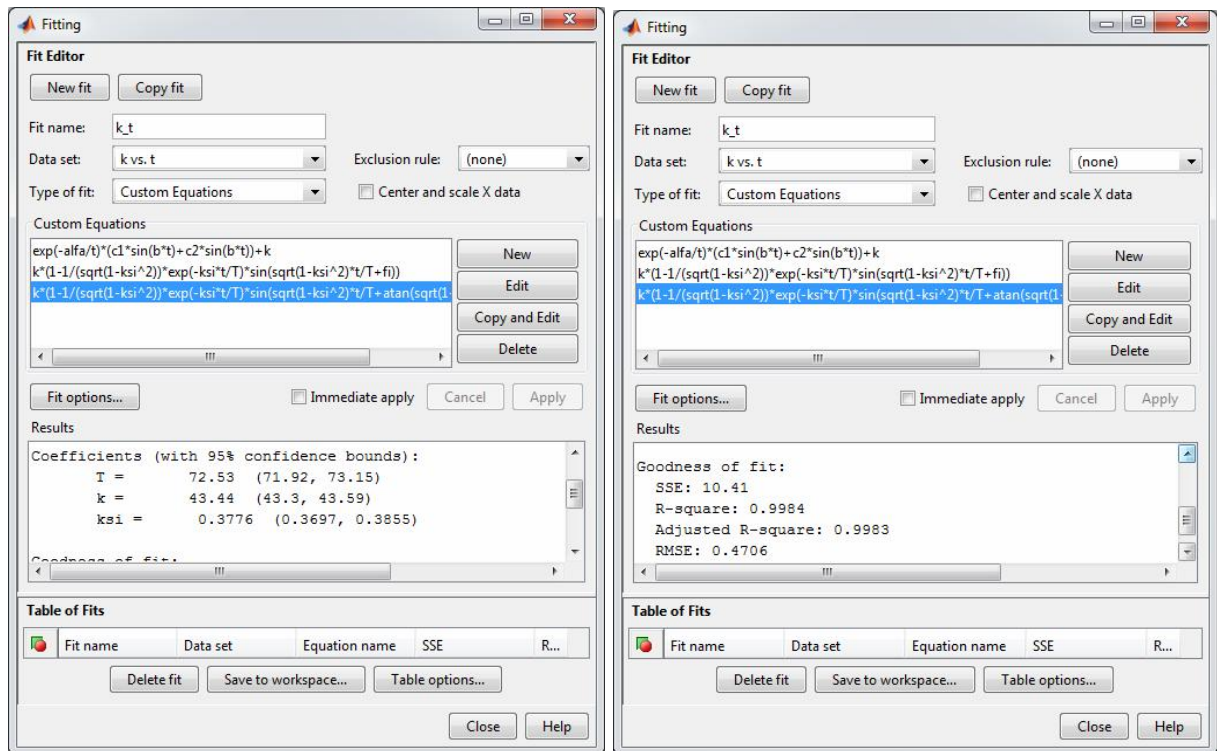


Рисунок 3.11 – Параметри моделі та результати статистичних показників

Критерій SSE (*Sum of squares due to error*) – сума квадратів похибок, обчислюється за формулою

$$SSE = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - \hat{y}_k)^2, \quad (3.67)$$

де w_k – ваги (якщо вони не задані при імпорті даних, то вважаються рівними одиниці), y_k – дані в x_k , а \hat{y}_k – значення параметричної моделі в x_k . Наближення SSE до нуля говорить про гарну якість наближення даних параметричною моделлю.

Критерій R^2 (*R-square*) – квадрат змішаної кореляції, визначається як відношення суми квадратів щодо регресії SSR до повної суми квадратів (SST) тобто:

$$SSR = \sum_{k=1}^n w_k (\hat{y}_k - \bar{y})^2; \quad (3.68)$$

$$SST = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - \bar{y})^2; \quad (3.69)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (3.70)$$

де \bar{y} - середнє.

Критерій R^2 може приймати значення тільки від нуля до одиниці й, як правило, чим ближче він до одиниці, тим краще параметрична модель наближає вихідні дані.

Однак, при збільшенні числа параметрів моделі значення критерію R^2 може збільшитися, хоча разом з тим, якість наближення не покращиться. У зв'язку із цим часто застосовують інший критерій – уточнений R^2 , у який входить число коефіцієнтів параметричної моделі.

Уточнений R^2 (*Adjusted R-square*). Якщо число даних є n , а число параметрів моделі m , то уточнений R^2 визначається так:

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(n-m)} \quad (3.71)$$

Його значення не може перевищувати одиниці, а близькі до одиниці значення уточненого R^2 свідчать про гарне наближення вихідних даних параметричною моделлю.

Корінь із середнього для квадрата помилки $RSME$

$$RSME = \sqrt{\frac{SSE}{n-m}}. \quad (3.72)$$

Близькі до нуля значення $RSME$ (*Root mean Squared Error*) означають гарне наближення вихідних даних параметричною моделлю [70].

На рис. 3.12 показані фотографії приладу в динамічному режимі.

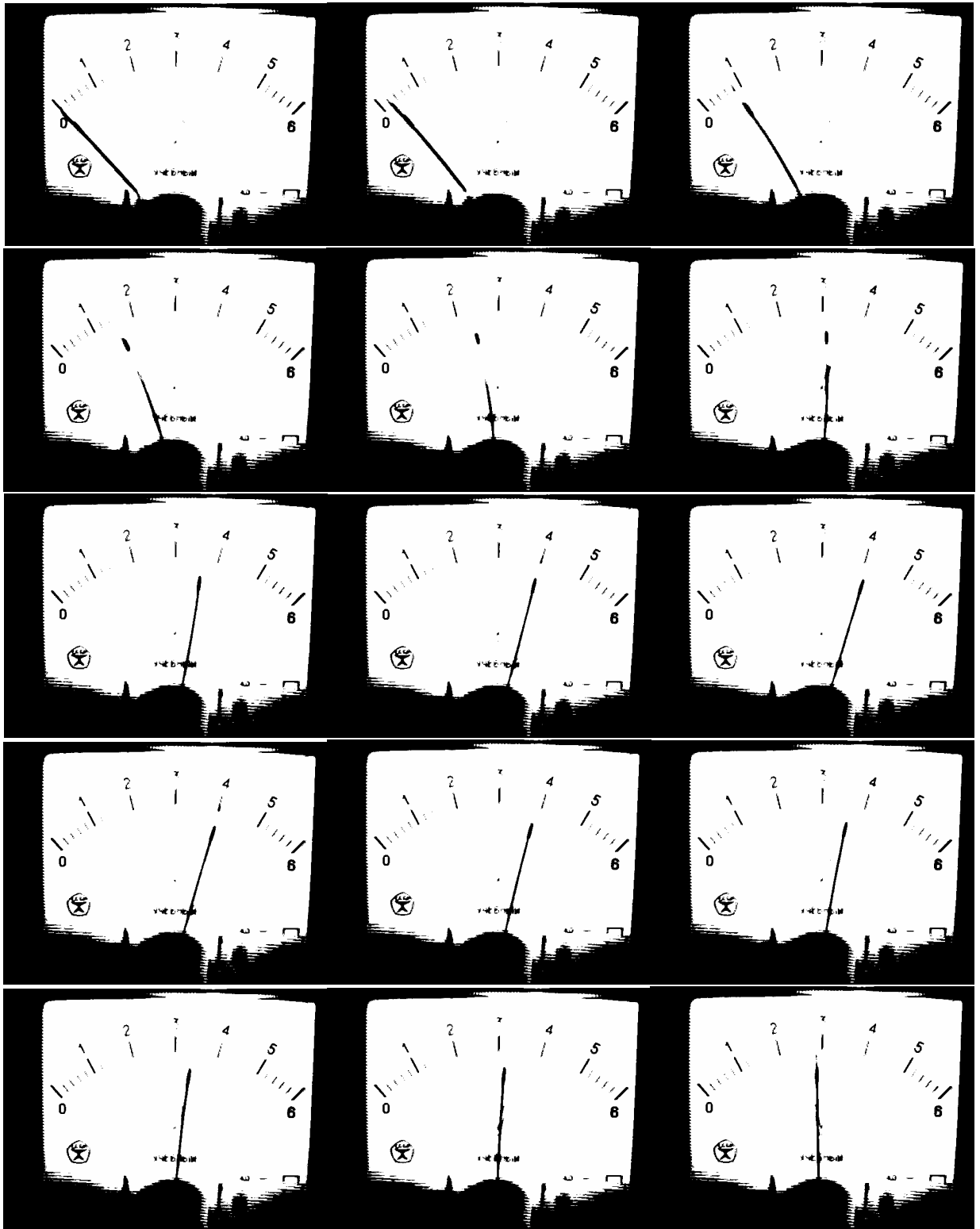


Рисунок 3.12 – Цифрові зображення приладу в динамічному режимі

Дані фотографії розпізнані за допомогою комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів та значення показів приладу, представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Визначення напруги в динамічному режимі

№	Час, мс	Емпіричне значення напруги, В	Зразкове значення напруги, В	Похибка	
				абсолютна	відносна
1	0	0,003	0,004	0,001	30,00%
2	15	0,189	0,138	0,051	26,86%
3	46	0,522	0,466	0,056	10,73%
4	62	0,833	0,766	0,067	8,08%
5	93	1,540	1,479	0,061	3,94%
6	109	1,800	1,869	0,069	3,81%
7	125	2,333	2,246	0,087	3,74%
8	156	2,953	2,885	0,068	2,30%
9	187	3,413	3,346	0,067	1,97%
10	203	3,533	3,504	0,029	0,83%
11	234	3,667	3,660	0,007	0,18%
12	250	3,650	3,672	0,022	0,60%
13	281	3,583	3,589	0,006	0,17%
14	312	3,450	3,416	0,034	0,99%
15	328	3,400	3,309	0,091	2,69%
16	359	3,133	3,097	0,037	1,17%
17	390	3,001	2,911	0,091	3,02%
18	421	2,801	2,773	0,029	1,02%
19	453	2,767	2,691	0,075	2,72%
20	468	2,667	2,673	0,007	0,25%
21	500	2,609	2,673	0,063	2,43%
22	515	2,609	2,686	0,077	2,94%
23	546	2,636	2,733	0,097	3,69%

Продовження таблиці 3.2

№	Час, мс	Емпіричне значення напруги, В	Зразкове значення напруги, В	Похибка	
				абсолютна	відносна
24	578	2,733	2,794	0,061	2,22%
25	593	2,763	2,823	0,060	2,17%
26	609	2,763	2,853	0,089	3,23%
27	640	2,823	2,901	0,077	2,74%
28	671	2,867	2,933	0,067	2,33%
29	687	2,867	2,943	0,077	2,67%
30	703	2,890	2,950	0,060	2,08%
31	734	2,867	2,951	0,085	2,95%
32	781	2,867	2,935	0,069	2,40%
33	796	2,900	2,927	0,027	0,94%
34	828	2,900	2,909	0,009	0,32%
35	859	2,900	2,894	0,006	0,21%
36	890	2,900	2,882	0,018	0,62%
37	921	2,900	2,875	0,025	0,87%
38	1062	2,900	2,883	0,017	0,60%
39	1093	2,900	2,887	0,013	0,44%
40	1125	2,900	2,891	0,009	0,30%
41	1140	2,900	2,893	0,007	0,25%
42	1171	2,900	2,894	0,006	0,21%
43	1187	2,900	2,894	0,006	0,21%
44	1250	2,900	2,893	0,007	0,23%
45	1312	2,900	2,891	0,009	0,32%
46	1328	2,900	2,890	0,010	0,34%
47	1375	2,900	2,889	0,011	0,39%

Продовження таблиці 3.2

№	Час, мс	Емпіричне значення напруги, В	Зразкове значення напруги, В	Похибка	
				абсолютна	відносна
48	1390	2,900	2,888	0,012	0,41%
49	1421	2,900	2,888	0,012	0,41%
50	1500	2,900	2,889	0,011	0,39%

Аналізуючи дані, можна побачити, що на початку вимірювань похибка є високою. Це пояснюється високою швидкістю стрілки на початку руху і веб-камера не в змозі зреагувати, але це триває протягом перших 100 мс.

На рис. 3.13 представлені графіки залежності між емпіричною та теоретичною напругами.

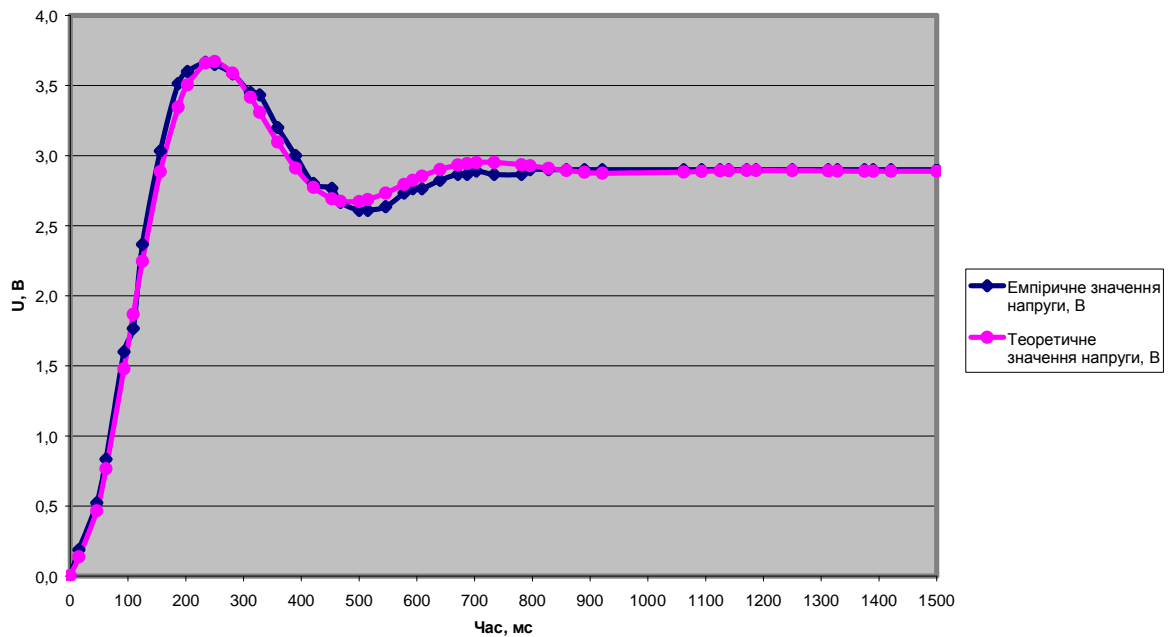


Рисунок 3.13 – Графік залежності між емпіричною та теоретичною напругами

Крива емпіричного значення напруги демонструє гарне наближення до кривої теоретичної напруги, що й показують статистичні показники.

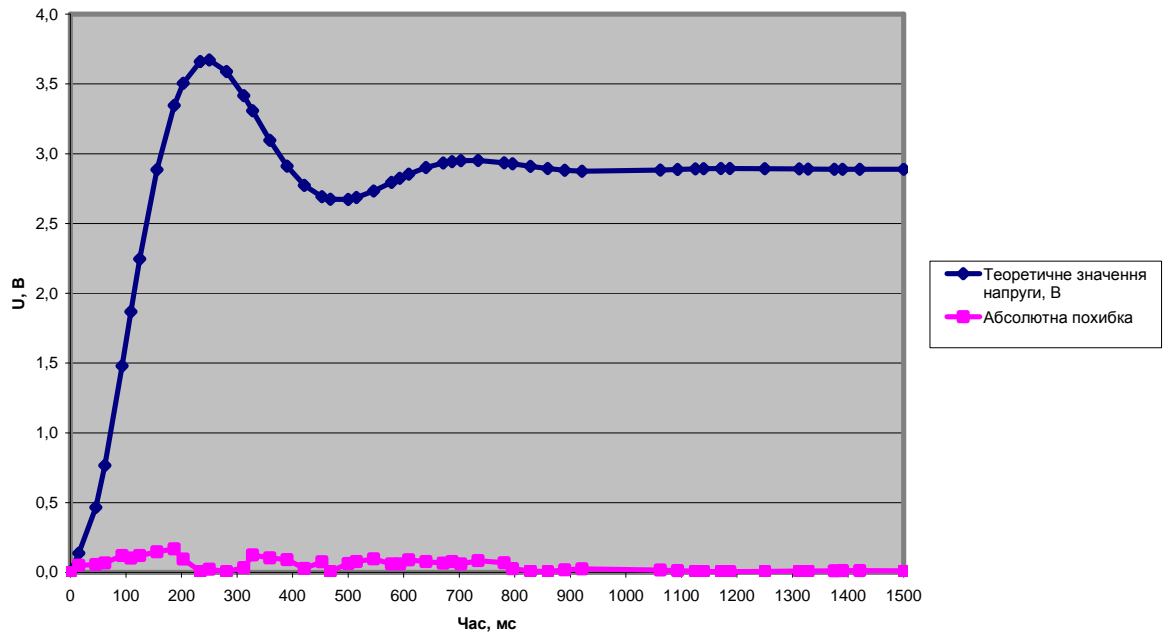


Рисунок 3.14 – Графік залежності значення теоретичної напруги від абсолютної похибки

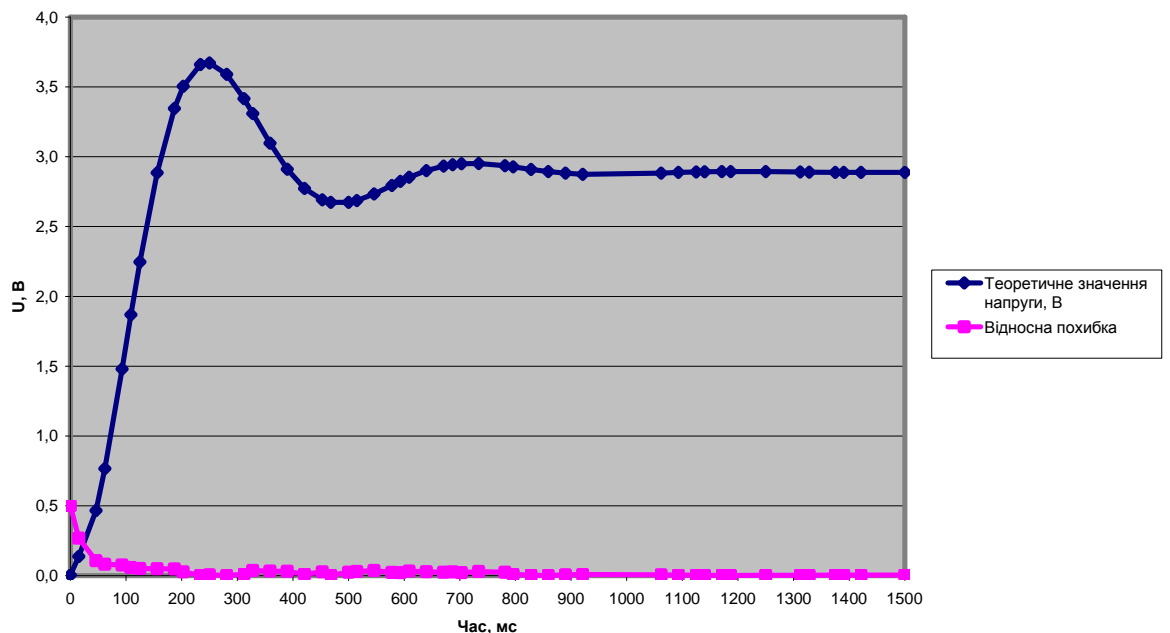


Рисунок 3.15 – Графік залежності значення теоретичної напруги від відносної похибки

Максимальна динамічна абсолютна похибка складає $\pm 0,097$ В (рис. 3.14). Динамічна відносна похибка при перших 100 мс спадає від 30% до

7,5% (рис. 3.15). Починаючи з 100 мс відносна похибка в середньому складає 1,7%. Це пояснюється високою швидкістю руху стрілки. На відрізку часу 200-1500 мс максимальна відносна похибка – 3,7%, а в середньому – 1,4%, що є гарним показником.

Отже, середня абсолютна динамічна похибка складає $\Delta_{дин} = 0,04 B$, а середня відносна динамічна похибка – $\delta_{дин} = 3,2\%$.

Загальна абсолютна похибка розраховується як сума абсолютної статистичної і динамічної похибок:

$$\Delta_{заг} = \Delta_{стат} + \Delta_{дин} = 0,01B + 0,04B = 0,05B. \quad (3.73)$$

3.4 Висновки до розділу

1. Розроблено математичну модель перетворення кута повороту стрілки у вимірне значення. Точність вимірювання кута повороту стрілки досягається за рахунок перетворення стрілки у пряму та розпізнаванні її за допомогою перетворення Хафа. Статистичні показники свідчать про адекватність поводження моделі.

2. Отримані аналітичні вирази зміни основних метрологічних характеристик засобів вимірювання дають можливість аналізувати такі статичні характеристики, номінальна функція перетворення, чутливість та зміна чутливості, коефіцієнт впливу, адитивна та мультиплікативна похибки, а також виявляти причини підвищеної похибки, вказувати шляхи її зменшення.

3. У процесі дослідження роботи в статичному і динамічному режимах роботи розроблене програмне забезпечення для інформаційно вимірювальної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів отримано, що абсолютна статична похибка дорівнює $\Delta_{стат} = 0,01 B$ та

відносна статична похибка дорівнює $\delta_{\text{стат}} = 0,5\%$, абсолютна динамічна похибка дорівнює $\Delta_{\text{дин}} = 0,04$ В та відносна динамічна похибка дорівнює $\delta_{\text{дин}} = 3,2\%$.

Результати проведених досліджень опубліковано у [61, 63, 65-67, 69, 70].

РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

4.1 Розробка архітектури комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

Для реалізації розробленої методики було побудовано структуру комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів (рис. 2.3).

Комп'ютерна система для випробувань стрілочних вимірювальних приладів включає в себе апаратні й програмні компоненти, які дозволяють проводити випробування в статичному та динамічному режимах роботи. Апаратна частина складається з персонального комп'ютера, генератора випробувальних сигналів та веб-камери.

Достатні вимоги до ПК:

- Двоядерний процесор Intel Celeron E3400 2.6GHz.
- Оперативна пам'ять 2GB.
- НЖДМ 500GB.

Основними характеристиками веб-камери є роздільна здатність та частота кадрів за секунду. Аналізуючи дані табл. 4.1 можна побачити, чим буде вища роздільна здатність веб-камери, тим буде більший об'єм зображення, що призводить до збільшення об'єму для їх зберігання та затрат часу на оброблення зображення. Коли використовувати веб-камеру з роздільною здатністю 1280x1024 зі збереженням попередніх налаштувань (24 бітна RGB модель та формат графічних файлів BMP), розмір графічного файлу складає близько 4 Мб, що є у 4 рази більше в порівнянні з веб-камерою на 0,3 Мп. Майже всі типові веб-камери мають частоту 30 кадрів за секунду.

Таблиця 4.1 Роздільна здатність веб-камери

Роздільна здатність веб-камери		Загальна кількість пікселів, Мп	Розмір графічного файлу, Мб
Кількість пікселів по горизонталі	Кількість пікселів по вертикалі		
320	240	0,1	0,2
640	480	0,3	0,9
1280	1024	1,3	3,9
1920	1080	2,1	6,2

Тому рекомендовано використовувати веб-камеру роздільною здатністю 640x480 пікселів та частотою 30 кадрів за секунду або більшою.

Генератор випробувальних сигналів – це мікроконтролер, який керує випробувальним сигналом.

Принципова схема генератора випробувальних сигналів представлена на рис. 4.1

На мікросхемі U3 FT232RL виконаємо перетворювач рівнів USB-сигналу в послідовний інтерфейс RS-232 рівня TTL, з'єднаний з мікроконтролером U2 ATmega8.

Мікросхема FT232RL характеризується:

- передачею інформації зі швидкістю до 3 МБод/с для RS422/RS485/TTL;
- високою навантажувальною здатністю виводів;
- вбудованою енергонезалежною пам'яттю EEPROM 1024 Байт.

Спряження із персональним комп'ютером здійснюється через роз'єм USB1. Світлодіоди D1 та D2 призначені для візуальної активності обміну інформацією мікропроцесора ATmega8 з персональним комп'ютером.

На перемикачі S1 реалізований вибір режиму роботи:

- тестування стрілочних індикаторів, призначених для візуалізації вимірних значень струму (амперметрів);
- тестування стрілочних індикаторів, призначених для візуалізації вимірних значень постійної та змінної напруги (вольтметрів);
- тестування стрілочних індикаторів, призначених для візуалізації вимірних значень опору (омметрів).

Мікросхема U4 LTC2602 представляє собою двоканальний 16-розрядний цифро-аналоговий перетворювач, спряжений із ATmega8 за допомогою інтерфейсу SPI. Рівняння перетворення мікросхеми LTC2602 має вигляд

$$V_{out} = \frac{k}{2^n} \cdot V_{REF}, \quad (4.1)$$

де, k – вхідний код із мікроконтролера ATmega8;

N – розрядність U4 ($N = 16$);

V_{REF} – величина опорної напруги ($V_{REF} = 5 \text{ В}$).

Опорна напруга формується за допомогою мікросхеми U1 LT1790.

Перший вихідний канал U4 LTC2602 V_{out_A} призначений формування струму для подальшого тестування амперметрів.

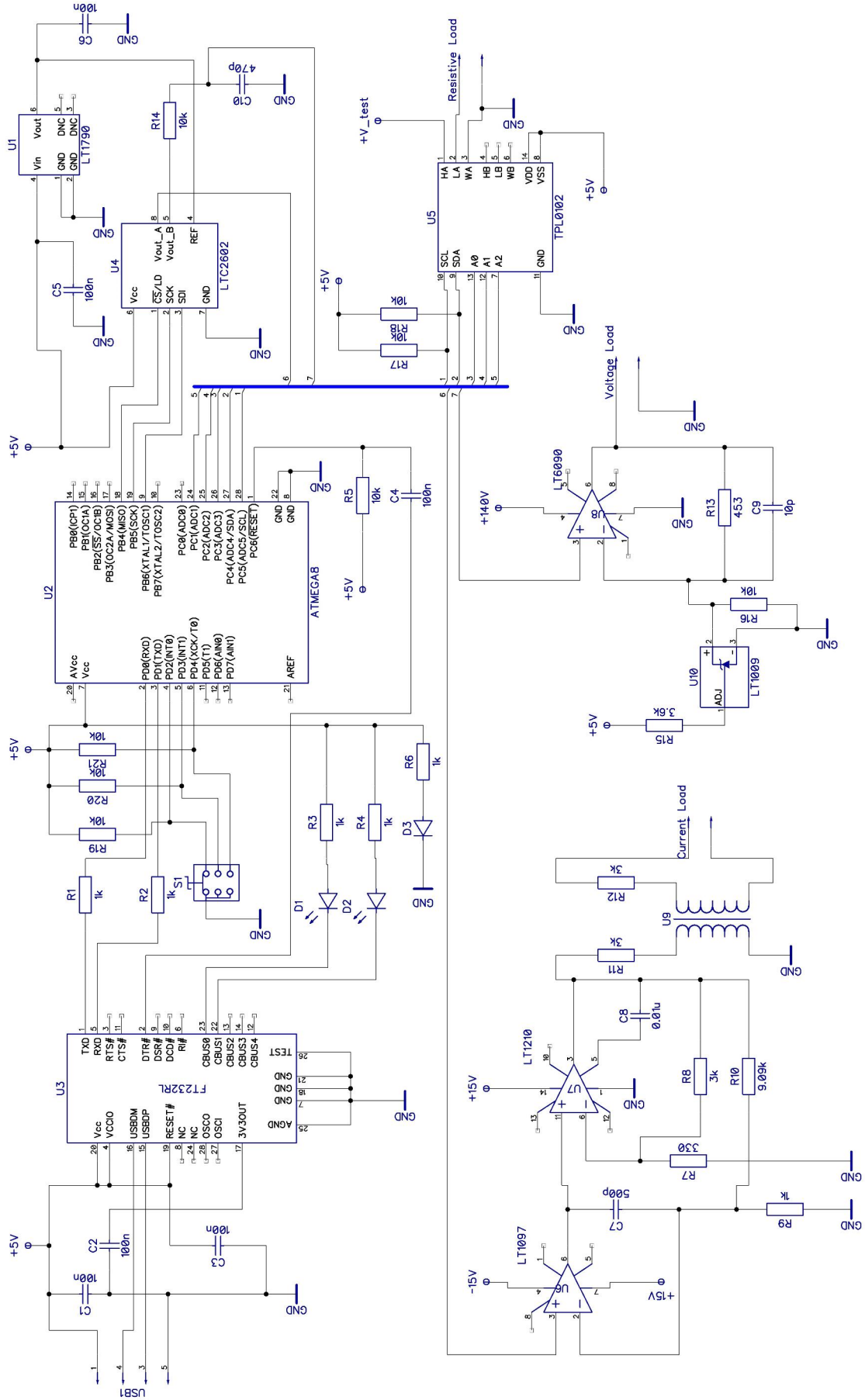


Рисунок 4.1 – Принципова схема генератора випробувальних сигналів

Другий вихідний канал U4 LTC2602 V_{out_B} призначений для подальшого формування постійної та змінної напруги тестування вольтметрів. Формування відповідних кодів здійснюється мікроконтролером U2 ATmega8 програмним шляхом.

Для формування струмового тесту вального сигналу використано високо-амперний операційний підсилювач U7 LTC1210 із схемою включення, що дозволяє формувати на вторинній обмотці трансформатора U9 струм до 10 А. Операційний підсилювач U6 LT1097 використаний в якості буферного каскаду.

Для формування постійної та змінної напруги (до 140 В) використовується високовольтний операційний підсилювач U8 LT6090. Мікросхема U10 LT1009 представляє собою джерело опорної напруги для налаштування зворотного зв'язку U8.

Задання величини опору для тестування омметрів здійснюється через цифровий потенціометр U5 TPL0102, спряжений послідовним інтерфейсом із ATmega8. Величина опору може змінюватися до 100 кОм. Можна розширити вимірювальний діапазон тестового омметра шляхом підключення додаткового резистора на до 30 МОм.

Алгоритм роботи програмного забезпечення мікроконтролера ATmega8 представлено на рис. 4.2.

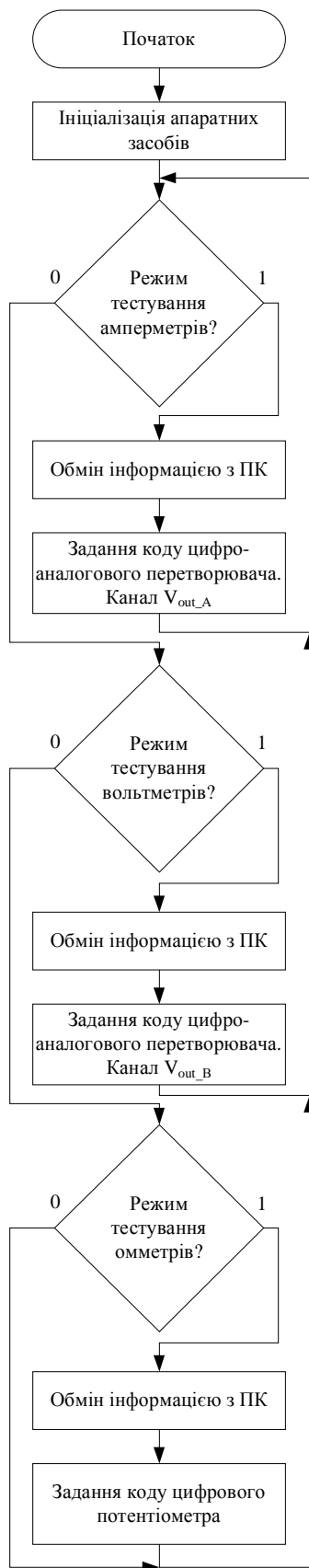


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи програмного забезпечення мікроконтролера ATmega8

Інтерфейс програми продемонстровано на рис. 4.3 (простий варіант):

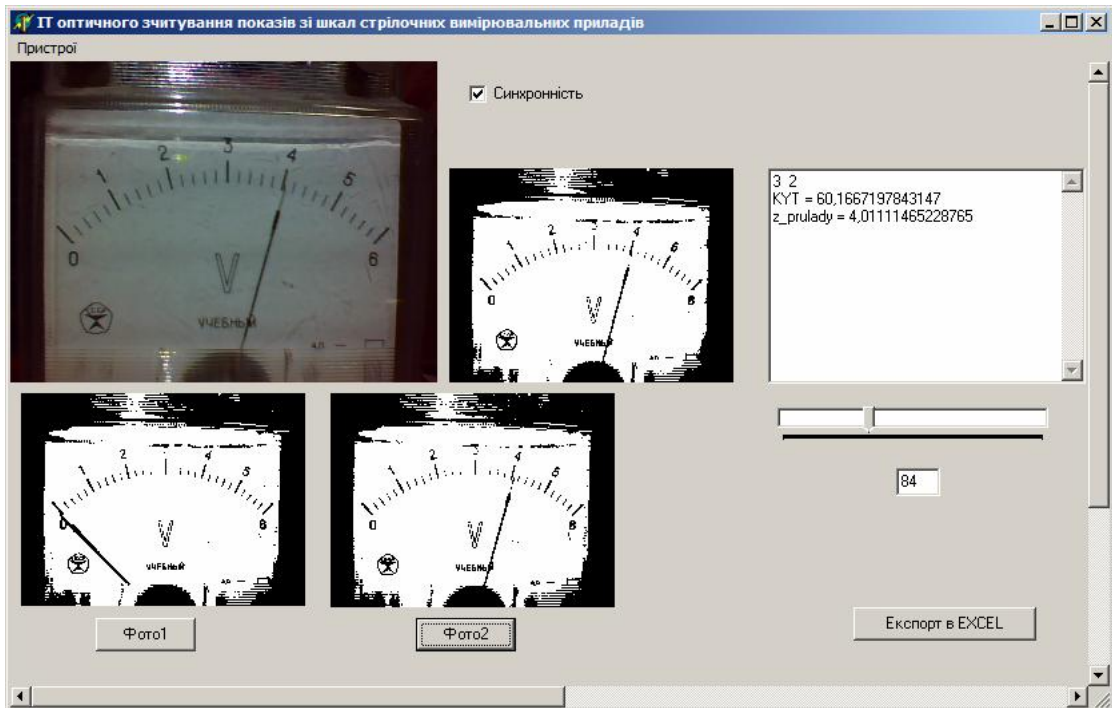


Рисунок 4.3 – Інтерфейс програми

Для початку роботи програми необхідно ініціалізувати веб-камеру та направити її на випробувальний прилад так, щоб він максимально весь був у кадрі. Потім налаштовують поріг бінаризації так, щоб чітко було видно стрілку. Як виконано ці дві умови потрібно зробити фото приладу при нульовому показі, натиснувши кнопку "Фото1". Далі, натиснувши кнопку "Фото2" запускається процес автоматичного розпізнавання показу приладу в реальному часі. У результаті роботи програми отримаємо масив значень показів приладу та час, в який була зроблена фотографія.

За замовчанням програмний засіб працює в статичному режимі. Для роботи в динамічному режимі також направляють веб-камеру на вимірювальний прилад, при цьому направивши на вимірювальний прилад джерело світла. Потрібно налаштувати веб-камеру таким чином, щоб при мінімальній експозиції було чітко видно вимірювальний прилад. У результаті

роботи програмного засобу у динамічному режимі маємо масив фотографій та час, в який була зроблена фотографія. Потім, використовуючи розроблену комп'ютерну систему для випробувань стрілочних вимірювальних приладів, розпізнаємо значення показу приладу по всіх фотографіях. Для знаходження динамічних параметрів приладу, отримані значення імпортуються в MatLab, де за рівнянням перехідного процесу (3.64) розраховуються параметри перехідного процесу: k – коефіцієнт підсилення (передачі) коливальної ланки, T – постійна часу коливальної ланки, ξ – відносний коефіцієнт згасання коливальної ланки $0 \leq \xi < 1$.

4.2 Реалізація програмного забезпечення процесу оптичного розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів для їх випробування

Розробка додатків і програмних модулів виконана в середовищі візуального програмування Delphi. В середовищі Delphi існує ряд методів та функцій за допомогою яких можна не тільки виконувати елементарні перетворення, але й серйозно працювати з графікою. Для роботи з програмою "Комп'ютерна система для випробувань стрілочних вимірювальних приладів" достатньою умовою є встановлення операційної системи Windows XP або сумісної.

У роботі програмно реалізовані такі етапи оброблення зображення та отримання значення кута відхилення стрілки:

- бінаризація;
- фільтрація;
- скелетизація;
- розпізнавання стрілки та обчислення кута відхилення стрілки.

В середовищі візуального програмування Delphi для роботи з

пікселями зображення зручніше за все використовувати масив *Bitmap.Canvas.Pixels[X,Y]*. При роботі із графікою зручно використати об'єкт класу *TBitMap* (бітовий образ). Бітовий образ являє собою двовимірний масив усіх точок зображення, кожний елемент якого – це колір (клас *Tcolor*) точки. *Tcolor* – це 4-байтовий колір, де найстарший (самий лівий) байт – службовий, а інші, зліва на право, – байти значень колірних каналів *B* (синій), *G* (зелений) і *R* (червоний) – саме в такій послідовності. Бітовий образ знаходиться в оперативній пам'яті комп'ютера і, що особливо важливо, швидко може бути оброблений і виведений на по верхню форми або області виводу зображення.

Для виводу зображення використовується об'єкт *Image*. Основною його властивістю є ширина та висота області виводу – *Image.Width* та *Image.Height*. Вони мають значення 640 на 480 пікселів. При обробленні зображення потрібно звернутися до кожного з 307200 пікселів, тобто $640 \times 480 = 307200$. Значно заощаджує час і підвищує швидкодію роботи вказівник на стрічку пікселів бітової карти зображення *ScanLine*, класу *TBitMap*. Тобто, використовуючи клас *TBitMap* для оброблення зображення в оперативній пам'яті комп'ютера та функція *ScanLine* дозволяє зменшити час на оброблення зображення та підвищити ефективність роботи програмного засобу.

До розробленого методу адаптивної бінаризації ставилися такі умови: швидкодія та стійкість до шуму. Для доступу до кожного з колірних каналів використовується:

black.rgbtRed := (clBlack and \$0000FF);

black.rgbtGreen := (clBlack and \$00FF00) shr 8;

black.rgbtBlue := (clBlack and \$FF0000) shr 16;

За формулою (4.2) здійснюється перехід від кольорового зображення

до зображення в градаціях сірого.

$$\text{Grayscale} = \text{Red} * 77 + \text{Green} * 150 + \text{Blue} * 29. \quad (4.2)$$

Наступний код демонструє перехід від кольорового зображення до зображення в градаціях сірого.

```

for ii := 0 to iHeight - 1 do
begin
    row := bBitmap.ScanLine[ii];
    for jj := 0 to iWidth - 1 do
begin
    aGrays[index] := ((row.rgbtRed * 77 + row.rgbtGreen * 150 +
row.rgbtBlue * 29) shr 8);
    inc(index);
    inc(row);
end;
end;
end;

```

Значення коефіцієнтів зумовлені властивостями людського зору і наступним копіюванням отриманого значення в усі три канали (R = G = B).

Створюємо бітове представлення зображення, задаємо вихідні параметри зображення та її бітової матриці:

```

bBitmap:=TBitmap.Create;
bBitmap:=BMP;
iWidth := bBitmap.Width;
iHeight := bBitmap.Height;
iSize := iWidth * iHeight;
bBitmap.PixelFormat:=pf24bit;
SetLength(aGrays, iSize);
SetLength(aIntegralIm, iSize);

```

```

bBitmap2 := TBitmap.Create;
bBitmap2.Canvas.Brush.Color := clWhite;
bBitmap2.Width := iWidth;
bBitmap2.Height := iHeight;
bBitmap2.PixelFormat := pf24bit;
bBitmap2.FreeImage;
bBitmap2.Canvas.FillRect(Rect(0, 0, bBitmap2.Width, bBitmap2.Height));
s := Round(iWidth / b);
s2 := Round(s / 2);
index := 0;

```

Далі область зображення розбивається на прямокутні області та розраховується поріг бінаризації в цій області.

```

for ii := 0 to iWidth - 1 do begin
    iSum := 0;
    for jj := 0 to iHeight - 1 do begin
        index := jj*iWidth+ii;
        iSum := iSum + aGrays[index];
        if ii = 0 then aIntegralIm[index] := iSum
        else aIntegralIm[index] := aIntegralIm[index - 1] + iSum;
    end;
end;
for jj := 0 to iHeight - 1 do begin
    row := bBitmap2.ScanLine[jj];
    for ii := 0 to iWidth - 1 do begin
        index := jj*iWidth+ii;
        iX1 := ii-s2;
        iX2 := ii+s2;
    end;
end;

```

```

iY1 := jj-s2;
iY2 := jj+s2;
if (iX1 < 0) then iX1 := 0;
  if (iX2 >= iWidth) then iX2 := iWidth-1;
    if (iY1 < 0) then iY1 := 0;
      if (iY2 >= iHeight) then iY2 := iHeight-1;
iCount := (iX2 - iX1) * (iY2 - iY1);
iSum := aIntegralIm[iY2*iWidth+iX2]
      - aIntegralIm[iY1*iWidth+iX2]
      - aIntegralIm[iY2*iWidth+iX1]
      + aIntegralIm[iY1*iWidth+iX1];
if (aGrays[index]*iCount) < (iSum * (100 - a) / 100) then row^ :=
black;

inc(row);
end;
end;

```

На рис. 4.4 показано метод адаптивної бінаризації в дії.

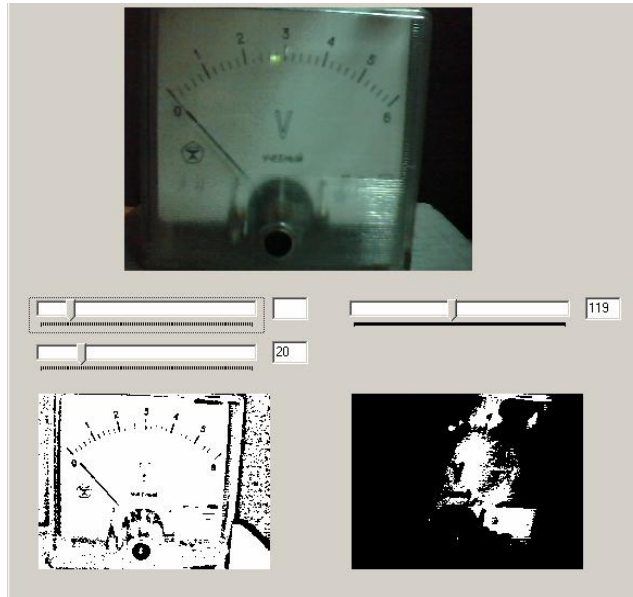


Рисунок 4.4 – Демонстрація роботи методу адаптивної бінаризації

Зверху оригінальне зображення приладу. Внизу форми зліва – зображення оброблене за допомогою методу адаптивної бінаризації. Внизу форми зліва – зображення оброблене за допомогою звичайної порогової бінаризації. На оригінальному зображенні приладу видно тінь, яка проходить маже вертикально, тому спостерігаємо такий результат у порогової бінаризації.

Медіанні фільтри досить часто застосовуються на практиці як засіб первинного оброблення цифрових зображень. Специфічною особливістю фільтрів є явно виражена вибірковість стосовно елементів масиву, що представляють собою немонотонну складову послідовності чисел у межах вікна (апертури) фільтра, що й різко виділяються на фоні сусідніх пікселів. У той же час на монотонну складову послідовності медіанний фільтр не діє, залишаючи її без змін. Завдяки цій особливості, медіанні фільтри при оптимально обраній апертурі можуть, наприклад, зберігати без викривлень різкі границі об'єктів, ефективно видаляючи некорельований або слабо корельований шум й малорозмірні деталі. Ця властивість дозволяє застосовувати медіанну фільтрацію для усунення викидів і імпульсних

перешкод. Характерною рисою медіанного фільтра є його нелінійність. У багатьох випадках застосування медіанного фільтра виявляється більш ефективним у порівнянні з лінійними фільтрами, оскільки процедури лінійного оброблення є оптимальними при рівномірному або гаусовому розподілі шуму, що в реальних зображеннях може бути далеко не так. У випадках, коли перепади значень великі в порівнянні з дисперсією адитивного білого шуму, медіанний фільтр дає менше значення середньоквадратичної похибки в порівнянні з оптимальними лінійними фільтрами. Особливо ефективним медіанний фільтр виявляється при очищенні сигналів від імпульсних шумів при обробленні зображень [30].

Частина коду демонструє доступ до кожного з 9 пікселів та сортування масиву *RvalueArray* при медіанній фільтрації:

```

RvalueArray[0] := p2[3 * (i - 1) + 2];
RvalueArray[1] := p2[3 * i + 2];
RvalueArray[2] := p2[3 * (i + 1) + 2];
RvalueArray[3] := p3[3 * (i - 1) + 2];
RvalueArray[4] := p3[3 * i + 2];
RvalueArray[5] := p3[3 * (i + 1) + 2];
RvalueArray[6] := p4[3 * (i - 1) + 2];
RvalueArray[7] := p4[3 * i + 2];
RvalueArray[8] := p4[3 * (i + 1) + 2];
SelectionSort(RvalueArray);

```

При скелетизації обчислюються точки центральної вісі *y* для перевірки на належність до об'єкта. Суть його полягає в побудові сферичної хвилі, радіус якої дорівнює ширині растрового об'єкта у вихідній точці. Побудова сферичної хвилі забезпечує ретельне відстеження контуру навіть при знаходженні розгалуження.

Виділивши вихідну точку на об'єкта, алгоритм генерує кола радіусом більшим ніж товщина об'єкта, використовуючи типовий алгоритм Брезенхема. Побудоване коло перетне границю об'єкта у двох точках. Далі проведемо через отримані точки пряму. Утворений трикутник радіусами кола та відрізком прямої буде рівнобедреним. За властивістю рівнобедреного трикутника, бісектриса кута, проведена до основи є висотою та медіаною, ділить відрізок прямої на дві рівні частини. Кожна точка з відрізків прямої буде центральною віссю об'єкта та з якого буде виходити чергова хвиля. Ітераційне генерування хвиль враховує збільшення або зменшення ширини, та розгалуження об'єкту.

Таким чином, даний алгоритм дозволить одержати координати точок центральної вісі. Отримані координати точок необхідні для векторного представлення растрових об'єктів.

У процесі роботи вдосконаленого хвильового методу скелетизації стрілок отримуємо такі дві прямі (рис. 4.5).

Ідея перетворення Хафа полягає в пошуку кривих, які проходять через достатню кількість точок інтересу. Параметри кривих утворюють фазовий простір, кожна точка якого відповідає деякій кривій. Через дискретність представлення вхідного зображення, потрібно перевести безперервний фазовий простір у дискретний. Для цього у фазовому просторі вводиться сітка, що розбиває його на комірки, кожна з яких відповідає набору кривих із близькими значеннями параметрів. Кожній комірці фазового простору можна поставити у відповідність число точок (лічильник), що вказує кількість точок інтересу на зображенні, що належать хоча б однієї із кривих, відповідно до даної комірки. Аналіз лічильників комірок дозволяє знайти на зображенні криві, яким належать найбільша кількість точок інтересу.

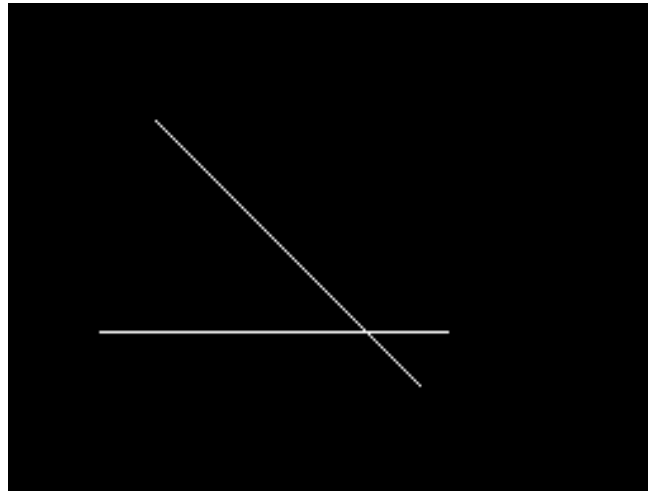


Рисунок 4.5 – Демонстрація вдосконаленого хвильового методу скелетизації

Наступний фрагмент коду демонструє роботу перетворення Хафа.

```
image4.Picture.Bitmap.Canvas.Draw(0, 0, image4.Picture.Bitmap);
```

```
findboarders := Checkbox2.checked;
```

```
bm := Tbitmap.create;
```

```
bm5 := Tbitmap.create;
```

```
bm.assign(image4.picture);
```

```
bm.PixelFormat := pf24bit;
```

```
scale := strtointdef(Edit2.text, 1);
```

```
Mscale := strtofloat(Edit3.text);
```

```
setlength(a, 360, max(bm.width, bm.height));
```

```
Reset(a);
```

```
Hough(bm, a);
```

```
bm.width := high(a) + 1;
```

```
bm.height := high(a[0]) + 1;
```

```
For i := 0 To high(a) Do
```

```
  For j := 0 To High(a[i]) Do
```

```
    Setpixel(bm, i, j, a[i, j], scale);
```

```
image6.picture.assign(bm);
```

```

Listbox1.items.clear;
maximum := getmaximum(a);
If checkbox1.checked Then Begin
    bm5.assign(image4.picture);
    bm5.canvas.pen.color := clBlue;
End
Else Begin
    bm5.width := image4.picture.width;
    bm5.height := image4.picture.height;
    With bm5.canvas Do Begin
        brush.color := clblack;
        rectangle(-1, -1, bm5.width + 1, bm5.height + 1);
        pen.color := clwhite;
    End;
End;
bm5.PixelFormat := pf24bit;
t := round(Mscale * Maximum);
memo1.Lines.Clear;
kilk:=0;
For i := 0 To high(a) Do
    For j := 0 To High(a[i]) Do
        If a[i, j] >= t Then Begin
            Listbox1.items.add('Angle:' + inttostr(i) + ' Radius:' + inttostr(j));
            memo1.Lines.Add(inttostr(i) + ' ' + inttostr(j));
            kilk:=kilk+1;
        End
    End
End

```


Else

DrawLine(bm5, i, j);

End;

У результаті виконання перетворення Хафа отримаємо координати прямих у фазовому просторі (рис. 4.6).

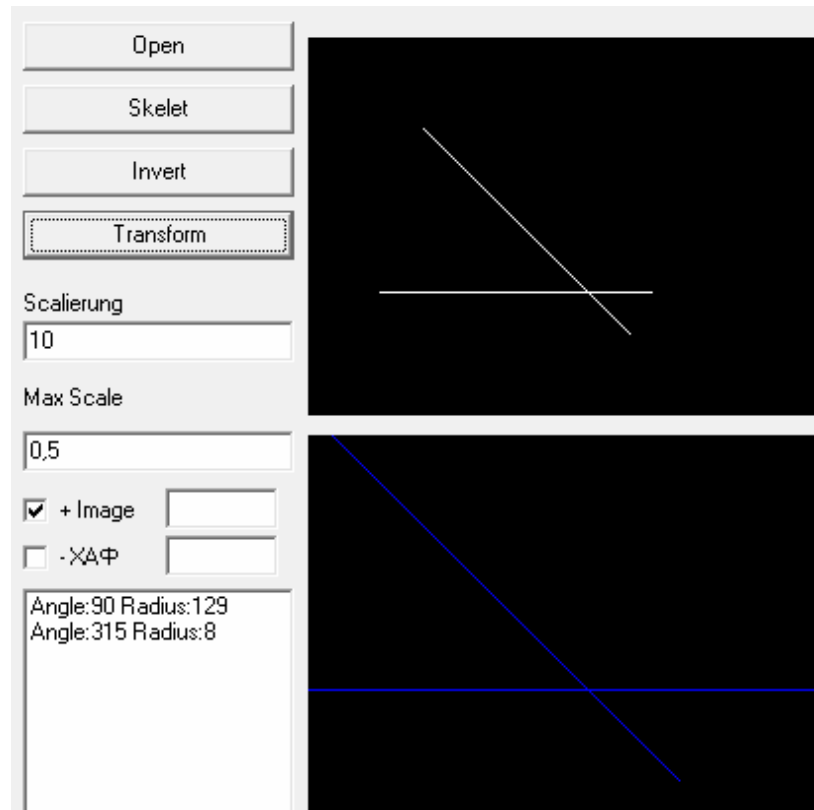


Рисунок 4.6 – Розпізнавання прямих за допомогою перетворення Хафа

На рис. 4.7 представлені прями у фазовому просторі, тобто у вигляді точок.

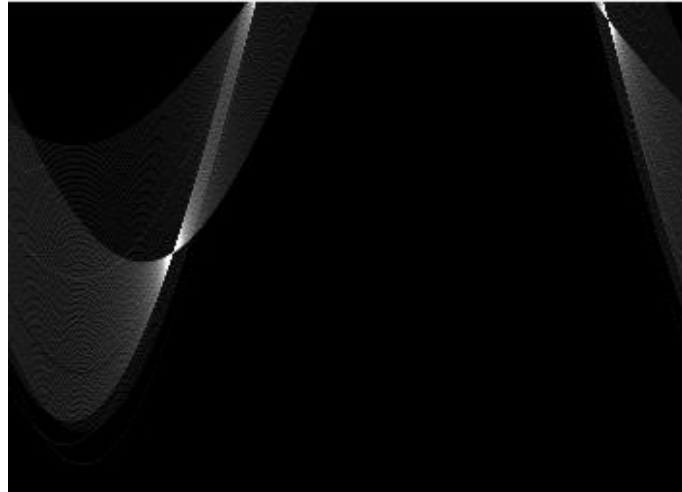


Рисунок 4.7 – Прямі в фазовому просторі

За формулами (3.1) та (3.2) розраховуємо координати прямих в Декартовій площині.

Далі потрібно визначити положення стрілок. Вздовж прямих в різних напрямках будуються точки на відстані не більшій чим половина довжини стрілки (змінна δ).

$$x1:=-\delta*\cos(kyt_2*\pi/180)+abs(x);$$

$$y1:=-\delta*\sin(kyt_2*\pi/180)+abs(y);$$

$$x2:=\delta*\cos(kyt_2*\pi/180)+abs(x);$$

$$y2:=\delta*\sin(kyt_2*\pi/180)+abs(y);$$

$$x3:=-\delta*\cos(kyt_1*\pi/180)+abs(x);$$

$$y3:=-\delta*\sin(kyt_1*\pi/180)+abs(y);$$

$$x4:=\delta*\cos(kyt_1*\pi/180)+abs(x);$$

$$y4:=\delta*\sin(kyt_1*\pi/180)+abs(y);$$

В околі цих точок перевіряється наявність пікселів, які належать стрілці приладу (червоні точки на рис. 4.8).

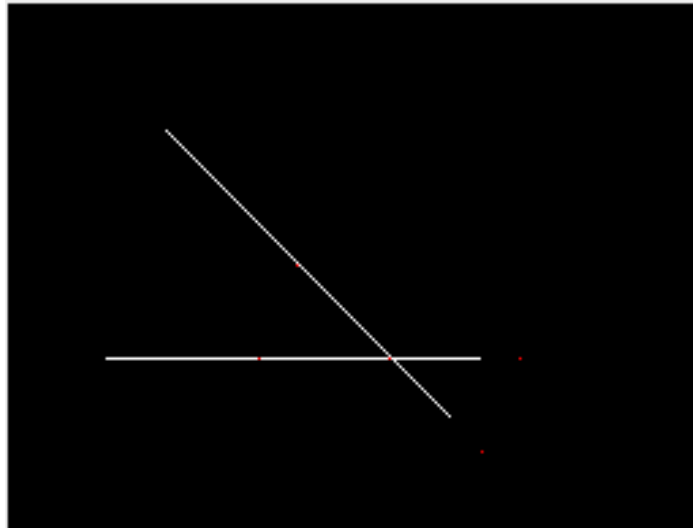


Рисунок 4.8 – Спосіб знаходження положення стрілок

В залежності від положення стрілок за формулою (3.16) розраховується кут відхилення стрілки, що демонструє наступна частина коду.

```

if (kyl_1 >= 0) and (kyl_2 >= 0)
    and (x1 >= (abs(x)-delta)) and (x1 <= abs(x))
    and (x3 >= (abs(x)-delta)) and (x3 <= abs(x))
    and (y1 >= (abs(y)-delta)) and (y1 <= abs(y))
    and (y3 >= (abs(y)-delta)) and (y3 <= abs(y))
    and (ax1 >= 3) and (ax3 >= 3)
then
    kyl := abs(abs(kyl_1) - abs(kyl_2))
else
if (kyl_1 < 0) and (kyl_2 <= 0)
    and (x1 >= (abs(x)-delta)) and (x1 <= abs(x))
    and (x3 >= (abs(x)-delta)) and (x3 <= abs(x))
    and (y1 >= abs(y)) and (y1 <= (abs(y)+delta))
    and (y3 >= abs(y)) and (y3 <= (abs(y)+delta))
    and (abs(x) > x1) and (abs(x) > x3)

```

and (ax1 >= 3) and (ax3 >= 3)

then

kyt := abs(abs(kyt_1) - abs(kyt_2))

else

if (kyt_1 < 0) and (kyt_2 >= 0)

and (x1 >= (abs(x) - delta)) and (x1 <= abs(x))

and (x3 >= (abs(x) - delta)) and (x3 <= abs(x))

and (y1 >= (abs(y) - delta)) and (y1 <= abs(y))

and (y3 >= abs(y)) and (y3 <= (abs(y) + delta))

and (abs(x) > x1) and (abs(x) > x3)

and (abs(y) > y1) and (abs(y) < y3)

and (ax1 >= 3) and (ax3 >= 3)

then

kyt := abs(kyt_1) + abs(kyt_2)

else

if (kyt_1 < 0) and (kyt_2 >= 0)

and (x3 >= (abs(x) - delta)) and (x3 <= abs(x))

and (x2 >= abs(x)) and (x2 <= (abs(x) + delta))

and (y2 >= abs(y)) and (y2 <= (abs(y) + delta))

and (y3 >= abs(y)) and (y3 <= (abs(y) + delta))

and (abs(x) > x3) and (abs(x) < x2)

and (ax2 >= 3) and (ax3 >= 3)

then

kyt := 180 + abs(kyt_1) + abs(kyt_2)

else

if (kyt_1 < 0) and (kyt_2 >= 0)

and (x1 >= (abs(x) - delta)) and (x1 <= abs(x))

$and (x4 \geq abs(x)) \ and (x4 \leq (abs(x) + delta))$
 $and (y1 \leq abs(y)) \ and (y1 \geq (abs(y) - delta))$
 $and (y4 \leq abs(y)) \ and (y4 \geq (abs(y) - delta))$
 $and (abs(x) > x1) \ and (abs(x) < x4)$
 $and (abs(y) > y1) \ and (abs(y) > y4)$
 $and (ax1 \geq 3) \ and (ax4 \geq 3)$

then

$kyt := abs(180 - (abs(kyt_1) + abs(kyt_2)))$

else

$if (kyt_1 < 0) \ and (kyt_2 < 0)$

$and (x1 \geq (abs(x) - delta)) \ and (x1 \leq abs(x))$
 $and (y1 \geq abs(y)) \ and (y1 \leq (abs(y) + delta))$
 $and (x4 \geq abs(x)) \ and (x4 \leq (abs(x) + delta))$
 $and (y4 \leq abs(y)) \ and (y4 \geq (abs(y) - delta))$
 $and (x1 < x4) \ and (y1 > y4)$
 $and (ax1 \geq 3) \ and (ax4 \geq 3)$

then

$kyt := abs(180 - abs(kyt_1) + abs(kyt_2))$

else

$if (kyt_1 < 0) \ and (kyt_2 < 0)$

$and (x3 \geq (abs(x) - delta)) \ and (x3 \leq abs(x))$
 $and (y3 \geq abs(y)) \ and (y3 \leq (abs(y) + delta))$
 $and (x2 \geq abs(x)) \ and (x2 \leq (abs(x) + delta))$
 $and (y2 \leq abs(y)) \ and (y2 \geq (abs(y) - delta))$
 $and (x3 < x2)$
 $and (ax2 \geq 3) \ and (ax3 \geq 3)$

then

$$kyl:=abs(180+abs(kyl_1)-abs(kyl_2));$$

Потім кут відхилення стрілки перетворюється у вимірне значення. Отримані масиви розпізнаних значень приладу та час, в який була зроблена фотографія зберігаються в БД. Для цього використовується найпоширеніша СУБД MS Access, що входить до комплексу програм MS Office.

4.3 Синтез структури бази даних комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

Призначення БД у складі засобів комп'ютерної системи полягає в забезпеченні збереження інформації про номінальні дані кожного вимірювального приладу, результатів вимірів та розрахунків статичних та динамічних характеристик кожного приладу. Також додана можливість виконання запитів, що дозволяє здійснювати пошук приладів, значення яких були розпізнані в процесі оброблення цифрових зображень.

В процесі моделювання у вигляді ER-діаграм було створено структуру таблиць бази даних комп'ютерної системи.

Модель повинна бути ефективною, тобто мати мінімальне дублювання даних. Це буде зручним при їх обробленні і оновленні. Мінімальне дублювання даних здійснюється за допомогою методу нормалізації відношень.

Нормалізації зводиться до отримання такого варіанту структури БД, в якому кожен факт з'являється лише в одному місці, тобто виключена надмірність інформації. Це робиться не стільки з метою економії пам'яті, скільки для виключення можливої суперечності даних, що зберігаються.

Основні таблиці в сукупності зі своїми зв'язками відповідають третій нормальній формі.

БД складається з 5 таблиць, які представлені на рис. 4.9.

У таблиці "Характеристик приладу" зберігаються дані про прилад, які складаються з таких полів: *серійний номер*, *дата*, *виробник*, *тип шкали*. Ключове поле *серійний номер* таблиці "Характеристик приладу" поєднане з аналогічними полями таблиць "Динамічні характеристики" та "Статичні характеристики" зв'язком "один-до-одного". Ключове поле *серійний номер* таблиці "Динамічні характеристики" зв'язано з цим же полем таблиці "Дані для дослідження динамічних характеристик" зв'язком "один-до-багатьох".

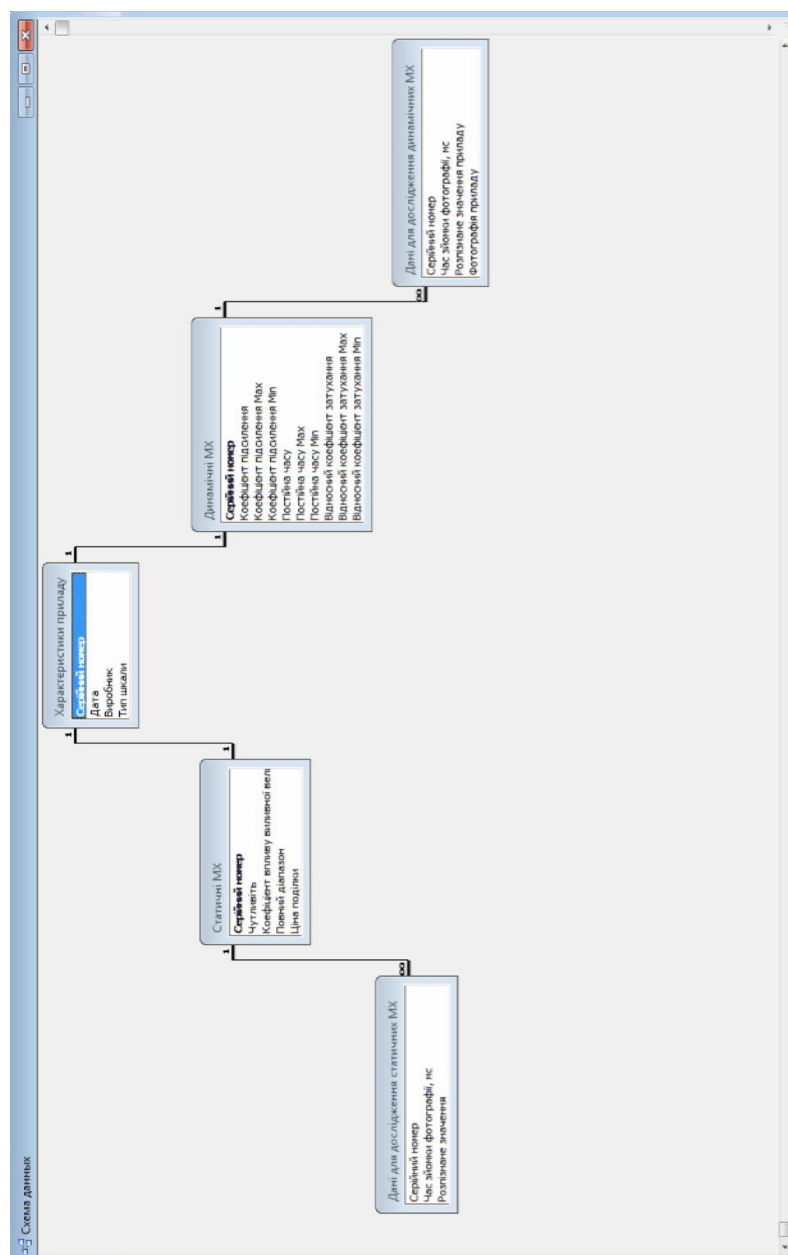


Рисунок 4.9 – Структура розробленої БД

Таблиця "Динамічні характеристики" містить розраховані динамічні характеристики: коефіцієнтом підсилення коливальної ланки, постійна часу коливальної ланки та відносний коефіцієнт затухання коливальної ланки (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Форма бази даних для перегляду динамічних характеристик

Таблиця "Дані для дослідження динамічних характеристик" містить інформацію про час, коли була зроблена фотографія приладу, розпізнане значення стрілочного вимірювального приладу та цифрове зображення приладу (рис. 4.8).



Рисунок 4.11 – Форма для відображення динамічних характеристик

Для пошуку необхідних даних використовується запит на вибірку, який враховує серійний номер, дату, виробника, тип шкали.

По аналогії все це зроблено для таблиць "Статичні характеристики" та "Дані для дослідження статичних характеристик".

4.4 Висновки до розділу

1. Сформовані вимоги до компонентів комп'ютерної системи випробувань стрілочних вимірювальних індикаторів, розроблене апаратне, алгоритмічне та програмне забезпечення системи.

2. Синтезована структура бази даних, яка забезпечує зберігання та пошук даних, відповідає третій нормальній формі, що виключає можливі суперечності даних.

3. Запропонована структурна схема комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів, яка дозволяє керувати випробувальним сигналом за рахунок використання генератора

випробувальних сигналів.

4. Запропонований метод можна застосовувати у складі системи відеомоніторингу для реалізації розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів та визначення їх статичних та динамічних характеристик.

5. В процесі розробки програмного засобу використано клас *TBitmap* для оброблення зображення в оперативній пам'яті комп'ютера та функцію *ScanLine* дозволяє зменшити час на оброблення зображення та підвищити швидкодію роботи.

Висновки

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове розв'язання актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає у розвитку комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів. У результаті проведеного теоретичного аналізу сучасних поглядів на дану проблему в літературних та інтернет-джерелах і виконаних досліджень сформульовані та обґрунтовані такі наукові висновки і практичні результати:

1. Велика кількість стрілочних вимірювальних приладів, які проходять випробування, висока трудоемність його виконання та відсутність ефективного комп'ютеризованого обладнання для контролю обґрунтовує актуальність розробки комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Таким чином, розробка комп'ютерної системи є актуальною теоретичною і прикладною задачею.

2. Вперше розроблено комп'ютерну систему для випробувань стрілочних вимірювальних приладів, яка, на відміну від існуючих, працює в статичному та динамічному режимах роботи, що дозволяє використовувати даний метод при випробуваннях. Абсолютна та відносна статичні похибки дорівнюють $\Delta_{\text{стат}} = 0,01$ В та $\delta_{\text{стат}} = 0,17\%$ відповідно, та абсолютна та відносна динамічні похибки дорівнюють $\Delta_{\text{дин}} = 0,04$ В та $\delta_{\text{дин}} = 3,2\%$ відповідно, що дає можливість використовувати дану комп'ютерну систему для випробувань стрілочних вимірювальних приладів з класом точності не менше ніж 0,05;

3. Вперше розроблено метод адаптивної бінаризації, який відрізняється від існуючих тим, що він побудований на основі представлення зображення як інтегрального, що дозволяє підвищити швидкодію його роботи та забезпечує стійкість до шуму на зображенні (нерівномірність

освітлення);

4. Удосконалено хвильовий метод скелетизації бінарних зображень, що дозволяє підвищити якість розпізнавання стрілки за рахунок використання концентрованих кіл, центри яких будуються по центральній вісі об'єкта та є координатами скелетизованого об'єкта, що легко апроксимуються у пряму.

5. Отримані у дисертаційній роботі результати впроваджені на ПАТ "Уманський завод "Мегомметр" при проведенні приймально-здавальних випробувань відділом технічного контролю у процесі виготовлення стрілочних вимірювальних приладів, що дозволило зменшити час та підвищити точність, достовірність проведення приймально-здавальних випробувань. Це дозволило в середньому на 15% зменшити час та автоматизувати процес випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

Перелік використаних джерел

1. Zhang T.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / Zhang T.Y., Suen C.Y. // Comm. ACM. - 1984. - № 3. - P.236-239.
2. Bernsen. J Dynamic Thresholding of Grey-Level Images / Bernsen. J // Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition. - 1986.
3. Crow F. Summed-area tables for texture mapping / Crow F. // SIGGRAPH. - 1984. - P.207-212.
4. Dori D. Orthogonal Zig-Zag: An algorithm for vectorizing engineering drawings compared with Hough transform / Dori D. // Advances in software engineering. 1997. Vol. 28. № 1. P. 11-24.
5. Dori D. Sparse pixel vectorization: An algorithm and its performance evaluation / Dori D., Liu W. // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999. Vol. 21. № 3. P. 202-215.
6. Glasbey C.A. An analysis of histogram-based thresholding algorithms / Glasbey C.A. // CVGIP: Graphical Models and Image Processing. – 1993. – № 55. – PP. 532–537.
7. Hilditch C.J. Linear Skeletons from Square Cupboards / Hilditch C.J. // Machine Intelligence. – No. 4, 1969, pp. 403-420.
8. LabView. Практикум: задачи. Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации. Режим доступа: <http://www.automationlabs.ru/images/Practicum/pribor.pdf>.
9. Huang L.K. Image thresholding by minimizing the measure of fuzziness / Huang L.K., Wang M.J.J. // Pattern Recognition. – 1995. – № 28 (1). – PP. 41–51.

10. Jianbo Shi and Carlo Tomasi, Good features to track, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94) (Seattle), June 1994.
11. Kapur J.N., Sahoo P.K. and Wong A.K.C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1985. – № 29. – PP. 273–285.
12. Niblack W. An introduction to digital image processing / Niblack W. // Englewood Cliffs Prentice Hall, N.J. - 1986. - P.115-116.
13. O. Hori and S. Tanigawa, "Raster-to-vector conversion by line fitting based on contours and skeletons", Proc. of ICDAR93, Tsukuba, Japan, pp 623-626, 1993.
14. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber 9. - P.62-66.
15. Otsu N. A thresholding selection method from graylevel histogram / Otsu N. // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – № 9. – PP. 62–66.
16. Pratt W. K. Digital Image Processing / W. K. Pratt. – New York : John Wiley & Sons, 1991. – 808 p.
17. Prewitt J.M.S. and Mendelsohn M. L. The analysis of cell images // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1966. – № 128. – PP. 1035–1053.
18. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / Viola P., Jones M. // In IEEE Computer Vision and Pattern Recognition . - 2001. - P.511-518.
19. Ridler T.W. and Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1978. – № 8. – PP. 630–632.

20. Roman Lishchuk Adaptive binarization with non-uniform image illumination / Roman Lishchuk, Volodymyr Kucheruk, Igor Piotr Kurytnik // *Pomiary automatyka Robotyka*. - 2014. - №6. - P.72-75.
21. Sezgin M. and Sankur B. Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation // *Journal of Electronic Imaging*. – 2004. – № 13 (1). – PP. 146–165.
22. Sklansky J., Gonzalez V. Fast Polygonal Approximation of Digitized Curves // *Pattern Recognition*, 1980. Vol.12. P. 327-331.
23. Tsai W. Moment-preserving thresholding: a new approach // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. – 1985. – № 29. – PP. 377–393.
24. Dufournaud Y., Schmid C., Horaud R. P., "Matching images with different resolutions" in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Hilton Head Island, South Carolina, USA. IEEE Computer Society Press, June 2000, pp. 612–618.
25. Yen J.C., Chang F.J., Chang S. A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding // *IEEE Trans. on Image Processing*. – 1995. – № 4 (3). – PP. 370–378.
26. Дегтярева А., Вежневек В. "Преобразование Хафа", *Онлайн журнал "Графика и Мультимедиа"*. Выпуск №1(2)/2003.
27. Дегтярева А., Вежневек В. "Line fitting, или методы аппроксимации набора точек прямой". *Компьютерная графика и мультимедиа*. Выпуск №1(3)/2003.
28. А. с. 1383242 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов и устройство для его осуществления / Ю.Г. Свинолулов, В.П. Войтко, Н.М. Степаненко, Д.Л. Удут. *Опубл. Б.И.* 1986, №11.

29. А.с. 1377792 Способ определения градуировочной характеристики электромагнитного измерительного механизма/ В. А. Мишин. Оpubл. в Б.И., 1988, №8.
30. А.с. 1422198 Устройство для автоматической поверки стрелочных электроизмерительных приборов / В.Н. Чинков, Ю.А. Стеценко, И.Ю. Курганцев. Оpubл. Б.И. 1988, №35.
31. А.с. 1599818 Способ автоматической поверки измерительных приборов / С.К. Киселев, В.А. Мишин, Г.В. Медведев. Оpubл. 15.10.1990.
32. А.с. 1739328 Устройство для автоматической поверки стрелочных измерительных приборов / С.К. Киселев, В.А. Мишин. Оpubл. Б.И. 1992, №21.
33. Астола Я., Хаависто П., Неуво Ю. Векторные медианные фильтры //ТИИЭР, т. 78. 1990, №4.
34. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Зарубежная радиоэлектроника. -1987, №10.-с. 6-24.
35. Безикович А .Я., Прицкер В.И., Эскин С.П. Автоматизация поверки электроизмерительных приборов. Л.: Энергия. 1976.- 216 с.
36. Безикович А .Я., Прицкер В.И., Эскин С.П. О поверке показывающих приборов в динамическом режиме. // Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии. Вып. 130 (190). М.-Л.: Изд-во стандартов, 172, с. 167-176.
37. Бейтс Р., МакДоннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. - 502 с.
38. Волегов Д. Б., Юрін Д. В. Зчитування показань стрілочного приладу за допомогою web-камери // ГрафіКон2008. М., 2008. С. 242-247.

39. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
40. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB/ Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. –М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
41. Горлач А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – К. : Техніка, 1985. – 325 с.
42. ГОСТ 5365-83. Приборы электроизмерительные. Циферблаты и шкалы. Общие технические требования.
43. ГОСТ 8.401-80 Классы точности средств измерений. Общие требования: основополагающие стандарты в области метрологии М.: Изд-во стандартов, 1986. - 216 с.
44. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции / УГГУ, ИГиГ, кафедра геоинформатики. - Екатеринбург, 2007.
45. ДСТУ 2681-94. Державний стандарт України. Метрологія. Терміни та визначення. - Київ, 1994. - 67с.
46. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7/7 SP1 + Simulink 5/6. Работа с изображениями и видеопотоками / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 400 с.
47. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика / В. П. Дьяконов. – М. : Нолидж. – 2000. – 1296 с.
48. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – Спб. : Питер, 2001. – 480 с.
49. Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения. М.: Изд-во МАИ, 2001.- 164 с.

50. Киселев С. К. Система автоматизации поверки электроизмерительных приборов // Датчики и системы. - 2003. - №6. - С.33-37.
51. Киселев С. К. Способы автоматической поверки стрелочных электроизмерительных приборов в динамических режимах: 1999 // Автореферат диссертации 05.11.05. - Мiсто.
52. Киселев С.К., Грачева Н.О. Оценка качества автоматизированной поверки средств измерений. // Вестник УлГТУ. Ульяновск, 2002, №3. - с. 4-8.
53. Киселев С.К., Мишин В.А., Романова Е.В. Автоматизация поверки стрелочных электроизмерительных приборов с профильными шкалами. - Приборы. 2004 г. №8. - с. 43-50.
54. Клубков И.М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения // Вестник ДГТУ. Т. 1. - 2001. - № 1 (7) . - С.126-133.
55. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т.3. Сортировка и поиск/ Кнут Д. М.: Мир, 1978. 44 с.
56. Крылов А.Б. Способ выбора растровых объектов на монохромном изображении с автоматическим вычислением геометрических параметров: сборник статей Интеллектуальные технологии и системы - Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э.Баумана 2001. Вып.5 С.34-42.
57. Кучеренко К.И., Очин Е.Ф. Двумерные медианные фильтры для обработки изображений // Зарубежная радиоэлектроника. 1986, №6. - с.50-61.
58. Лайонс, Ричард. Цифровая обработка сигналов [Текст] / Ричард Лайонс; пер. с англ., под ред. А.А. Бритова. – 2-е изд. – М.: БИНОМ–Пресс, 2007. – 653 с.

59. Ліщук Р.І. Застосування методу ланцюгового кодування контуру для класифікації плямоподібних зображень / Кормановський С.І., Кучерук В.Ю., Ліщук Р.І. // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів, X Всеукраїнська міжнародна конференція УкрОбраз 2010, м Київ, 2010. - с. 129-132.
60. Ліщук Р.І. Використання медіанного фільтра для видалення шумів в процесі обробки зображень // Європейський університет. Інформаційні технології та комп'ютерні системи на шляху до інформаційного суспільства. Збірник матеріалів III Міжвузівської науково-практичної конференції, Умань, 2010. - 38-41 с.
61. Ліщук Р.І. Інформаційні технології обробки динамічно змінюваної візуальної інформації аналогових вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю., С.І. Кормановський // Тези доповідей I-й Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2011)- Вінниця, 2011. – с. 38.
62. Ліщук Р.І. Метод адаптивної бінаризації з нерівномірним освітленням зображення / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вісник інженерної академії України. - Київ , 2013. - С.53-55.
63. Ліщук Р.І. Метод розпізнавання значень зі шкал стрілочних вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - м. Хмельницький, 2014. - С.22-27.
64. Ліщук Р.І. Модифікований хвильовий метод скелетизації зображень / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вісник інженерної академії України. - Київ , 2014. - С.73-77.

65. Ліщук Р.І. Спосіб автоматизованого розпізнавання показів значень зі шкал стрілочних вимірювальних приладів // Патент України на корисну модель № 84801 G06K 9/58, G01R 35/00 – u 2013 11108, опубл. 25.10.2013, бюл. № 20.
66. Ліщук Р.І. Визначення динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вісник інженерної академії України. - Київ, 2015. №4. - С. 175-179.
67. Ліщук Р.І. Автоматизація процесу повірки аналогових вимірювальних приладів / Кучерук В.Ю., Кормановський С.І., Ліщук Р.І. // Збірник тез доповідей десятої міжнародної науково-технічної конференції "Контроль і управління в складних системах", Вінниця, 2010. – с. 88.
68. Ліщук Р.І. Метод адаптивної бінарizaції з нерівномірним освітленням зображення / Кучерук В.Ю., Ліщук Р.І. // VI International Conference On Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2012", Vinnytsia, 2012. – с. 30.
69. Ліщук Р.І. Автоматизація процесу розпізнавання показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Тези доповідей II-ї міжнародної конференції "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах" (ВКДТС-2013), м. Вінниця, 2013 р., с. 287.
70. Ліщук Р.І. Автоматизація процесу визначення динамічних метрологічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Тези доповідей III-ї Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2015) - Вінниця, 2015. - с. 14-15.

71. Методы и средства определения метрологических характеристик измерительных информационных систем. Сб. науч. трудов. Львов, ВНИИИУС, 1990. - 128 с.
72. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
73. Мишин В. А. Теория, разработка и исследование стрелочных электроизмерительных приборов как активных объектов автоматизации производства на этапах регулирования и контроля. Диссертация. д. т. н. по специальности 05.11.05 Ульяновск, 1987 - 466 с.
74. Немченко Т. А. Использование процедуры "скелетизации" для выделения линий на спутниковых изображениях / Немченко Т.А., Ляпун Е.А., Захаров М.Ю., Крашенинникова Ю.С., Флитман Е.В. // Исследование Земли и космоса. - 1994. - № 6. - С.43-50.
75. Новиков Ю.Л. Эффективные алгоритмы векторизации растровых изображений и их реализация в геоинформационной системе: автореф. дис. канд. техн. наук. М., 2002 С.20
76. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер // М.: Связь. — 1979. — 416 с.
77. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В.; ВНТУ. - Вінниця , 2012. - 522с.
78. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений: Пер.с англ. -М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
79. Парижский С. М. Delphi. Учимся на примерах / Парижский С. М. – К.: «МК-Пресс», 2005. – 216 с.

80. Патент 2054689 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов / С.К. Киселев, Л.В. Федотов, В.А. Мишин. Оpubл. Б.И. 1996, №5.
81. Патент №2152047 Способ и устройство для автоматической поверки стрелочных измерительных приборов / С.К. Киселев, Н.О. Грачева, Е.В. Романова. Оpubл. Б.И. 2000, № 18.
82. Патент РФ 2007740 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов. / С.К. Киселев, В.А. Мишин Оpubл. Б.И. 1994, №3.
83. Патент РФ 2035746 Способ автоматического считывания показаний со шкал стрелочных измерительных приборов при их поверке / С.К. Киселев, В.А. Мишин. Оpubл. Б.И. 1995, №14.
84. Плотникова С.Б., Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н. Автоматизированный контроль характеристик специализированного измерительного прибора. / Тез. докл. Четвертой научно- практической конференции "Неразрушающие методы контроля на службе повышения качества продукции и экономии ресурсов", Томск, 1989г.
85. Пол. реш. на заявку N4845941/21-071153 от 28.06.90 Способ автоматической поверки стрелочных измерительных приборов/ Свинолулов Ю.Г., Плотникова Т.Б., Удут Д.Л., Седов Э.Н.
86. Потемкин В. Г. Вычисления в среде MATLAB / В. Г. Потемкин. – М. : ДИАЛОГ–МИФИ, 2004. – 496 с.
87. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / Прэтт У. // М.: Мир, 1982. – Т.1 – 280 с.
88. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / Прэтт У. // М.: Мир, 1982. – Т.2. – 160 с.

89. Рудаков П. И. Обработка сигналов изображений. MATLAB 5x / П. И. Рудаков, В. И. Сафонов. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 425 с.
90. Свинолулов Ю. Г. Аппаратно-программный комплекс для поверки стрелочных измерительных приборов: Тез. доклада Второго Всесоюзного совещания по точным методам измерения напряжения, тока и мощности / Свинолулов Ю. Г., Войтко В. П., Удут Д. Л. - Санкт-Петербург, 1986. - 65-67с.
91. Свинолулов Ю.Г. Автоматизированные установки для поверки и градуировки стрелочных приборов / Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н. // ПСУ. - 1995. - № 2. - С.30-34.
92. Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н. Автоматизированные установки для поверки и градуировки стрелочных приборов. // ПСУ, 1995. N2, с. 30-34.
93. Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н. Оптимальное формирование тестового сигнала при автомагической поверке стрелочных электроизмерительных приборов. / Тез. докл. Третьей Международной конференции "ИКАПП-94", Барнаул, 1994г., Том 1, часть 2, с.133
94. Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н., Автоматизированный измерительный комплекс для поверки приборов ПЗ21М./ Тез. докл. Всесоюзной конференции "ИКААП-91", Барнаул, 1991г., с.43.
95. Свинолулов Ю.Г., Седов Э.Н., ИИС для поверки стрелочных измерителей тока. / Тез. докл. конференции "ИИС-94", Москва,1994г., с.127.
96. Седов Э.Н. Устройство предварительной обработки и ввода изображения в ЭВМ.//ПСУ, 1994. N8.

97. Сергеенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст]: учебник для вузов / А.Б. Сергеенко. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 751 с.
98. Сойфер В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы / [В. А. Сойфер] // Соросовский образовательный журнал, 1996. – № 3. – С. 110–121.
99. Удут Д.Л. Автоматизированные компьютерные комплексы для поверки и контроля качества стрелочных измерительных приборов. Автореферат диссертации . кандидата технических наук по специальности 05.11.05. – Томск, 1992.
100. Удут Д.Л. Проблемы поверки стрелочных измерительных приборов / «Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов ИКПП-91»: тезисы докладов всесоюзной конференции. 4.1. Барнаул. 1991 -с. 85-86.
101. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход, - Москва: Вильямс, 2004 - 928 с.
102. Хомоненко А. Д. Delphi7 / А. Д. Хомоненко. – СПб. : БХВ–Петербург, 2007. – 1216 с.
103. Хуанг Т.С. и др. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. – М.: Радио и связь, – 1984. – 224 с.
104. Шакиров И.В., Гренке В.В. , Светлаков А.А. Классификация вейвлет-преобразования // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления. Всеросс. науч.-практич. конф., посвященной 40-летию ТУСУР. 2-4 октября 2002 г., Томск. – Т. 1. – С. 198-199
105. Шлихт Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений / Г. Ю. Шлихт. – М. : Эком, 1997. – 336 с.

106. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Яне Б. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
107. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображения / Ярославский Л. П. – М. : Сов.радио, 1979. – 312 с.

ДОДАТОК А

ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ

ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

СТРІЛОЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер – перший
заступник голови правління
ПІАТ «Уманський завод «Мегомметр»
О.І. Серета
_____ 2013 р.



АКТ д

впровадження програмного забезпечення для визначення
статичних та динамічних характеристик стрілочних вимірювальних
приладів

Комісія у складі:

заст. начальника ВТК О.В. Сіжука,
головного метролога В.В. Ласунова,
заст. головного конструктора Р.А. Колісниченка,
начальника КБСВ ВГК І.О. Поліщук,
інженера-конструктора ВГК О.І. Самойленка,

розглянула та проаналізувала розроблену у дисертаційній роботі
Ліщука Романа Ігоровича інформаційну технологію перевірки стрілочних
вимірювальних приладів.

Основні результати дисертаційної роботи виражені у розробці
алгоритмічного та програмного забезпечення для визначення статичних та
динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, які
впровадженні при проведенні приймально-здавальних випробувань відділом
технічного контролю у процесі виготовлення стрілочних вимірювальних
приладів.

Науково-технічний ефект від впровадження наукових положень та
висновків розглянутої дисертаційної роботи полягає в наступному:

- підвищення точності та достовірності проведення приймально-здавальних випробувань;
- зменшення до 15% часу проведення приймально-здавальних випробувань.

Члени комісії:

Заст. начальника ВТК

О.В. Сіжук

Головний метролог

В.В. Ласунов

Заст. головного конструктора

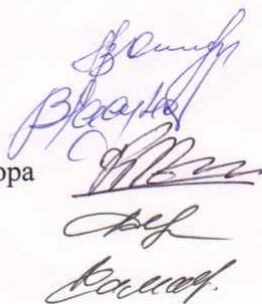
Р.А. Колісниченко

Начальник КБСВ ВГК

І.О. Поліщук

Інженер-конструктор ВГК

О.І. Самойленко



ДОДАТОК Б
ФОТОГРАФІЯ РОБОЧОГО МІСЦЯ ПРИ
КОНТРОЛЬНО-ЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

