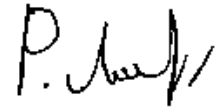


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

ЛІЩУК РОМАН ІГОРОВИЧ



УДК 004.93

**КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ СТРІЛОЧНИХ  
ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Кучерук** Володимир Юрійович,  
завідувач кафедри метрології та промислової  
автоматики Вінницького національного  
технічного університету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Квасніков** Володимир Павлович,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих  
електротехнічних систем та технологій  
Національного авіаційного університету;

доктор технічних наук, доцент  
**Наконечний** Маркіян Володимирович,  
доцент кафедри комп'ютеризованих систем  
автоматики інституту комп'ютерних  
технологій, автоматики та метрології  
Національного університету "Львівська  
політехніка".

Захист відбудеться 27 травня 2016 р. о 14.<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 711 V навчального корпусу).

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

Автореферат розісланий 22 квітня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради д.т.н, проф.



Я. Луцик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

З метою зниження собівартості продукції та підвищення її якості необхідно переходити на автоматизовані технології виробництва, контролю, зокрема, автоматизації приймально-здавальних випробувань. Розв'язання задачі підвищення рівня автоматизації виробництва стрілочних приладів передбачає розробку й впровадження гнучких комп'ютерних систем випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

Системи автоматизації активно впроваджуються в технологічні процеси різних підприємств і, найчастіше, керуючі пульти обладнані різноманітними стрілочними приладами, які дозволяють оператору стежити за станом технологічного процесу. Однак, виникає ситуація, коли відсутня можливість або економічно недоцільним є втручання в технологічний процес, а дублювання або заміна оператора автоматикою необхідні.

Дослідження в галузі автоматизації перевірки стрілочних вимірювальних приладів проводяться в Україні й за кордоном понад 30 років, є численні публікації й авторські свідоцтва.

Однак, актуальною 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. Виникає потреба в розробці методів і засобів оптичного зчитування та визначення статичних і динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів, що дозволить підвищити точність вимірювань та знизити часові і трудові витрати.

**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 дисертаційного дослідження є підвищенні точності визначення і зменшення часу випробувань стрілочних вимірювальних приладів у статичному та динамічному режимах роботи на основі оброблення їх 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 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.** Для реалізації завдань дисертаційного дослідження використано системний 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 використання 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 керування 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. ) у ПАТ "Уманський завод "Мегомметр" при проведенні приймально-здавальних випробувань відділом технічного контролю у процесі виготовлення 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 тез доповідей у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних

джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 139 сторінок, у тому числі 124 сторінки основного тексту, 58 рисунків, 3 таблиць, список використаних джерел зі 107 найменуваннями та 2 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено актуальність теми дисертаційного дослідження, його мету та задачі, наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Представлено інформацію щодо публікацій та особистий внесок здобувача, відомості про апробацію та впровадження результатів роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасні комп'ютерні системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів та встановлені вимоги до них. У роботі проаналізовано відомі методи і засоби цифрової обробки зображень, які покладено в основу побудови комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів. Встановлено, що для підвищення точності визначення та зменшення часу випробувань стрілочних вимірювальних приладів у статичному та динамічному режимах роботи необхідною є розробка нових комп'ютерних систем оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів з використанням нових швидкодіючих методів та алгоритмів обробки цифрових зображень.

У другому розділі розроблено структурну схему оптичного зчитування показів зі шкал стрілочних вимірювальних приладів, яка включає в себе апаратне та програмне забезпечення (рис. 1).

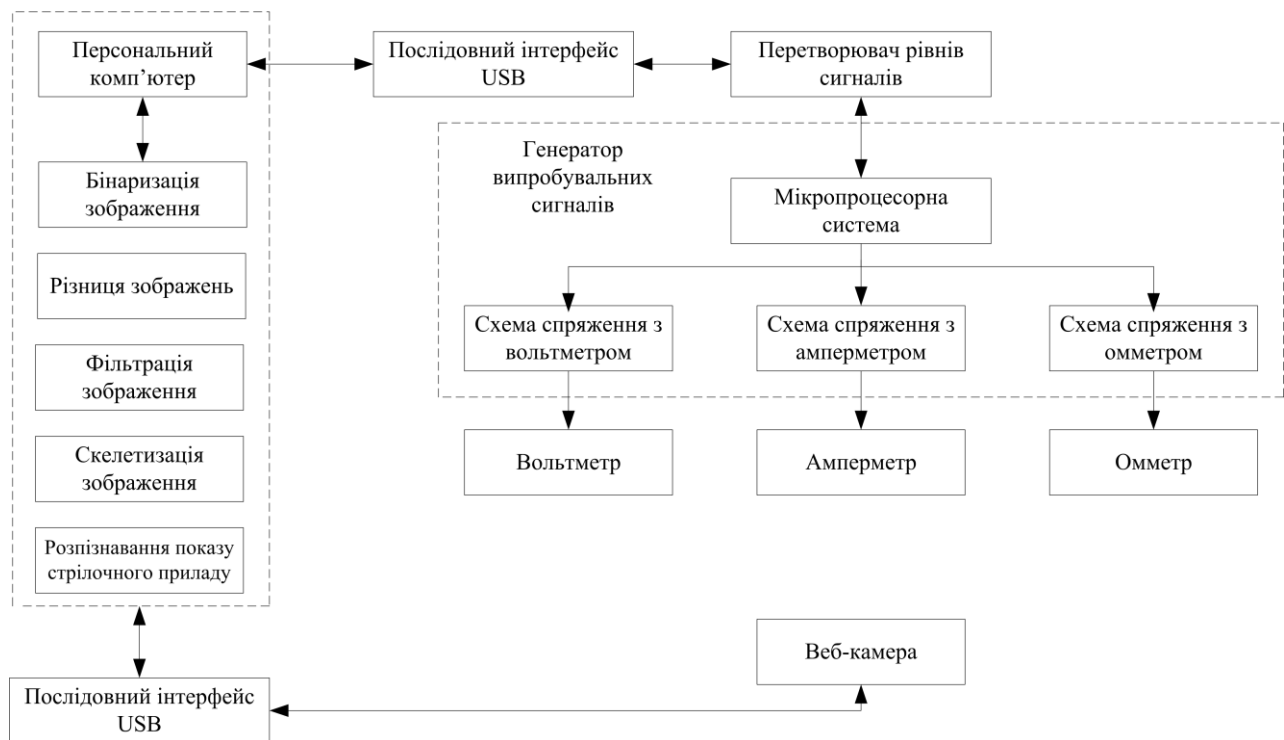


Рисунок 1 – Структурна схема комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів

Запропонована схема складається з веб-камери, що направлена на стрілочний вимірювальний прилад, персонального компютера з програмним

забезпечення та генератора випробувальних сигналів. Програмне забезпечення містить модулі: бінаризація зображення, фільтрація зображення, скелетизація зображення і розпізнавання показу стрілочного приладу.

Розроблений 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 пропонується використовувати веб-камеру з роздільною здатністю 640x480 пікселів та частотою до 30 кадрів за секунду. Отримане зображення має 24 бітну RGB модель, що потребує бінаризації для подальшого оброблення.

З метою знаходження кута відхилення стрілки, фотографується позиція стрілки приладу в початковому та у конкретному значеннях. В подальшому ці зображення бінаризують.

Зображення, що обробляється, за допомогою алгоритму бінаризації, представимо у вигляді інтегрального. Інтегральне зображення може бути використане при наявності функції  $f(x, y)$ , що характеризує залежність між пікселями і дійсними числами (наприклад, яскравість пікселів), та необхідністю визначити суму цієї функції на певних ділянках зображення.

Інтегральне представлення зображення - це матриця розмірності якої збігається з розмірністю вихідного зображення. Елементи матриці розраховуються за наступною формулою

$$I(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq x, j \leq y} I(i, j), \quad (1)$$

де,  $I(i, j)$  – яскравість пікселя вихідного зображення.

Кожний елемент матриці  $I(x, y)$  – це сума пікселів прямокутника від  $(0, 0)$  до  $(x, y)$ , а їх розрахунок проводиться за наступною формулою

$$I(x, y) = I(x, y) - I(x - 1, y - 1) + I(x, y - 1) + I(x - 1, y). \quad (2)$$

Відповідно до формули (2) всі компоненти для розрахунку зберігаються в інтегральній матриці.

Для розрахунку інтегрального зображення, необхідно зберігати число  $I(x, y)$  для кожної з прямокутних областей зображення, як суму всіх значень функції  $f(x, y)$  для пікселів, розташованих лівіше і вище пікселя  $(x, y)$ . Яскравість кожного пікселя розраховується за формулою

$$I(x, y) = f(x, y) - I(x - 1, y - 1) + I(x, y - 1) + I(x - 1, y). \quad (3)$$

За 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 швидко розрахована за формулою

$$\sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} f(x, y) = I(x_2, y_2) - I(x_2, y_1 - 1) - I(x_1 - 1, y_2) + I(x_1 - 1, y_1 - 1). \quad (4)$$

Використання інтегрального представлення зображення дає значне скорочення часу роботи алгоритму, за рахунок збереження всіх компонентів в

інтегральній матриці. А алгоритм містить чотири звернення до масиву і три арифметичні операції. Експериментально встановлено, що запропонований метод дозволяє уникнути різких контрастних ліній та ігнорує невеликі градієнтні зміни.

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 (рис. 2).



Рисунок 2 – Приклади фотографій приладу з різними розташуваннями стрілок

Представлені на рис. 2 зображення мають відмінність в розташуванні стрілки. Для знаходження кута відхилення стрілки знайдемо різницю між пікселями цих зображень. У результаті отримаємо зображення з чітко виділеними стрілками (рис. 3) та залишковими пікселями, які усуваються медіанним фільтром.

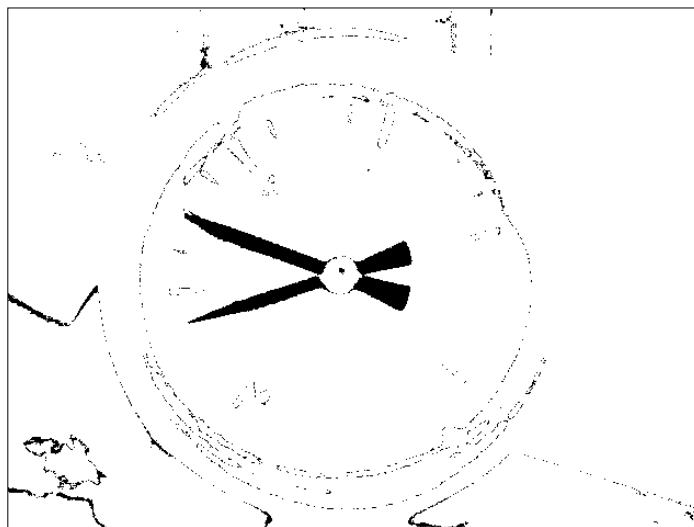


Рисунок 3 – Різниця зображень без застосування медіанного фільтра

Стрілки на рис. 3 громіздкі і за допомогою них не можна точно визнати кут відхилення. Для вирішення цієї проблеми необхідно звузити товщину стрілок до 1 пікселя, тобто, потрібно отримати скелетне представлення даного зображення.

Грунтуючись на принципах хвильового методу, що передбачає аналіз шляху проходження сферичної хвилі по зображенню, пропонується замінити хвилю на коло, і генерацію кожного наступного кола проводити на знайдений



точці середньої вісі об'єкта. Таким чином, для скелетизації зображення розроблено наступний алгоритм:

1. Обираємо бінарне зображення, на якому є об'єкт.
2. Скануємо зображення за стрічками або стовпчиками для пошуку крайньої точки об'єкта.
3. Зі знайденої точки будуюмо коло, яке більше за ширину об'єкта. (На рис. 3 продемонстровано пошук точки  $O$ , що є точкою середньої вісі об'єкта. Аналогічно шукаємо точку  $A$ ). Коло перетинає об'єкт у двох точках, а центр кола та ці дві точки утворюють рівнобедрений трикутник (відрізки  $AB$  і  $AC$  – радіуси). За властивістю медіани рівнобедреного трикутника, що проведена до його основи, точка  $O$  є серединою відрізка  $BC$  та точкою середньої вісі об'єкта.

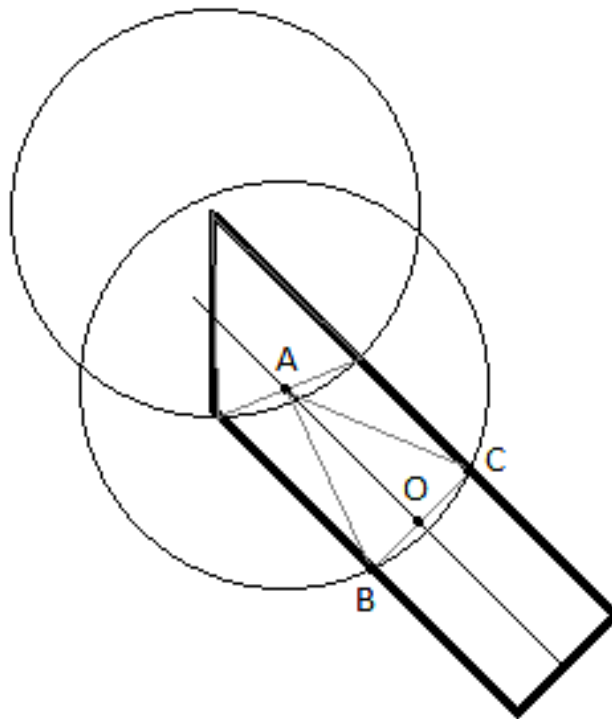


Рисунок 4 – Схематичне представлення запропонованого способу скелетизації зображення

4. З точки  $O$  будуюмо наступне коло і повторюємо алгоритм з 3 пункту до завершення межі об'єкту.

У результаті виконання алгоритму маємо точки середньої вісі об'єкта, які можуть бути використані для векторизації або представлення скелетного зображення.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що запропонований метод стійкий до шуму на зображенні та дозволяє враховувати розширення (звуження) і поворот об'єкта.

За допомогою перетворення Хафа визначаємо координати прямих (стрілок) у параметричному просторі  $(\rho, \varphi)$ , що дозволить визначити покази приладу.

У третьому розділі розроблено методику розпізнавання значення стрілочного вимірювального приладу, що не залежить від типу шкали, та проведено автоматизацію процесу визначення статичних і динамічних характеристик стрілочних вимірювальних приладів.

За допомогою методу перетворення Хафа визначаємо координати стрілок та проводимо розрахунки кута відхилення стрілки. У найпростішому випадку перетворення Хафа є лінійним перетворенням для виявлення прямих. Пряма може бути задана рівнянням  $y = mx + b$  і обчислена для будь-якої пари точок на зображенні  $(x, y)$ .

Координати точок для побудови однієї прямої:

$$x_{11} = 0; y_{11} = \frac{r_1}{\sin \varphi_1}; x_{12} = \frac{r_1}{\cos \varphi_1}; y_{12} = 0. \quad (5)$$

Координати точок для побудови іншої прямої:

$$x_{21} = 0; y_{21} = \frac{r_2}{\sin \varphi_2}; x_{22} = \frac{r_2}{\cos \varphi_2}; y_{22} = 0. \quad (6)$$

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

На рис. 5 проілюстровано можливі варіанти розташування стрілки (пряма b) відповідно до нульового значення приладу (пряма a). Розглянувши всі можливі варіанти розташування стрілки, встановлено, що для дугової шкали їх буде 2, а для кругової – 5.

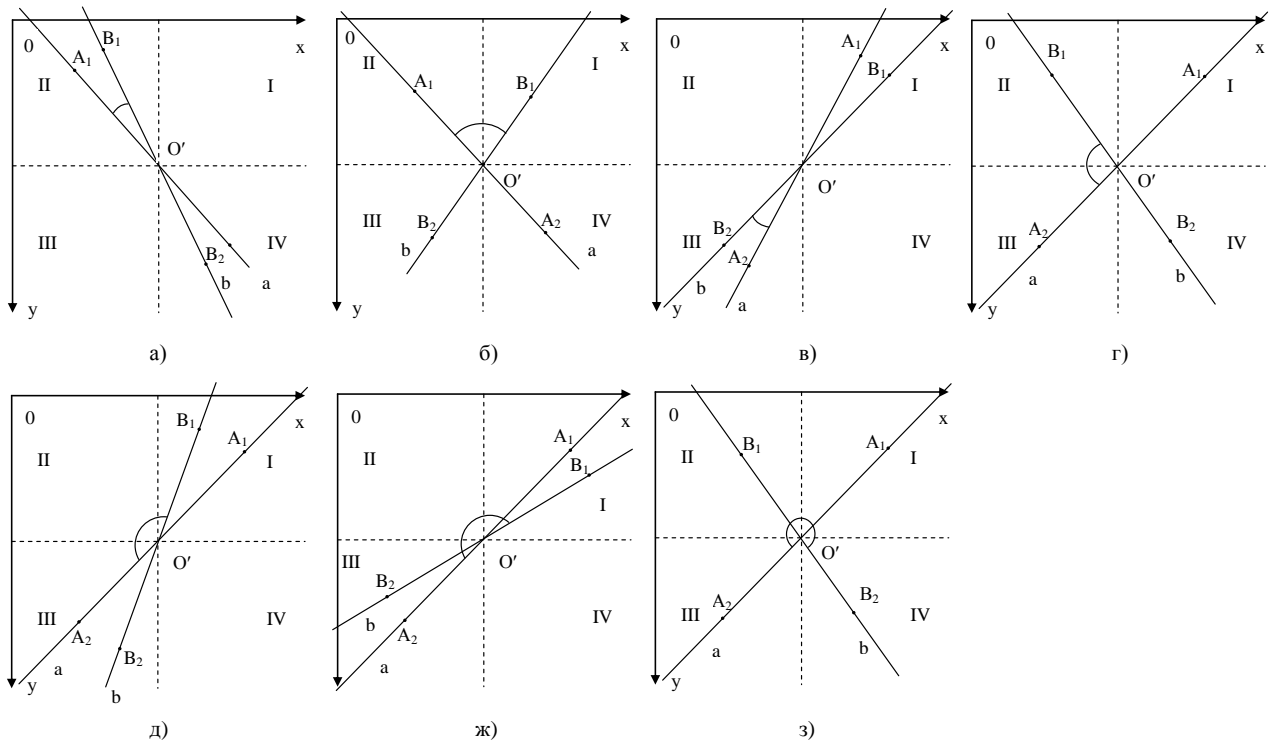


Рисунок 5 – Варіанти позицій стрілок для дугової та кругової шкал

Розглянемо методику визначення кута відхилення стрілки на прикладі дугової шкали (рис. 5 б).

За розташуванням прямих  $a$  і  $b$  не можна точно визначити в якій чверті знаходяться стрілка та який саме кут її відхилення потрібно визначити. З метою вирішення цієї задачі прямі  $a$  і  $b$ , що розпізнані за допомогою перетворення Хафа, накладаємо на скелетне представлення стрілок (рис. 6).

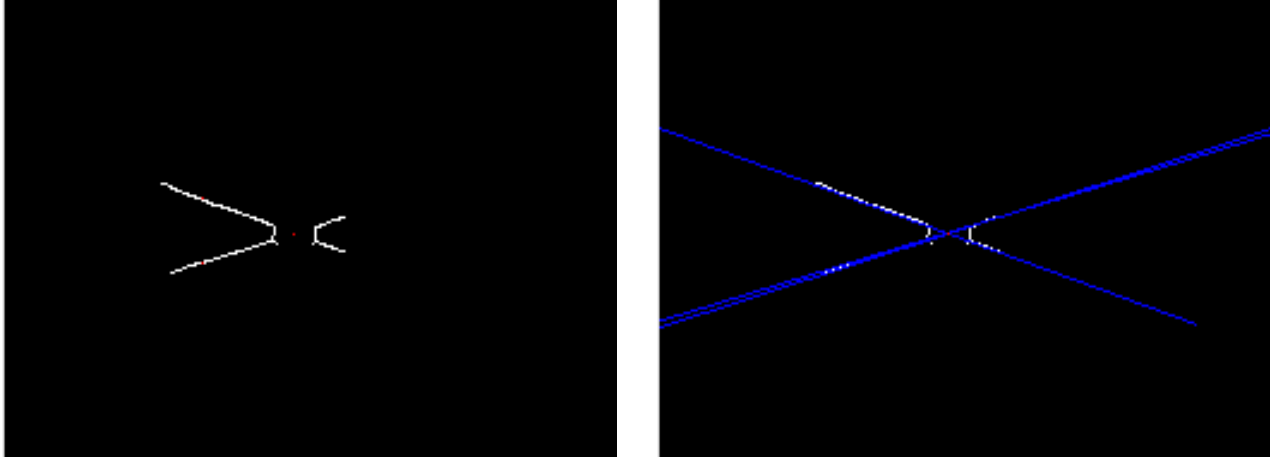


Рисунок 6 – Демонстрація процесу накладання прямих  $a$  і  $b$  на скелетне представлення стрілок.

Для уточнення розташування стрілок за чвертями необхідно знайти точку перетину прямих  $a$  і  $b$  за формулами:

$$\frac{x - x_{11}}{x_{12} - x_{11}} = \frac{y - y_{11}}{y_{12} - y_{11}}; \quad (7)$$

$$\frac{x - x_{21}}{x_{22} - x_{21}} = \frac{y - y_{21}}{y_{22} - y_{21}}. \quad (8)$$

У результаті перетворень формул (7, 8) отримуємо формули (8, 9) для знаходження точки перетину прямих  $O'=(x;y)$ :

$$x = \frac{(x_{11} \cdot y_{12} - x_{21} \cdot y_{11}) \cdot (x_{22} - x_{21}) - (x_{21} \cdot y_{22} - x_{22} \cdot y_{21}) \cdot (x_{21} - x_{11})}{(y_{11} - y_{12}) \cdot (x_{22} - x_{21}) - (y_{21} - y_{22}) \cdot (x_{12} - x_{11})}; \quad (8)$$

$$y = \frac{(y_{21} - y_{22}) \cdot x - (x_{21} \cdot y_{22} - x_{22} \cdot y_{21})}{(x_{22} - x_{21})}. \quad (9)$$

Від точки перетину  $O'$  будуємо відрізки однакової довжини у різні боки за відповідними прямим  $a$  і  $b$  (рис. 5 б).

В околі точок  $A_1, A_2, B_1, B_2$  в 1 піксель шукаємо пікселі, які належать стрілці у початковому розташуванні та на конкретному значенні приладу (рис. 8). Сформулюємо наступні умови:

- якщо шуканих пікселів два і більше, то це стрілка і точно вже можна визначити, в якій чверті вона знаходиться;
- якщо шуканих пікселів один або менше, то стрілка не знайдена або це шум.

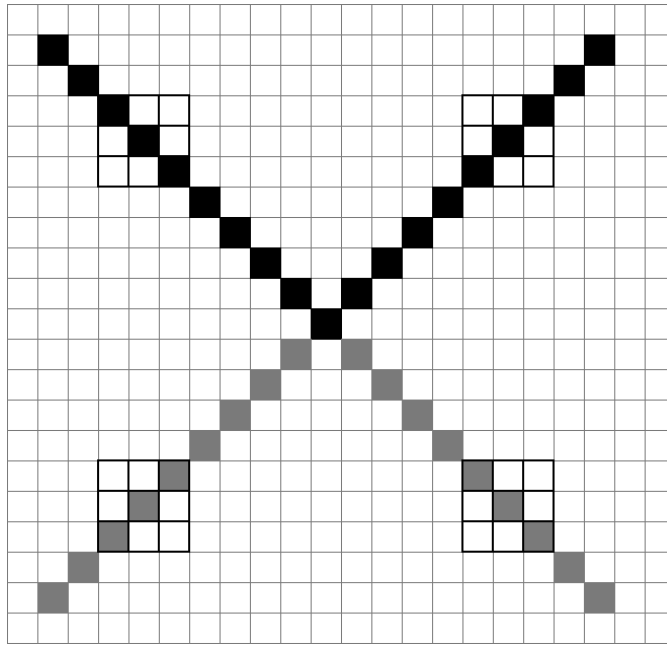


Рисунок 8 – Визначення точного розташування стрілок за чвертями

Розташування стрілки визначаємо враховуючи кутові коефіцієнти прямих а і b, які розраховуємо за формулами:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = k_1 = \frac{x_{12} - x_{11}}{y_{12} - y_{11}}; \quad \varphi_1 = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_{12} - x_{11}}{y_{12} - y_{11}} \right) \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = k_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{y_{22} - y_{21}}; \quad \varphi_2 = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_{22} - x_{21}}{y_{22} - y_{21}} \right) \quad (11)$$

Якщо  $A_1 \in II$  і  $B_1 \in I$ ,  $k_1 < 0$  і  $k_2 \geq 0$  (варіант розташування стрілки рис. 5 б), то формула для визначення кута відхилення стрілки має вигляд

$$\varphi = 180 - (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (12)$$

Аналогічно визначаємо кут відхилення стрілки за кожним із варіантів її розташування (рис. 5) за узагальненою формулою, що враховує кожен із варіантів:

$$\varphi = \begin{cases} \left| \varphi_1 - \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_1 \in II \text{ і } B_1 \in II, k_1 \geq 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ 180 - \left( \left| \varphi_1 + \varphi_2 \right| \right), & \text{якщо } A_1 \in II \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ \left| \varphi_1 - \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_2 \in III, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \leq 0; \\ \left| \varphi_1 + \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in II, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0; \\ 180 - \left| \varphi_1 + \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 < 0; \\ 180 + \left| \varphi_1 - \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_1 \in I, k_1 < 0 \text{ і } k_2 < 0; \\ 180 + \left| \varphi_1 + \varphi_2 \right|, & \text{якщо } A_2 \in III \text{ і } B_2 \in IV, k_1 < 0 \text{ і } k_2 \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

Основною причиною, що обмежує можливості перевірки приладу в динамічному режимі, є інерційність його рухомої частини. В результаті, стрілка, що прямує за вхідним сигналом, відстає від його значення на розмір динамічної похибки, яка формується із постійної та згасаючої змінних.

Відхилення стрілки вимірювального індикатора можна описати коливальною ланкою (рис. 9).

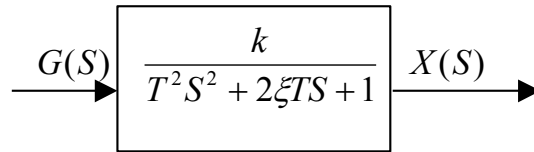


Рисунок 9 – Структурне зображення коливальної ланки

Коливальна ланка є найпростішим динамічним елементом системи автоматичного керування та має передавальну функцію виду

$$W(S) = \frac{k}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1}. \quad (14)$$

Динамічні властивості коливальної ланки визначаються трьома параметрами:  $k$  – коефіцієнтом підсилення (передачі) коливальної ланки;  $T$  – постійною часу коливальної ланки;  $\xi$  – відносним коефіцієнтом згасання коливальної ланки  $0 \leq \xi < 1$ .

Перетворюючи рівняння (14), отримаємо:

$$h(t) = k \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T}t} \cdot \sin \left( \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}t + \varphi \right) \right] \quad (15)$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

Рівняння (15) описує згасаючий коливальний процес з відносним коефіцієнтом згасання та частотою  $\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}$ . Значення, до якого прямує цільова функція, визначається як  $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$ , а її графік зображений на рис. 10.

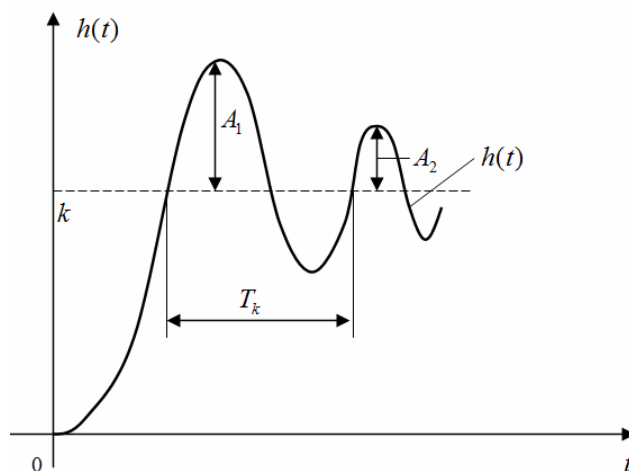


Рисунок 10 – Згасаючий коливальний процес ( $T_k$  – період коливань,  $A_1, A_2$  – амплітуди двох сусідніх коливань)

За графіком функції  $h(t)$  визначаємо параметри коливальної ланки: коефіцієнт підсилення коливальної ланки визначають за встановленим значенням перехідної функції  $k = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$ ; постійну часу  $T$  і коефіцієнт згасання  $\xi$  можна знайти з рівнянь:

$$\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot T_k = 2 \cdot \pi; \quad \frac{A_1}{A_2} = e^{-\frac{\xi}{T} \cdot T_k} \quad (16)$$

Для автоматизації процесу визначення динамічних метрологічних характеристик фотографують покази приладу через певний дискретний час. При практичних випробуваннях встановлено, що один кадр зображення отримується в середньому за 15-40 мс. До цього проміжку часу додається час на запис зображення у постійну пам'ять комп'ютера.

При циклічному фотографуванні приладу створюється папка з цифровими фотографіями показу приладу, а далі ці зображення теж розпізнаються у циклічному режимі. У результаті, маємо масив зображень показів приладу з відповідним їм рядом часу, в моменти якого ці фото 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 (15), яке описує згасаючий коливальний процес (рис. 11.)

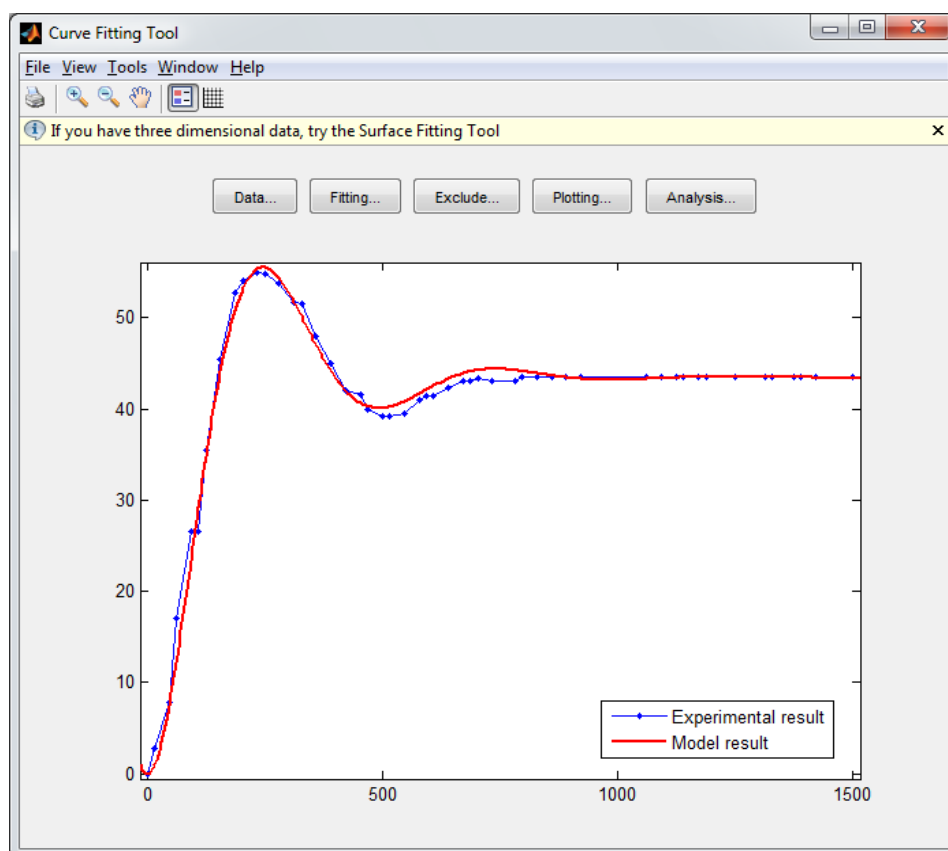


Рисунок 11 – Результат апроксимації

Аналіз статистичних показників та графіка побудованої моделі свідчить про відповідність між емпіричними даними та теоретичними даними.

У четвертому розділі розроблено програмне забезпечення комп'ютерної системи та генератор випробувальних сигналів, що керує вхідним сигналом, відповідно до запропонованої структурної схеми (рис.1).

Розроблена комп'ютерна система дозволяє проводити випробування в статичному та динамічному режимах роботи. Апаратна частина складається з персонального комп'ютера, генератора випробувальних сигналів та веб-камери.

Достатні вимоги до персонального комп'ютера:

- Двоядерний процесор Intel Celeron E3400 2.6GHz.
- Оперативна пам'ять 2GB.
- Накопичувач на жорсткому магнітному диску об'ємом 500GB.

Генератор випробувальних сигналів який керує випробувальним сигналом та побудований на доступному мікроконтролері ATmega8.

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

У генераторі випробувальних сигналів реалізовано вибір режиму роботи:

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

Для формування струмового тестового сигналу використано високо-амперний операційний підсилювач LTC1210 із схемою включення, що дозволяє формувати струм до 10 А.

Для формування постійної та змінної напруги (до 140 В) використовується високовольтний операційний підсилювач LT6090.

Задання величини опору для тестування омметрів здійснюється через цифровий потенціометр TPL0102. Величина опору може змінюватися до 100 кОм. Можна розширити вимірювальний діапазон тестового омметра шляхом підключення додаткового резистора до 30 МОм.

Алгоритм роботи програмного забезпечення мікроконтролера ATmega8 представлено на рис. 12.

Алгоритм роботи для розробленого програмного забезпечення:

1. Необхідно ініціалізувати веб-камеру.
2. Направити веб-камеру на випробувальний прилад так, щоб він максимально весь був у кадрі.
3. Налаштувати величину порогу бінаризації таким чином, щоб чітко було видно стрілку.
4. Сфотографувати прилад при нульовому показі.

5. Сфотографувати прилад на будь-якому значення. При цьому запускається процес автоматичного розпізнавання показу приладу в реальному часі.

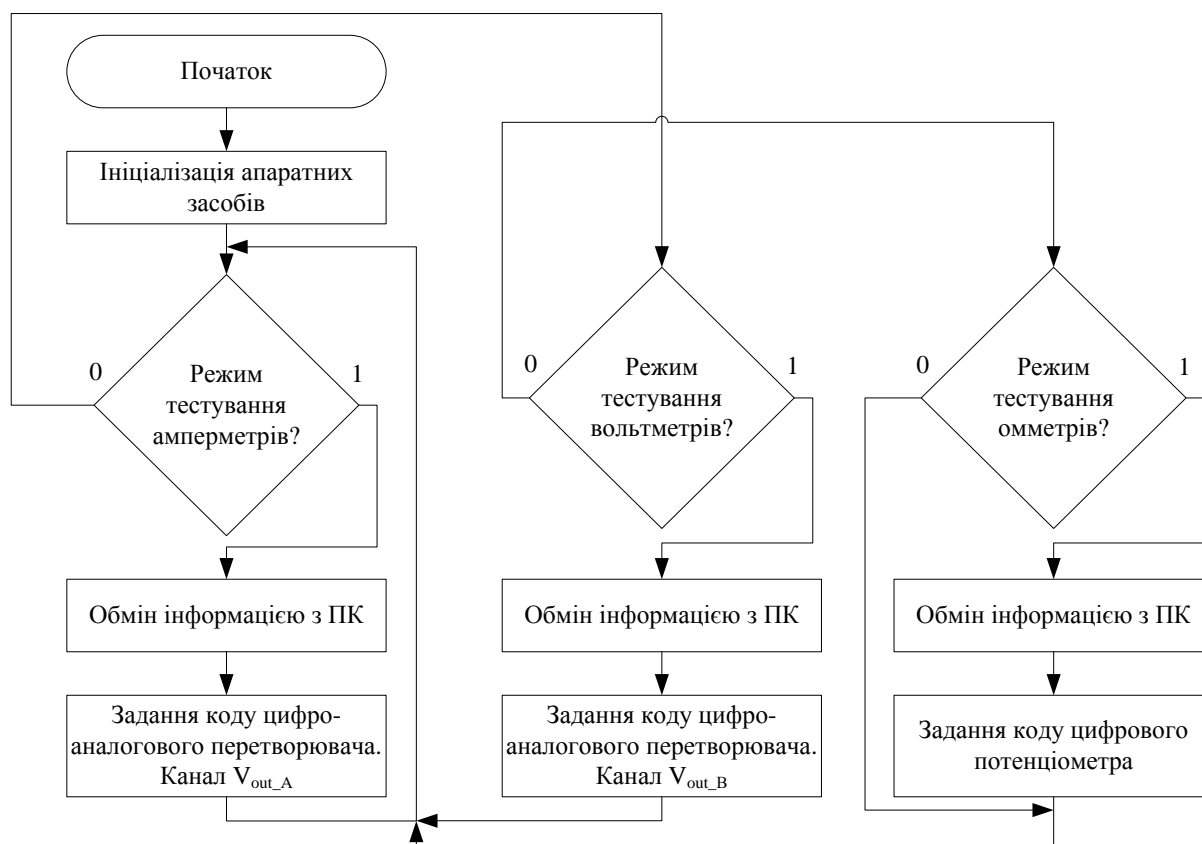


Рисунок 12 – Алгоритм роботи програмного забезпечення мікроконтролера ATmega8

У результаті роботи програми отримуємо масив значень показів приладу та час, в який була зроблена фотографія.

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

У **висновку** сформульовано основні наукові результати та практичну значущість роботи.

У **додатках** представлено акт впровадження та фотографію робочого місця при контрольно-здавальних випробуваннях.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і нове розв'язання актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає у підвищенні точності випробувань стрілочних вимірювальних приладів шляхом 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 різноманітність та чисельність стрілочних вимірювальних приладів, які проходять випробування, та висока трудомісткість його виконання за відсутність ефективного комп'ютеризованого обладнання для контролю обґрунтовує актуальність розробки комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів.

2. 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  $\Delta_{stat} = 0,01$  В та  $\delta_{stat} = 0,17\%$  відповідно, та абсолютна та відносна динамічні похибки дорівнюють  $\Delta_{дин} = 0,04$  В та  $\delta_{дин} = 3,2\%$  відповідно;

3. Вперше розроблено метод адаптивної бінаризації, який відрізняється від існуючих тим, що він побудований на основі представлення зображення як інтегрального, що дозволяє підвищити швидкість 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 "Мегометр" 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРОМ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ліщук Р.І. Метод адаптивної бінаризації з нерівномірним освітленням зображення / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вісник інженерної академії України. - Київ, №1. - 2013. - С. 53-55.

2. 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, №3. - 2014. - С. 22-27.

3. Ліщук Р.І. Модифікований хвильовий метод скелетизації зображень / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // Вісник інженерної академії України. - Київ, №3-4, 2014. - С. 73-77.

4. 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.

5. R. Lishchuk, V. Kucheruk, I.P. Kurytnik Adaptive binarization with non-uniform image illumination / R. Lishchuk, V. Kucheruk, I.P. Kurytnik // Pomiaru automatyka Robotyka. - 2014. - №6. - P. 72-75.

6. 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.

7. 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.

8. Ліщук Р.І. Використання медіанного фільтра для видалення шумів в процесі обробки зображень // Інформаційні технології та комп'ютерні системи на шляху до інформаційного суспільства. Збірник матеріалів III Міжвузівської науково-практичної конференції, Умань, 2010. - 38-41 с.

9. 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.

10. Ліщук Р.І. Метод адаптивної бінаризації з нерівномірним освітленням зображення / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю. // VI International Conference On Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2012", Vinnytsia, 2012. – с. 30.

11. Ліщук Р.І. Інформаційні технології обробки динамічно змінюваної візуальної інформації аналогових вимірювальних приладів / Ліщук Р.І., Кучерук В.Ю., Кормановський С.І. // Тези доповідей I-й Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2011)- Вінниця, 2011. – с. 38.

12. 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.

13. 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.

## АНОТАЦІЯ

**Ліщук Р.І. Комп'ютерна система для випробувань стрілочних вимірювальних приладів – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена розробці нової комп'ютерної системи для випробувань стрілочних вимірювальних приладів у статичному та динамічному режимах роботи.

Запропоновано структурну схему комп'ютерної системи, яка складається з веб-камери, генератор випробувальних сигналів та програмного забезпечення, що дає змогу керувати випробувальним сигналом в статичному та динамічному режимах роботи та розпізнавати покази зі шкал стрілочних вимірювальних приладів.

Проаналізовано та запропоновані нові методи обробки цифрових зображень: метод адаптивної бінаризації зображень та метод скелетизації, які лежать в основі розробленого програмного забезпечення.

Отримано аналітичні залежності знаходження кута відхилення стрілки для приладів з дугової та круговою шкалами.

Основні результати дослідження впроваджені на ПАТ "Уманський завод "Мегомметр".

***Ключові слова: комп'ютерна система, зображення, бінаризація, фільтрація, скелетизація, розпізнавання, стрілочний прилад.***

## АННОТАЦИЯ

**Лищук Р.И. Компьютерная система для испытаний стрелочных измерительных приборов – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. - Национальный университет "Львовська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена разработке новой компьютерной системы для испытаний стрелочных измерительных приборов в статическом и динамическом режимах работы.

Предложена структурная схема компьютерной системы, которая состоит с веб-камеры, генератор испытательных сигналов и программного обеспечения, что дает возможность управлять испытательным сигналом в статическом и динамическом режимах работы и распознавать показания со шкал стрелочных измерительных приборов.

Проанализированы и предложены новые методы обработки цифровых изображений: метод адаптивной бинаризации изображений и метод скелетизации, которые лежат в основе разработанного программного обеспечения.

Получены аналитические зависимости нахождения угла отклонения стрелки для приборов с дуговой и круговой шкалами.

Основные результаты исследования внедрены на ПАТ "Уманский завод "Мегомметр".

*Ключевые слова: компьютерная система, изображение, бинаризация, фильтрация, скелетизация, распознавание, стрелочный прибор.*

## SUMMARY

**Lishchuk R.I. Computer system for testing of pointer-and-scale measuring instruments** – on the right of manuscript.

Thesis submitted for Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences, speciality 05.13.05 – computer systems and components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The dissertation's subject matter is the development of a new computer system for testing of pointer-and-scale measuring instruments in static and dynamic modes.

The basic requirements to existing computer systems for testing of pointer-and-scale measuring instruments are analyzed and formulated. As a result it is defined that the existing computer systems for testing of pointer-and-scale measuring instruments don't work in dynamic mode. Besides, the number of instruments that are tested simultaneously is limited, on the one hand, by the formation of a test signal, and, on the other hand, by the type of instruments scale and their metrological characteristics. Therefore, the use of the analyzed computer systems in production is primarily determined by the availability of high-speed image processing algorithms, measurement accuracy, simplicity of hardware components and decision-making time about the quality of the instrument under testing.

The ways of implementation of the method of optical reading of the scales of pointer-and-scale measuring instruments are investigated and prerequisites for the formation of a new computer system for testing of pointer-and-scale measuring instruments in static and dynamic modes are created.

The structural diagram of a computer system consisting of webcam, test-signal generator and software is suggested.

Test-signal generator is built on microcontroller ATmega8. It allows to operate the test signal in static and dynamic modes. The choice of test signal for testing of pointer indicators intended to visualize the measured value of amperage (amperemeters), constant and variable magnitude of voltage (voltmeters) and measured value of resistance (ohmers) is implemented.

The software, which consists of the following units: binarization of images, difference of images, filtration of images, skeletonization of images and identification of instrument indices is developed. The proposed software allows to identify readings of the scales of pointer-and-scale measuring instruments in static and dynamic modes.

A method of adaptive binarization of images is developed. It is based on an integral representation of the image. With the use of the integral representation of the image a significant reduction of the time of algorithm operating is obtained due to the fact that all the calculation components are saved in an integral matrix and the calculation takes four accesses to the file and three arithmetic operations. The proposed method allows to avoid sharp contrasting lines and to ignore small gradient changes.

The flooding method of skeletonization of binary images is improved. It differs from the well-known one by the way of circles generation. Each successive circle is generated on the determined point of center axis of the object. As a result of the execution of algorithm we find points of center axis of the object that can be used to represent skeletal image. The proposed method can consider the expansion (narrowing) and rotational motion of the object. It is resistant to noise on the image.

Analytical dependences of identifying the angle of deflection of cursor of the instruments with arc and circular scales are received.

The main results of the research have industrial implementation at joint-stock partnership "Uman plant" Megommetr" during acceptance testing.

***Key words: computer system, image binarization, filtration, skeletonization, identification, pointer-and-scale instrument.***