

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя

М.І. ПАЛАМАР, А.В. ЧАЙКОВСЬКИЙ

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ОПТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ КУТА:
СЕМОТЕХНІЧНІ ТА ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНІ
МЕТОДИ СИНТЕЗУ**

Тернопіль - 2015

УДК 681.58
ББК 31.27
П14

Рекомендовано до друку Вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
(протокол № 2 від 03.03.2015 р.)

Рецензенти;

Погребенник В.Д. доктор технічних наук, професор, професор кафедри екологічної безпеки та аудиту, Національний університет "Львівська політехніка";

Кочан В.В. кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-обчислювальних систем та управління, Тернопільський національний економічний університет.

М.І. Паламар, А. В. Чайковський

Інтелектуальні оптоелектронні сенсори кута: схемотехнічні та програмно-алгоритмічні методи синтезу: Монографія / М.І. Паламар, А. В. Чайковський; ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль: вид-во "Джура", 2015. – 144 с. **ISBN 978-966-185-123-7.**

В монографії розглянуто і обґрунтовано нові наукові підходи до побудови кутових сенсорів з інтелектуальними функціями що базуються на впровадженні схемотехнічних та програмно-алгоритмічного рішень у поєднанні із застосуванням методів опрацювання інформації мікроконтролером, що використовується у складі сенсора.

Матеріал підготовлено на основі теоретичних і експериментальних напрацювань під час проведення НДР/ДКР, що виконувались авторами на кафедрі приладів і контрольно-вимірювальних систем та в НДЛ «Інформаційні технології та інтелектуальні системи» за держбюджетними і комерційними замовленнями. Отримані теоретичні результати перевірені на практиці під час проектування прецизійних сенсорів кута для великогабаритних антенних систем супутникового зв'язку.

© Паламар М.І., Чайковський А.В., 2015

© ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015

ISBN 978-966-185-123-7

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ	8
1.1 Вимоги до сенсора кута повороту осі антени	8
1.2 Методи вимірювання кутових координат	10
1.3 Інтелектуалізація сенсорів	20
1.4 Методи локалізації перепадів яскравості	22
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА	31
2.1 Принцип роботи оптоелектронного сенсора кута	31
2.2 Імітаційне моделювання оптоелектронного сенсора кута	34
2.3 Метод виключення механічних похибок	42
2.3.1 Сенсор кута, нечутливий до зміщення осі кодового диска	43
2.3.2 Імітаційне моделювання сенсора з двома ОБФП	47
2.4 Вимірювання зміщення осі диска	52
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕПАДІВ ІНТЕНСИВНОСТІ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ КУТА	56
3.1 Розрахунок освітленості в зоні тіні кодового диска	56
3.2 Метод оцінки ефективності методу локалізації перепаду	64
3.2.1 Вимоги до методу та характеристика зображення диска	64
3.2.2 Модель фотоматриці	66
3.2.3 Результати моделювання	70
3.3 Експериментальні дослідження ефективності методів локалізації	72
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ КОДОВОГО ДИСКА ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА	82
4.1 Вимоги до кодової послідовності	82
4.1.1 Мінімальна допустима різниця ширини тіней секторів.	84
4.2 Аналіз методів представлення кодової послідовності	87
4.3 Максимальна допустима різниця ширини елементів кодової доріжки	94
4.4 Вибір коду для диска заданого радіусу	99

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА	105
5.1 Розробка функціональної схеми	105
5.2 Реалізація алгоритму функціонування	108
5.3 Дослідження похибок сенсора кута	118
5.3.1 Стенд автоматизованої перевірки сенсорів кута	118
5.3.2 Порівняння показів розроблених сенсорів	119
5.3.3 Дослідження похибок за зразковим сенсором кута	121
5.3.4 Дослідження похибок сенсора в складі антенної системи	123
5.4 Порівняння характеристик розробленого сенсора із світовими аналогами	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131
ДОДАТОК	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Пояснення
АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
ЕОМ	Електронна обчислювальна машина
ІВС	Інформаційно-вимірювальна система
ЛФЗ	Лінійна інтерполяція фільтрованого зображення
ОБФП	Однорядковий багатоелементний фотоприймальний пристрій
ОПП	Опорно-поворотний пристрій
ПВП	Псевдовипадкова послідовність
с.к.	Система координат
с.к.в.	середньоквадратичне відхилення
СІФЗ	Сплайн-інтерполяція фільтрованого зображення
ЦАП	Цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

У багатьох задачах, зокрема при створенні великогабаритних антенних систем супутникового зв'язку, необхідні сенсори кута високої роздільної здатності, придатні для експлуатації в жорстких кліматичних умовах. Сенсори кута також використовуються в станках з ЧПК, промислових роботах, системах наведення телескопів тощо. Сенсор кута в сучасних умовах використання, окрім високої точності та надійності, повинен мати високі динамічні характеристики відліку, простоту взаємодії з вимірювально-інформаційною системою, зручність початкового встановлення, функції самодіагностики та автоматичного виявлення метрологічних відмов. Ряд застосувань додатково ставлять вимогу обмежених габаритів, надійності передавання результатів на великі відстані, стійкості до впливу кліматичних факторів та промислових завад.

Збільшення попиту на телекомунікаційні послуги вимагає розроблення доступного наземного сегмента супутникового зв'язку, а використання високих робочих частот за наявності великої кількості космічних апаратів спонукає застосовувати антени з вузькою діаграмою направленості, що одночасно підвищує вимоги до точності та технологічності сенсорів кута систем позиціонування. В автоматичних вимірювально-інформаційних системах особливого значення набуває функція самодіагностики, яка дає змогу своєчасно виявити відмову сенсора та запобігти аварійній ситуації.

Сенсори кута на основі псевдовипадкової послідовності, запропоновані Б. Джонсом та К. Зіа, зарекомендували себе як прості у виготовленні та надійні. Однак, їхніми обмеженнями є похибки, спричинені недоліками методу локалізації меж секторів, ексцентриситетом та люфтом в опорах. Зменшення похибок сенсора шляхом підвищення вимог до технології його виготовлення приводить до зростання собівартості, що є економічно недоцільним.

Створення високоточних і швидкодіючих оптоелектронних сенсорів кута вимагає врахування та подолання значної кількості дестабілізуючих чинників: механічних похибок виготовлення, особливостей оптоелектронного зчитування кодового диска,

недосконалостей існуючих методів опрацювання зображень тощо. Розв'язок цієї задачі потребує не тільки врахування особливостей конструкції, а й удосконалення методів опрацювання вимірювальної інформації. Розвиток електроніки уможливив реалізацію складних алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації безпосередньо в сенсорі. Це дає змогу зменшити похибку, підвищити надійність вимірювання та послабити вимоги до точності механічних вузлів шляхом застосування досконаліших схемних рішень та методів опрацювання сигналів, що і обумовлює актуальність обраної теми.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи – покращення технологічних, метрологічних та функціональних характеристик оптоелектронних сенсорів кута.

Досягнення цієї мети передбачає розв'язання таких задач:

– на основі порівняльного аналізу та класифікації відомих методик вимірювання кута встановити їх особливості та тенденції розвитку;

– створити математичну модель роботи оптоелектронного сенсора кута, що враховує вплив основних джерел похибок;

– синтезувати схему вимірювання кута, малочутливу до похибок виготовлення та впливів зовнішнього середовища;

– дослідити характер розподілу освітленості в зоні світлотіні меж секторів та вдосконалити метод субпіксельного визначення координати межі тіні;

– розробити метод дослідження ефективності субпіксельних методів локалізації перепадів для задач вимірювання кута;

– розробити методику вибору коду для кодового диска оптоелектронного сенсора кута;

– запропонувати способи підвищення надійності сенсора кута;

– на основі отриманих результатів практично реалізувати та дослідити сенсор кута з покращеними метрологічними характеристиками.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ

У першому розділі проаналізовано тенденції розвитку засобів вимірювання кута та зроблено бібліографічний огляд за тематикою роботи. З'ясовано, що перевагами оптоелектронних сенсорів кута на основі псевдовипадкової послідовності є можливість роботи при великих похибках закріплення, використання простих технологій та доступних компонентів. Водночас зазначено низку факторів, що ускладнюють їх використання – чутливість до механічних похибок та складні алгоритми обробки. Оскільки визначення положення межі тіні сектора суттєво впливає на характеристики точності, то в першому розділі також дано критичні оцінки існуючим методам локалізації перепадів інтенсивності. Проаналізовані властивості, притаманні інтелектуальним сенсорам.

1.1 Вимоги до сенсора кута повороту осі антени

Положення твердого тіла, що обертається навколо нерухомої осі, може бути описаним двограним кутом φ , утвореним двома площинами, що вміщують вісь обертання, одна з яких нерухома, інша – зв'язана з тілом [66]. Із одержанням інформації про кутове положення тіла також пов'язане визначення його кутової швидкості та прискорення – відповідно першої та другої похідної кутового положення по часу. В ряді випадків виникає потреба контролювати додаткові параметри тіла, такі як зміщення осі обертання чи биття.

Потреба визначати кутове положення твердого тіла та параметри його обертового руху виникає в багатьох галузях техніки, з розвитком якої розвивалися і засоби вимірювання кутових координат. Питанням створення теоретичних основ побудови ефективних сенсорів кута та кутової швидкості займалися Б. Джоунс (B.E. Jones), Дж. Джонстон (J.S. Johnston), І. Петрі (E.M. Petriu), М. Арсіч (M. Arsić), Д. Деніч (D. Denić), І. Ранделовіч (I. Randelović), М. Ранчіч (M. Rančić), Г. Міліковіч (G. Miljković), М. Дурана (M. Durana), Д.В. Свечарнік, В.Г. Домрачов, Ф.Б. Гриневич, М.Н. Сурду, А.С. Левицький, А.І. Новік, Л.М. Сафонов, С.В. Свечніков, В.Б. Богданович,

Н.Е. Колюхов, П.Ф. Олексенко, Ю.В. Ушенін, А.А. Ахметжанов, М.А. Габідулін, М.Й. Юкиш (Білінська), Й.Й. Білінський, В.О. Поджаренко, В.В. Кухарчук, Я.І. Лепіх, П.О. Снігур, Ю.О. Гордієнко, В.К. Лопушенко, В.А. Піддубний, Н.Ф. Жовнір та ін. Серійним виробництвом сенсорів кута займаються провідні приладобудівні підприємства світу: "Heidenhain", "Megatron", "Posital" (Німеччина), "Baumer", "АМО" (Австрія), "USDigital" (США), "Precizika" (Литва), "РИФТЭК" (Білорусь), "СКБ ИС" (Росія), ПАТ "Фіолент" (Україна) та інші.

Зокрема, сенсори кута є одним із найважливіших вузлів забезпечення точності наведення променя великогабаритних антенних систем і супроводу космічних апаратів. Зважаючи на особливості застосування сенсора кута для вимірювання положення осей опорно-поворотного пристрою антенної системи, до нього можна поставити такі вимоги.

- Абсолютний відлік. Повернення опорно-поворотного пристрою в початкове положення для прив'язки точки відліку вимагатиме великих затрат часу. Тому сенсор кута повороту має забезпечувати абсолютний відлік відразу після ввімкнення живлення.
- Діапазон вимірювання. Переважно сенсор кута розмішують на вихідному валі редуктора, тому діапазон вимірювання складає не більше 360° для азимутальної та 90° для кутомісної осі. В ОПП карданного типу слід забезпечити діапазон вимірювання 180° по двох осях.
- Статична точність. Для забезпечення надійного прийому сигналу похибка наведення не має перевищувати $1/10$ від ширини діаграми направленості [5; 47]. Для прикладу, ширина основного пелюстка діаграми направленості антени з діаметром рефлектора 4,2 м для Х-діапазону складає $20'$. Тому опорно-поворотний пристрій має забезпечувати похибку наведення $\pm 2'$.
- Динамічна точність. Під час супроводу супутника додатково виникає динамічна похибка наведення, що залежить від швидкості руху супутника, динамічних характеристик опорно-поворотного пристрою та сенсора кута. В залежності від конструкції ОПП антени швидкість супроводу низькоорбітальних супутників може досягати $10^\circ/\text{с}$ [43].

- Інтерфейс. Оскільки сенсор кута має легко інтегруватися в цифрову систему керування, то перевагу слід віддати сенсорам з цифровим виходом. Інтерфейс має передбачати можливість передачі результатів вимірювання на відстань до 100 м і бути стійким до впливу завад силових кіл.
- Вимоги до кліматичного виконання. Оскільки сенсор кута встановлюється на відкритому повітрі й може попадати під дію пилу, дощу та снігу, то ступінь захисту оболонки по ГОСТ 14254-96 має бути не нижчим за IP65.
- Додаткові функції. Для прив'язки початкового положення протокол сенсора має передбачати функції встановлення поточної позиції та зміни напрямку обертання залежно від конструкції ОПП антени. Оскільки доступ до сенсора утруднений, то програмне забезпечення має передбачати функції самодіагностики та своєчасного виявлення несправностей.

1.2 Методи вимірювання кутових координат

Найпростішим сенсором кута є потенціометр, в якому ковзний контакт зв'язаний із об'єктом вимірювання і переміщується уздовж резистивного елемента, виготовленого з дроту чи провідного пластику. Для однооборотних потенціометричних сенсорів кута діапазон вимірювання обмежений і не досягає повного оберту. Допуск відхилення від лінійності потенціометричних сенсорів кута складає $6'..10^{\circ}$ [65, с.453]. Перевагою даного методу є можливість отримання абсолютного відліку та простота використання; недоліками – зношування провідної доріжки та відносно низька точність. Потенціометричні сенсори кута випускає, наприклад, "Megatron". Відхилення від лінійності для них становить 0,1%.

Відсутність механічного зношування провідної доріжки властива оптоелектронним безконтактним потенціометрам на основі позиційно-чутливих фотопотенціометрів чи функціональних фоторезисторів [50]. Теоретичним дослідженням та практичною реалізацією цих пристроїв займалися С.В. Свечніков, А.К. Смовж та ін. Вихідна напруга фотопотенціометра визначається положенням світлового зонду, що формується за допомогою оптичної системи, механічно спряженої з вхідною віссю пристрою.

Перевагами такого підходу є відсутність тертя електричних контактів, відсутність механічного гістерезису, можливість герметизації конструктивних елементів, можливість роботи в агресивних середовищах та вакуумі, висока роздільна здатність, чутливість та надійність. Водночас недоліками оптоелектронних безконтактних потенціометрів є відносно низька точність (відхилення від лінійності $-0,2\%$) та складна конструкція [50, с.154].

Ємнісні сенсори кута використовують залежність ємності плоского чи циліндричного конденсатора від взаємного перекриття його обкладин. Перевагою ємнісних сенсорів кута є малі механічні зусилля, проста технологія виготовлення, відсутність рухомих контактів (в окремих випадках одна рухома щітка). Трудністю застосування цього принципу є вимірювання невеликої робочої ємності на фоні паразитної ємності такого ж порядку, великі вимоги до опору ізоляції та вплив дестабілізуючих факторів [3]. Групі дослідників із Інституту електродинаміки (Ф.Б. Гриневич, М.Н. Сурду, А.С. Левицький, А.І. Новік) вдалося подолати ці труднощі, застосовуючи спеціальні електроди-екрани, диференційний спосіб ввімкнення електродів та багатосекційні схеми розміщення електродів [23]. Використання принципу електричної редуції дає змогу суттєво підвищити точність ємнісних сенсорів кута завдяки зменшенню діапазону вимірювання каналу точного відліку та зменшенню впливу похибок виготовлення окремої секції сенсора. Таким чином, вдалося зменшити похибку ємніснів до $1''$ [23, с.151]. Обмеженням ємнісних сенсорів є складність їх взаємодії з цифровою ІВС та чутливість до електромагнітних завад.

Синусно-косинусний поворотний трансформатор – електрична мікромашина змінного струму, призначена для перетворення кута повороту φ в напругу, амплітудою пропорційною синусу та косинусу кута повороту φ [4]. Точні поворотні трансформатори, окрім каналу грубого відліку, можуть мати канал точного відліку, сигнал якого змінюється декілька разів за оберт валу. Похибка обертових трансформаторів без електричної редуції може знаходитися в межах $\pm 20'' \dots \pm 10'$ [52, с.223]. Похибку систем на основі обертових трансформаторів із електричною редуцією зменшують до $1''$ [22, с.322].

Перевагою синусно-косинусних поворотних трансформаторів як сенсорів кута є безконтактне вимірювання, потенційно висока точність та стійкість до жорстких умов експлуатації (вібрація, пил, волога, іонізуюче випромінювання). Використання обертових трансформаторів обмежується складністю їх виготовлення та спряження з цифровою системою керування.

Одним із різновидів поворотних трансформаторів є індуктосини – багатополюсні оборотні трансформатори з торцевими друкованими обмотками. Дослідженням індуктосинів займалися А.А. Ахметжанов, Л.М. Сафонов та ін. Схеми спряження індуктосинів із ІВС розглядаються в роботі В.Г. Домрачова та ін. [22]. Можливість використання великих коефіцієнтів електричної редуції, усереднення похибок виконання окремих провідників та близькість функції коефіцієнту взаємоіндукції до синусоїди дає змогу зменшувати межу похибки до декількох кутових секунд [48, с.7]. Перевагами індуктосинів є висока точність, нечутливість до ексцентриситету диска та стійкість до впливів жорстких умов експлуатації. Недоліками – чутливість до електромагнітних завад [48, с.58] та складна обробка сигналу. Індуктосини серійно випускає корпорація Inductosyn International.

Магнітний сенсор кута використовує принцип вимірювання, заснований на визначенні напрямку магнітного поля постійного магніту, прикріпленого до ротора за допомогою двох взаємоперпендикулярно розміщених сенсорів Хола [54, с.294]. Перевагою цього методу є малі розміри перетворювача, надійність та стійкість до забруднень; недоліком – низька точність (похибка – $\pm 20'$).

Сенсори лінійних та кутових переміщень на основі магнітних шкал засновані на використанні кільця з магнітотвердого матеріалу, на яке нанесена магнітна шкала, що зчитується голівкою, чутливою до залишкової намагніченості [17, с.31]. Два вихідні парафазні гармонічні сигнали інтерполюються для отримання вищої роздільної здатності. Такі сенсори випускають "RLS" та "Heidenhain". Перевагами використання магнітної шкали, в порівнянні з оптичною, є краща стійкість до забруднень. Недоліками – нижча точність, накопичення феромагнітного пилу та небезпека розмагнічування шкали.

Недоліків попереднього методу вимірювання позбавлена технологія AMOSIN, яка використовує індуктивний принцип вимірювання лінійних та кутових переміщень. За вимірювальну шкалу слугує стрічка з нержавіючої сталі, на яку фотолітографічним методом нанесено рисунок зон з різним магнітним опором. Ця послідовність зчитується за допомогою декількох мікрокотушок, виконаних в підкладці головки зчитування. Похибка інкрементних сенсорів кута лежить в межах $\pm 3'' \dots \pm 50''$, абсолютних – $\pm 3'' \dots \pm 30''$ [69]. Перевагами даного методу є висока точність та стійкість до зовнішніх впливів; недоліками – високі вимоги до точності виготовлення та монтажу.

Високої точності вимірювання кутових та лінійних переміщень дозволяють досягнути електроакустичні методи. В основі роботи сенсорів переміщення на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) лежить використання концентричної лінії затримки на ПАХ з рухомим приймачем ПАХ [29]. У хвилеводі, виконаному у вигляді тонкої плівки ZnO на поверхні кварцу, збуджують ПАХ. Положення рухомого приймача можна визначити за фазовим зсувом вихідного сигналу. В Україні дослідженням електроакустичних перетворювачів переміщення займається Я.І. Лепіх та ін. Серед переваг методу – відносно висока точність та малі габарити.

Принцип роботи сенсора кута повороту на основі методу просторової модуляції полягає в тому, що кутове положення визначають за зміщенням променя, відбитого від прикріпленого до об'єкта просторового модулятора у формі Архімедової спіралі. Положення світлової плями відбитого променя фіксують за допомогою позиційно-чутливого детектора, що складається з чотирьох світлочутливих ділянок, ввімкнених у диференційному режимі [6; 28; 66]. Перевагами даного способу є повна відсутність контакту, високі динамічні характеристики, можливість вимірювання кутової швидкості, биття та вібрацій. Недоліком способу є велика похибка вимірів ($\pm 0,8\%$). Розробкою та впровадженням методів контролю обертального руху на основі просторової модуляції займаються М.Й. Юкиш, Й.Й. Білінський, В.О. Поджаренко, В.В. Кухарчук.

Принцип дії оптоелектронних інкрементних сенсорів кута (растрових інтерполяторів) полягає у модуляції світлового потоку

за допомогою оптично спряжених вимірювального та індикаторного растру [11, с.62; 21, с. 396]. При обертанні диска з нанесеним концентричним вимірювальним растром світловий потік від освітлювача до фотоприймача модулюється растровим спряженням і перетворюється у два зсунені на чверть періоду растру гармонічні або прямокутні сигнали. Гармонічні сигнали можуть бути інтерпольовані внутрішньою або зовнішньою схемою для отримання роздільної здатності, вищої за період растру. Доступні оптоелектронні інкрементні сенсори кута з похибкою від часток кутових секунд [26, с.66] до декількох мінут. До переваг таких сенсорів слід віднести високу точність, відсутність тертя між растрами, нечутливість до електромагнітних завад; до недоліків – ймовірність помилок підрахунку імпульсів, складна технологія виготовлення та високі вимоги до умов експлуатації [14; 17].

Для визначення положення інкрементні сенсори кута можуть передбачати додатковий канал мітки, який генерує один чи декілька імпульсів на період обертання – такі сенсори називають квазіабсолютними. Абсолютне положення осі визначають підраховуючи кількість імпульсів, отриманих після сигналу мітки. Для визначення абсолютного положення після ввімкнення живлення вісь сенсора слід повертати до перетину з міткою, що недопустимо для деяких застосувань.

На відміну від інкрементних, оптоелектронні сенсори абсолютного кута (перетворювачі зчитування) визначають положення осі зчитуючи код, нанесений на одну або декілька доріжок диска, що дає змогу отримувати інформацію про положення осі зразу ж після ввімкнення. Щоб виключити грубі помилки зчитування, для кодового диску використовують код Грея, який характерний тим, що сусідні кодові комбінації відрізняються лише в одному розряді (рис. 1.1 а) [21; 15; 17; 18; 65]. Недоліком такого сенсора є складність отримання високої роздільної здатності в обмежених габаритах сенсора [97]. Оптична схема зчитування для більше як 14 доріжок та розмірів диска до 100 мм надто ускладнюється [14, с.78].

Щоб обійти це обмеження, деякі сенсори підвищують роздільну здатність інтерполюючи сигнал, отриманий з останньої кодової чи додаткової інкрементної доріжки [99; 14, с.78]. Перевагою сенсорів кута на основі коду Грея є можливість

отримати інформацію про абсолютне положення осі та висока роздільна здатність; недоліком – складна конструкція та високі вимоги до точності виготовлення.

Варіантом побудови перетворювачів зчитування є суміщення кодової маски і світлочутливих елементів в одній мікросхемі – кодовому фотоприймачі, який складається з концентричних світлочутливих доріжок, замаскованих світлонепроникною маскою з вікнами у відповідності до коду Грея [25, с.75; 1; 34; 2]. Структура освітлюється смугою світла, що проникає крізь щільну рухомої діафрагми, зв'язаної з віссю сенсора. Вихідний цифровий сигнал формується компараторами за струмом світлочутливих доріжок. Інтерполяція сигналу останньої кодової доріжки дозволяє зменшити похибку визначення положення світлового зонда до 0,1 мкм [25, с.81]. Кодові багатоелементні фотоприймачі для лінійних та кутових переміщень досліджувалися колективом Інституту напівпровідників під керівництвом С.В. Свєчнікова, а також П.Ф. Олексенком, Ю.В. Ушеніним, Н.Е. Конюховим, Л.Н. Преснухіним та ін. Недоліком способу є потреба використання габаритної спец-мікросхеми та складність забезпечення часової та температурної стабільності показів [25, с.84].

Ідея зменшення кількості кодових доріжок перетворювачів зчитування реалізується в одnodоріжкових кодових дисках. Відома кодова послідовність, що може бути зчитана лише з однієї доріжки за допомогою чутливих елементів, точно розміщених за периметром диска [87; 63] (рис. 1.1 б). Основною властивістю такої послідовності є те, що всі стовпці матриці, в рядках якої записані кодові слова послідовності, можна отримати шляхом циклічного зсуву першого стовпця. В роботах Т. Етзона (Т.К. Etzion), К. Патерсона (К.Г. Paterson) та М. Шварца (М. Schwartz) описано спосіб отримання послідовності таких кодів, що володіє властивостями коду Грея, довжиною $2^n - 2n$ слів (n довжина слова) [79; 102]. Розробкою та впровадженням одnorядкових кодових дисків для станків із програмним керуванням також займався Ю.С. Шарін. Недоліком сенсорів на основі одnorядкового коду Грея є технологічна складність точного розміщення чутливих елементів, що суттєво обмежує його роздільну здатність.

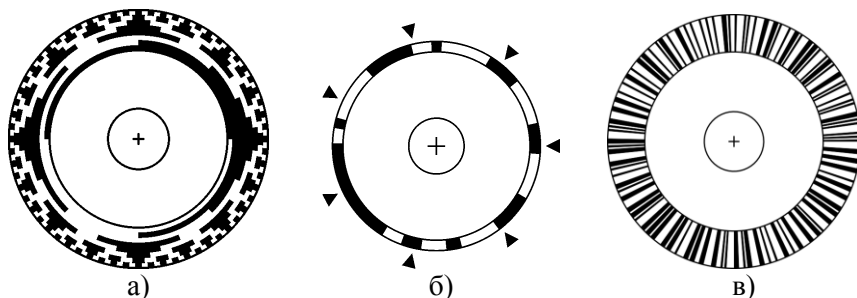


Рис. 1.1. Кодовий диск на основі класичного коду Грея (а), одноріжкового коду Грея (б) та псевдовипадкової послідовності (в)

В.Е. Jones та К. Zia запропонували альтернативний спосіб створення оптоелектронних сенсорів кута та переміщення на основі однієї кодової доріжки з символів псевдовипадкової послідовності [88]. На прозорий диск наносять доріжку, що складається з символів послідовності, закодованої прозорими та непрозорими секторами різної ширини (рис. 1.1 в). За допомогою світлодіода фрагмент кодової доріжки проектується на ОБФП, розміщений поперек секторів. Отримане зображення аналізується мікроконтролером, при цьому грубий відлік кута визначається кодовою комбінацією на диску, а точний – врахуванням зміщення елементів коду відносно початку відліку ОБФП [90]. Модифікації способу також дозволяють визначати положення за двома координатами [81], об'єднують інкрементальний та абсолютний відлік [93] чи відрізняються способом кодування диска [98; 96]. Розробкою сенсорів кута на основі псевдовипадкової кодової послідовності займалися Е.М. Petriu [101], М. Arsić, D. Denić, I. Randelović, М. Rančić, G. Miljković, [70; 75; 76; 77], Johnston [94], М. Durana [100] та ін. Перевагами сенсорів кута на основі ПВП є простота схеми, можливість роботи при великих похибках закріплення диска та ОБФП, а також застосування простих технологій та доступних серійних компонентів. Обмеженнями методу є похибки вимірювання, спричинені недоліками методу локалізації меж секторів, ексцентриситетом та люфтом в опорах осі

диска. Сенсори кута на основі псевдовипадкової послідовності випускають "USDigital", "Renishaw", "Heidenhain" та ін.

Розглянуті методи вимірювання кута можна класифікувати за декількома ознаками: відліком, діапазоном вимірювання, вихідним сигналом, фізичним принципом. Класифікація сенсорів кута, наведена в [15; 22; 66], не включає методів, що з'явилися за останні роки, і тому потребує розширення. Запропонована класифікація зображена на рис. 1.2, а в табл. 1.1 наведено порівняльний аналіз методів вимірювання кутових координат.

В жорстких умовах експлуатації (забруднення, вібрації, екстремальні температурні впливи) та за високих вимог до точності використовуються синусно-косинусні обертові трансформатори, індуктосини, ємнісини, сенсори на основі магнітних дисків та технології AMOSIN. За використання високих коефіцієнтів редукації ці технології дають змогу досягнути похибки одиниць кутових секунд. Сфера застосувань цих технологій – промислова автоматика, аерокосмічна та військова галузі. Їхніми спільними недоліками є складність застосовуваних схем спряження та висока вартість, а для деяких також властива чутливість до електромагнітних завад.

За умови високих вимог до точності та відсутності забруднень і вібрацій застосовують оптикоелектронні растрові інтерполятори, за необхідності доповнюючи їх каналом грубого відліку. Серед їхніх переваг – нечутливість до електромагнітних завад, можливість отримання високих коефіцієнтів редукації та інтерполяції, що дає змогу зменшувати похибку до часток кутової секунди. Основна сфера застосування – лабораторне обладнання, теодоліти, стенди для перевірки, промислове обладнання для чистих виробництв. Обмеження – висока вартість та високі вимоги до умов експлуатації.

Класифікація сенсорів кута

- ▣ За отриманим відліком
 - └ Абсолютні
 - └ Відносні
- ▣ За діапазоном вимірювання
 - └ Неповнооборотні
 - └ Однооборотні
 - └ Багатооборотні
- ▣ За вихідним сигналом
 - └ Аналогові
 - └ Цифрові
- ▣ За фізичним принципом
 - ▣ Потенціометричні
 - └ Механічні потенціометри
 - └ Фотопотенціометри
 - └ Ємнісні (Ємнісини)
 - ▣ Індуктивні
 - └ Синусно-косинусні обертові трансформатори
 - └ Індуктосини
 - └ AMOSIN
 - └ Фазові перетворювачі кута із обертовими модуляторами
 - ▣ Магнітні
 - └ На основі шкал із магнітотвердого матеріалу
 - └ На основі вимірювання напрямку магнітного поля
 - └ Електроакустичні (ПАХ)
 - ▣ Оптиелектронні
 - └ Просторової модуляції
 - └ Растровий інтерполятор
 - └ Багатодоріжковий кодовий диск
 - └ Ондодоріжковий кодовий диск
 - └ На основі псевдовипадкової послідовності

Рис. 1.2. Класифікація методів вимірювання кута

За умови невисоких вимог до точності (десятки кутових мінут) широко використовуються сенсори на основі вимірювання напрямку магнітного поля та потенціометричні сенсори.

Основними їхніми перевагами є малі габарити та низька ціна. Сфера застосування – пакування, промислова автоматизація та альтернативна енергетика.

Таблиця 1.1 **Характеристики методів вимірювання кута**

Метод	Тип	Похибка, "	Простота виготовлення	Простота взаємодії	Компактність	Стійкість до е.м. завад	Стійкість до забруднень	Стійкість до феромаг. пилу	Стійкість до радіації	Стійкість до вібрації, ударів	Зносостійкість
Потенціометричний	A	360	+	+	+	-	±	+	+	-	-
Ємнісний	I, A	<1	±	-	±	-	+	+	+	+	+
СКВТ	I, A	1..2 0	-	?	±	-	+	+	+	+	+
Індуктосин	I, A	1	-	?	-	+	+	+	+	+	+
AMOSIN	I, A	3	-	+	-	-	+	+	-	+	+
Магнітне кільце	I, A	6	-	+	-	-	+	-	-	+	+
Напряма маг. поля	A	900	+	+	+	+	+	-	-	+	+
ПАХ	I, A	60	+	+	+	+		+	+		+
Прост. модуляція	A	2,8°	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Оптичні растрові	I	<1	-	+	-	±	-	+	-	-	+
Багатодоріжкові	A	40	±	+	±	+	-	+	-	±	+
Грей+інтерполяція	A	40	-	+	±	±	-	+	-	±	+

ПВП	A	100	+	+	±	+	±	+	-	±	+
Renishaw ПВП	A	0,5 2	-	+	±	+	+	+	-	±	+
ПВП та растр	A	1	-	+	-	±	-	+	-	-	+

В середніх по точності кутових вимірюваннях (частки мінути – одиниці мінут) набули поширення оптоелектронні сенсори на основі багаторядкових та однорядкових кодових дисків. Сфера застосування цих сенсорів – системи наведення дзеркальних антен, промислова автоматика, підйомно-транспортні машини та ін. Перевагами цих методів є нечутливість до електромагнітних завад, простота технології виготовлення та порівняно висока точність. Обмеження – чутливість до похибок виготовлення та складні оптичні схеми, що обмежують точність та збільшують ціну сенсорів.

Розвиток автоматизації в промисловості, збільшення кількості наземних станцій супутникового зв'язку та застосування антен із вузькою діаграмою направленості підвищує вимоги до похибки та ціни сенсорів кута середньої точності. Тому актуальним питанням є удосконалення схем та методів обробки вимірювальної інформації оптоелектронних сенсорів кута на основі ПВП з метою зменшення похибки та послаблення вимог до складності оптичної схеми та точності виготовлення механічних вузлів.

1.3 Інтелектуалізація сенсорів

В зв'язку з розвитком вимірювально-інформаційних систем стало можливим виконання складних обчислень вже в самому сенсорі, що дає змогу підняти точність вимірювання за рахунок складних алгоритмів обробки сигналів. Застосування мікропроцесорів і комп'ютерів в вимірювально-інформаційних та керуючих системах дозволяє суттєво розширити можливості приладів, наділяючи їх рядом можливостей, недоступних для схем на жорсткій логіці [40]. Серед них [33; 36, 24, 16]:

- лінеаризація, масштабування та нормалізація вимірювальних сигналів приведення результатів вимірювання [31, с.56];

- розрахунок вторинних параметрів, статистична обробка [31, с.58];
- вираховування значень вихідних сигналів за математичною моделлю при відсутності необхідної інформації;
- автоматичне калібрування вимірювальних каналів [31, с.42];
- компенсація похибок сенсорів програмним шляхом, адаптація до набутих внутрішніх дефектів [33, с.49];
- автодіагностика, метрологічний супровід, контроль власної працездатності, виявлення артефактів; [31, с.57-59];
- інтелектуальна взаємодія з цифровою вимірювально-інформаційною системою через інформаційні канали зв'язку [33, с.49];
- сервісні функції, інтерактивний діалог із оператором [31, с.63];
- зміна параметрів сенсора та алгоритмів керування відповідно до зміни стану середовища чи об'єкта контролю, адаптація вимірювального алгоритму до технологічного процесу, прийняття рішень в реальному часі;
- врахування не тільки теперішнього стану об'єкта, а і його передісторії, формування і поповнення баз знань про об'єкт контролю [31, с.65-67].

Основною особливістю інтелектуальних сенсорів є те, що засіб обробки інформації входить до складу вимірювального кола і приймає безпосередню участь в одержуванні результату вимірювання, виконуючи функції, які до цього виконував оператор [33, с.43; 16]. Інтелектуалізація сенсорів дає змогу досягнути вищої роздільної здатності та точності вимірювання, компенсації дії зовнішніх впливів, однозначності результатів вимірювання, простоти отримання та інтерпретації результату, можливості контролю працездатності сенсора в реальному часі.

Водночас, інтелектуалізація збільшує складність розробки сенсора, підвищує вимоги до алгоритмів функціонування та програмного забезпечення обробки сигналів. Покращення технічних характеристик сенсорів передбачає не тільки використання сучасних ефективних мікропроцесорних засобів, але й удосконалення схем та алгоритмів обробки інформації.

Отже, інтелектуальний сенсор – це перетворювач, що автоматично узгоджує власні параметри з параметрами джерела сигналу та зовнішніми умовами, а також автоматично контролює

власне функціонування і компенсує завади шляхом попередньої обробки вхідної інформації. Використання інтелектуальних сенсорів дає можливість проводити попередню обробку і аналіз інформації на місці її одержання, передаючи в центральний процесор вже опрацьовані результати вимірювань. Такий підхід не тільки розвантажує обчислювальні ресурси центрального процесора, а й збільшує гнучкість та стійкість вимірювально-інформаційної системи.

1.4 Методи локалізації перепадів яскравості

Важливою задачею проектування оптоелектронних сенсорів кута на основі однодоріжкових дисків є вибір методу локалізації перепадів інтенсивності. Значна частина похибок пов'язана саме з недосконалістю цього методу.

Перепад інтенсивності – перехідна зона, що лежить на межі між двома областями з різною інтенсивністю [8; 13; 19]. Перепади інтенсивності часто пов'язані з межами об'єктів і можуть бути основою для сегментації зображення, класифікації виділених об'єктів та вимірювання їхнього взаємного положення [8; 13; 19; 49; 53].

Як модель перепаду яскравості використовують ступінчасту функцію (step function) (рис. 1.3 а) [106; 49]. Проте перепади яскравості на реальних зображеннях виявляються розмитими, тому краще моделюються лінійнозмінною функцією (ramp function) (рис. 1.3 б) [13]. Оптичні системи можуть складатися з багатьох елементів, кожний з яких вносить свій вклад в розмивання зображення. Аналогом центральної граничної теореми в оптиці є твердження, що сумарний вплив багатьох оптичних передавальних ланок наближається до Гаусового розмивання (рис. 1.3 в) [8]. Виявлення перепадів яскравості ускладнюється тим, що зображення спотворені адитивним та мультиплікативним шумом, а перепади можуть змінюватися по величині та протяжності.

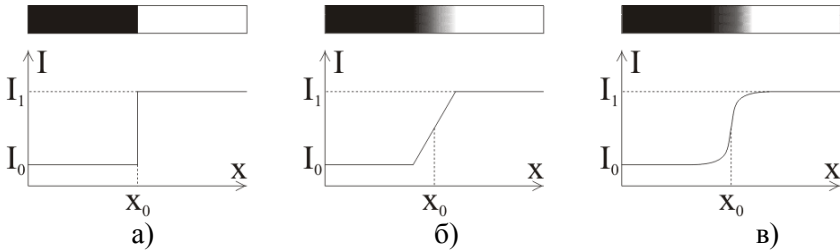


Рис. 1.3. Моделі одновимірних перепадів яскравості

Локалізація перепадів інтенсивності (edge detection) – метод обробки зображень, призначений виявляти різкі перепади інтенсивності в одно- та двовимірних зображеннях. Метод локалізації перепадів перетворює вхідне півтонове зображення в карту точок, що належать межах між ділянками з різною інтенсивністю. При цьому ідеальний детектор повинен вказувати на наявність перепаду в єдиній точці, що відповідає центру границі.

Локалізація перепадів та сегментація зображення є одними з найпоширеніших методів обробки зображення. Локалізація перепадів дозволяє відкинути інформацію про розподіл освітленості в межах об'єкта, зменшивши таким чином вплив умов освітлення та положення камери на результати розпізнавання [55]. Від точності та надійності локалізації перепадів значною мірою залежить якість всієї оптико-електронної системи.

Методи локалізації перепадів висвітлювали в своїх працях Л.П. Ярославський, Я.А. Фурман, В.А. Сойфер, Дж. Превітт (J.M.S. Prewitt), У. Претт (W.K. Pratt), Л. Робертс, (L.G. Roberts), Дж.Ф. Кенні (J. F. Canny), Ж. Понс (J. Ponce), Д. Форсайт (D. Forthys), Т. Павлідіс, Б.П. Русин, Й.Й. Білінський та ін. Обширний аналіз та класифікація методів локалізації перепадів приведений в роботах Мена [91], Васильєва [12], Краснобаєва [27], Білінського [8] та ін.

Переважно автори зосереджують свою увагу на методах визначення меж у двовимірних зображеннях. Однак багато принципів двовимірних методів обробки можуть бути застосовані до локалізації перепадів в одновимірних зображеннях. Виходячи з

специфіки даної роботи зосередимо увагу на методах, придатних для виділення перепадів на одновимірних зображеннях.

Точки перепаду інтенсивності характеризуються швидкою зміною інтенсивності зображення, тому багато методів визначення країв ґрунтуються на аналізі значень першої чи другої похідної від функції інтенсивності по координаті. Як ознаку межової точки використовують максимум першої похідної або нуль другої похідної. Аналогом першої похідної для двовимірного простору є оператор градієнту, а другої – оператор Лапласа.

Оскільки цифрова обробка зображень має справу з дискретизованими зображеннями, то кожна з реалізацій диференціальних детекторів меж використовує дискретне наближення операторів диференціювання. Для віднаходження компонентів градієнта оператор Робертса використовує згортку зображення з матрицею 2×2 , оператори Превітта та Собела – з матрицями 3×3 . Далі результати накладання маски використовуються для обчислення модуля та напрямку градієнта. Через ресурсоємність точного обчислення цих параметрів інколи їх замінюють сумою модулів або використовують модифіковані матриці, що дають максимальний відклик для певної орієнтації межі [19]. Модуль та напрямок градієнту, обчислені для кожної точки зображення, шляхом порогової обробки об'єднують в контури зображення.

Одновимірне дискретне диференціювання може бути виконане шляхом обчислення виразу (1.1) для всіх точок зображення

$$E'(x) = E(x + 1) - E(x - 1), \quad (1.1)$$

де $E(x)$ – інтенсивність пікселя x .

Лапласіан двовимірної функції визначається як сума других похідних по координатах

$$\nabla^2 E = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}.$$

Дискретне наближення лапласіана може бути обчислене за формулою

$$\nabla^2 E = E(x+1, y) + E(x-1, y) + E(x, y+1) + E(x, y-1) - 4E(x, y).$$

Дискретне наближення одновимірного двократного диференціювання можна обчислити за формулою

$$E''(x) = E'(x+1) - E'(x) = E(x+2) - 2E(x+1) + E(x).$$

Недоліком диференціальних операторів як детекторів перепадів є їхня надмірна чутливість до шуму. Для зменшення впливу шуму реальні зображення попередньо фільтрують. Як ядро згладжування, часто використовують гаусіан [19; 53]

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

де x, y – координати; σ – параметр розмивання.

Хоча гаусіан – не єдине ядро згладжування, однак він володіє рядом корисних властивостей і тому використовується найчастіше. Двовимірне ядро фільтру Гауса є відокремлюваним – згортка з ним може бути замінена на почергову згортку з двома еквівалентними одновимірними ядрами. Результат згортки двох гаусіанів – гаусіан, що дозволяє досягати великого ступеня розмиття послідовно застосовуючи малі ядра [53].

На основі використання розмиття Гауса та другої похідної заснований метод LoG (Laplacian of Gaussian) – ядро оператора Лапласа та гаусіан попередньо згортають, після чого цим композитним оператором обробляють зображення для виявлення меж в точках перетину нульового рівня. Недоліком цього методу є некоректна поведінка в точках перетину ліній та складність визначення точок перетину нульового рівня [53].

Дж. Кенні показав, що ефективним наближенням до оптимального фільтру є похідна гаусіана. Реалізація детектора Кенні передбачає згладжування, диференціювання, придушення немаксимальних пікселів та порогову обробку з гістерезисом [73]. Перевагою детектора Кенні є висока стійкість до шуму та виділення "слабких" меж. Недоліками – висока обчислювальна

складність, некоректна поведінка в точках розгалужень контурів, згладжування кутів та дрібних елементів зображення. [8]

Пороговий метод базується на розділенні всього зображення на об'єкт та фон виходячи з яскравості пікселів [8; 19; 32; 67]. Довільний піксель зображення вважають належним фону чи об'єкту в залежності від його яскравості

$$E'(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } E(x, y) < E_{TH} \\ 1, & \text{якщо } E(x, y) \geq E_{TH} \end{cases}$$

де E , E' – вхідне та бінаризоване зображення; E_{TH} – поріг бінаризації.

Основною трудностю методу є правильний вибір порогу бінаризації. В багатьох випадках вдається отримати контрастні зображення об'єктів на відносно однорідному фоні: сканування друкованого тексту, фото біологічних препаратів, технічний контроль. Якщо розглядати гістограму такого зображення, то можна побачити, що яскравості пікселів зосереджені навколо двох переважаючих значень, що дозволяє визначити поріг як довільне значення між двома піками. На практиці гістограми спотворені шумом та неоднорідністю фону та об'єкта, що ускладнює процедуру визначення порогу. В такому випадку гістограму апроксимують деякою гладкою кривою і шукають її мінімум [19; 32]. Незважаючи на очевидні недоліки методу порогової обробки (високі вимоги до контрасту зображень, складність вибору порогу), він знаходить застосування для обробки простих зображень за умови високих вимог до швидкодії.

Нейромережеві методи передбачають створення та навчання штучної нейромережі, здатної виявляти різкі перепади інтенсивності на двовимірних зображеннях. Наприклад, нейромережа, описана в [71], має структуру багат шарового перцептрону з 9 нейронів вхідного шару, 12 нейронів прихованого шару та 1 вихідного нейрону, кожний з яких використовує сигмоїдну функцію активації. На вхід мережі подають значення інтенсивності з рухомої маски 3×3 пікселів, а сигнал вихідного нейрона вважають значенням інтенсивності перепаду для центрального пікселя маски. Після навчання за методом зворотного

поширення помилки нейромережа спроможна виявляти перепади інтенсивності навіть на сильнозашумлених та складноструктурованих зображеннях.

Вибір розміру пікселя передбачає компроміс між роздільною здатністю і передавальною функцією з однієї сторони та динамічним діапазоном і рівнем шумів із іншої. Зменшення розмірів пікселів стримує не тільки технологія виготовлення інтегральних мікросхем, але й корпускулярно-хвильова природа світла: із зменшенням розміру пікселя зменшується його чутливість, зростають шуми, яскравіше проявляються дифракційні явища [74; 64]. Скінченні розміри пікселів і зростаючі вимоги до точності вимагають розробки методів визначення положення перепадів яскравості з точністю, вищою за крок пікселів.

Найпростішим методом субпіксельної локалізації перепаду є виконання лінійної інтерполяції інтенсивності пікселів і пошуку їх перетину з деяким пороговим рівнем E_{TH} , який приймають рівним половині величини перепаду (рис. 1.4 а) [78; 80; 103; 8]. Координату перепаду x_e розраховують за формулою

$$x_e = x_0 + \frac{E_{TH} - E_0}{E_1 - E_0} \cdot (x_1 - x_0), \quad (1.2)$$

де x_0, x_1 – координати сусідніх пікселів; E_0, E_1 – їх інтенсивності.

Недоліком методу лінійної інтерполяції є відносно низька точність локалізації. Кращу точність можна отримати, використавши поліноміальну (сплайн) інтерполяцію [109; 110]. На першому етапі цього методу за допомогою градієнтного методу наближено визначають координати перепаду яскравості. На другому – положення перепаду уточнюють інтерполюючи значення градієнту поліномами. Платою за підвищення точності є збільшення витрати процесорного часу.

Ідея методу фотометричної інтерполяція полягає в заміні реального перепаду ідеальним із такою ж площею (рис. 1.4 б). Координату перепаду знаходять виходячи з такої залежності

$$(x_1 - x_e) \cdot (E_1 - E_0) = \int_{x_0}^{x_1} (E(x) - E_0) dx,$$

де $E(x)$ – інтенсивність зображення як функція координати.

Оскільки на практиці зображення дискретизується за допомогою пікселів, які інтегрують світловий потік по своїй площі, то координату перепаду можна знайти, замінивши інтеграл сумою відкликів пікселів.

$$x_e = x_1 - \frac{\sum_{n=n_0}^{n_1} (E_n - E_0)}{E_1 - E_0}, \quad (1.3)$$

де n_0, n_1 – номери пікселів x_0 та x_1 .

Перевагою цього методу є те, що розрахована координата перепаду залежить від інтенсивності зразу декількох пікселів, що зменшує чутливість до шуму; недоліком – складність визначення меж інтегрування x_0, x_1 та рівнів y_0, y_1 . Реальний перепад спотворений шумом, тому рівні y_0, y_1 мають усереднюватися для декількох пікселів, а x_0, x_1 мають розміщуватися симетрично навколо точки перепаду.

Оригінальний метод визначення перепаду яскравості з субпіксельною точністю запропонував Й.Й. Білінський [7; 8; 9]. Метод ґрунтується на припущенні, що оптична передавальна функція системи формування зображення близька до гаусоїди. За таких умов координату перепаду інтенсивності можна знайти як точку перетину двох примежових кривих, отриманих в результаті низькочастотної фільтрації за допомогою гаусового фільтра з спеціально підібраними коефіцієнтами. Точки вхідної та фільтрованої примежової кривої інтерполюють поліномами, а координату перепаду яскравості знаходять числовими методами як точку перетину цих поліномів (рис. 1.4 в). Для протяжних перепадів пропонується використовувати кусково-лінійну інтерполяцію, що зменшує затрати процесорного часу для визначення точки перетину примежових кривих [8, с.75]. Перевагою даного методу є висока точність визначення положення

краю, обмеженням – чутливість до форми оптичної передавальної функції та висока обчислювальна складність.

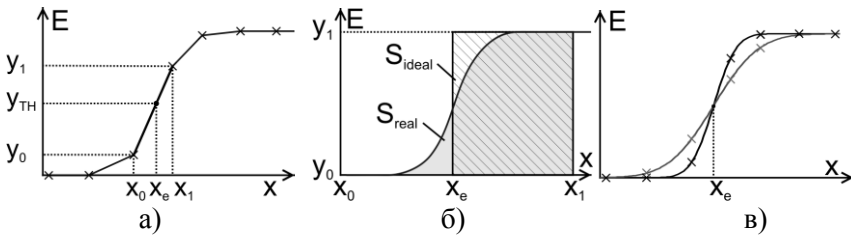


Рис. 1.4. Методи субпіксельного визначення перепадів
а) лінійна інтерполяція; б) фотометрична інтерполяція; в) метод Білінського

Незважаючи на доволі велику кількість праць, що висвітлюють питання визначення перепадів інтенсивності, досі не існує методу, оптимального для всіх застосувань. Одні методи демонструють високу швидкодню, другі – пропонують високу точність локалізації, треті – стійкість до шуму. Для оптимального вибору методу локалізації перепаду інтенсивності в даних умовах слід зважати на характер зображення, рівень шумів, швидкодню, необхідну точність та ін.

Додатковим питанням є дослідження якості детекторів перепадів. Для цього окрім експертних оцінок [86] також визначають точність локалізації [107; 108], стійкість в умовах шуму [89] чи ефективність для вирішення конкретної задачі.

Висновки до розділу 1

1. Означені параметри обертального руху, які виникає потреба контролювати. Розглянуті вимоги, що ставляться до сенсорів кута осей ОПП антенних систем.
2. Проаналізовано тенденції розвитку засобів вимірювання кута. З'ясовано, що завдяки високій точності, швидкодії, нечутливості до магнітних завад, відсутності контакту перспективними є оптоелектронні засоби вимірювання кутів. Водночас їх використання ускладнене високими вимогами до точності механічних вузлів та складністю оптичної схеми.
3. Проаналізовані методи локалізації перепадів інтенсивності дво- та одновимірних зображень. З'ясовано, що пороговий метод

знаходить застосування для опрацювання простих, контрастних зображень за умови високих вимог до швидкодії. Встановлено, що основним обмеженням методу є його низька точність.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА

У другому розділі проаналізовано основні фактори, що впливають на точність визначення кутового положення та запропоновано математичну модель, що відтворює механічну та оптичну схему сенсора кута і дозволяє оцінити вплив дестабілізуючих факторів на результуючу похибку вимірювання. Схема сенсора кута удосконалена шляхом використання двох ОБФП, що дозволило зменшити вплив ексцентриситету та випадкових зміщень диска.

2.1 Принцип роботи оптоелектронного сенсора кута

Будова оптоелектронного сенсора кута схематично представлена на рис. 2.1 [78]. До осі 1, що вільно обертається в опорах 2, прикріплений диск 3, на який нанесена кодова послідовність із прозорих та непрозорих секторів різної ширини. Вздовж хорди диска розміщують однорядковий ОБФП 4. За допомогою точкового джерела світла 5 зображення кодової доріжки проектується на світлочутливу поверхню одновимірного ОБФП у послідовність світлих та темних смуг, притому кодову послідовність будують таким чином, що будь-який фрагмент послідовності секторів, який проектується на ОБФП, зустрічається лише раз для всієї кодової послідовності. Далі за отриманим з ОБФП зображенням кодового диска (рис. 2.2) визначають ширини тіней секторів, в залежності від яких кожен смугу інтерпретують певним символом. Знайшовши входження розпізнаного фрагменту в кодовій послідовності, отримують кутову ширину та зміщення кожного з видимих секторів відносно початку відліку диска (сектора 0) (рис. 2.3 а). Далі, уточнюють положення сектора, що проектується на початок відліку ОБФП і, використовуючи інформацію про кут при вершині сектора, визначають кут φ_C між його межею та початком відліку ОБФП (рис. 2.3 б). Оскільки кут φ_C – малий, то при його визначенні дуги l_a та l_w можна замінити на відповідні їм відрізки a та w , що відсікаються межами секторів на ОБФП. Тоді шуканий кут φ_C рівний

$$\varphi_c = \alpha_s \frac{l_c}{l_s} \cdot \quad (2.1)$$

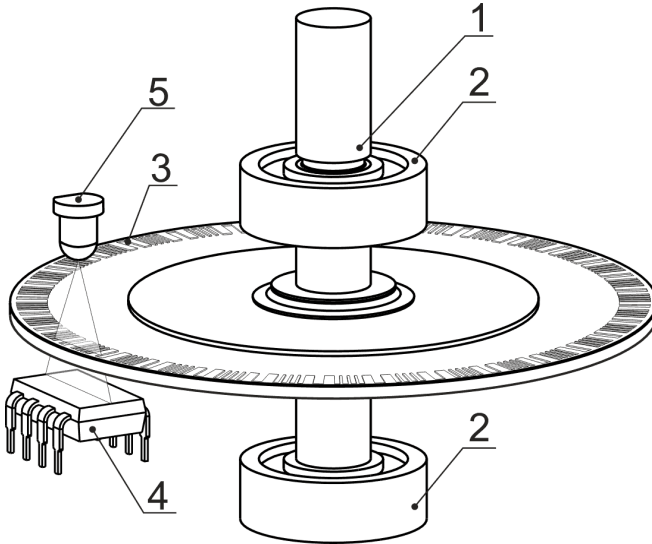


Рис. 2.1. Функціональна схема оптоелектронного сенсора кута

Кутове положення диска φ можна визначити шляхом додавання кута φ_s , між початком відліку диска і межею сектора, що проектується на центр ОБФП, та кута φ_c , між межею центрального сектора та центром ОБФП.

$$\varphi = \varphi_s + \varphi_c \cdot$$

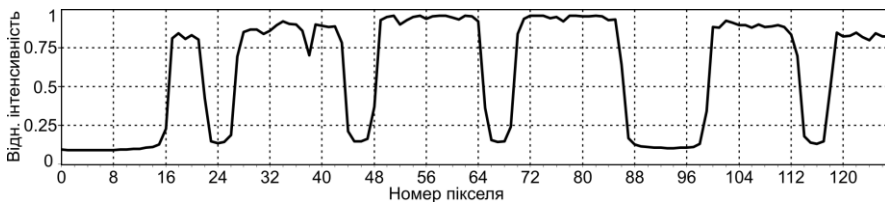
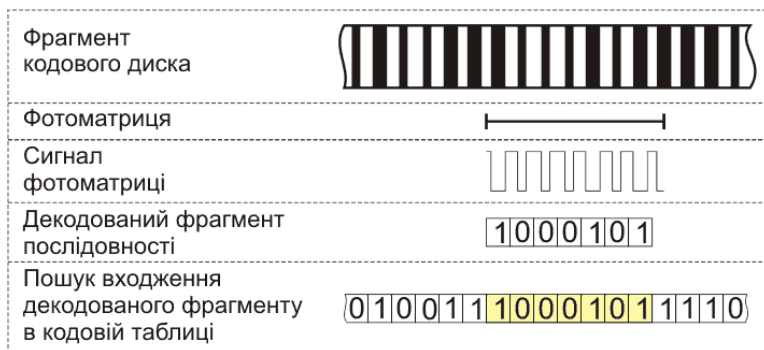
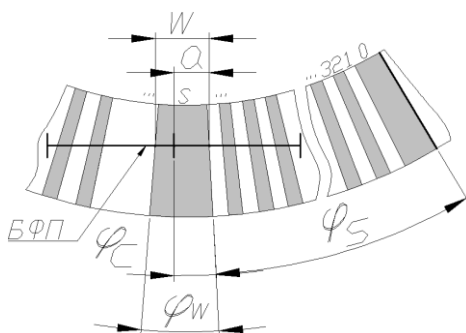


Рис. 2.2. Зображення, отримане з ОБФП



а)



б)

Рис. 2.3. Схема визначення положення: грубий а) та точний б) відлік

2.2 Імітаційне моделювання оптоелектронного сенсора кута

Результуюча точність визначення кутового положення залежить від геометричних параметрів сенсора кута, похибок його виготовлення та методу визначення кутового положення. Для дослідження впливу факторів, що спричиняють похибки, та методів їх компенсації створена модель сенсора кута (рис. 2.4) [44]. Вхідними параметрами моделі є кутове положення кодового диска ω_z , взаємне положення ОБФП, освітлювача та кодового диска, а вихідними – координати s_0, s_1 меж тіней секторів, що проєктуються на початок відліку ОБФП. Далі, розраховані координати обробляються модулем визначення положення осі, а визначене кутове положення ω'_z порівнюється з істинним – їхню різницю прийматимемо за похибку вимірювання.

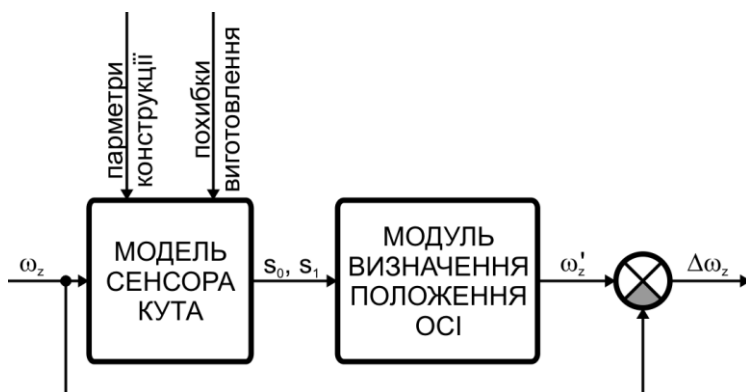


Рис. 2.4. Схема моделювання похибок сенсора кута

Моделювання оптико-механічних вузлів сенсора кута. Розглянемо детальніше модель сенсора кута (рис. 2.5). Введемо праву декартову систему координат $Oxyz$ так, щоб початок відліку співпадав із центром ОБФП, вісь абсцис була напрямлена вздовж осі ОБФП, а освітлювач L лежав в площині xOz . Рухому систему координат $Duvw$ зв'яжемо з кодовим диском: початок координат D помістимо в точку перетину осі обертання з площиною диска, вісь u направимо до початку відліку диска, вісь v сумістимо з

площиною диска, вважатимемо, що вісь обертання співпадає з віссю w .

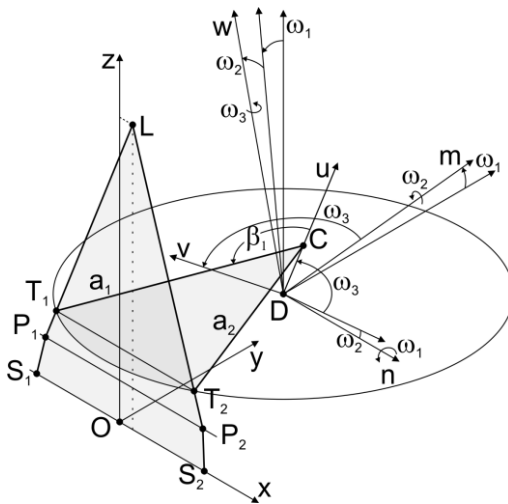


Рис. 2.5. Схема розрахунку координат меж тіней секторів

Ексцентриситет кодової послідовності моделюватимемо шляхом зміщення центру кодової послідовності (точки C) вздовж осі u на відстань C_u від осі обертання. В системі координат $Duvw$ координати точки $C=(C_u, 0, 0)^T$ (верхній індекс T позначає операцію транспонування).

Систему координат $Duvw$ можна отримати з системи $Oxuz$ шляхом паралельного переносу \overline{OD} , повороту на кут ω_1 навколо осі n , на кут ω_2 навколо осі m та на кут ω_3 навколо осі w . Отже, для знаходження координат точки C в системі $Oxuz$ слід помножити вектор-стовбець координат точки C в системі $Duvw$ на матриці повороту навколо осей w, m, n та додати вектор-стовбець координат точки D в системі $Oxuz$.

$$C_{xyz} = R_{\omega_1, n} \cdot R_{\omega_2, m} \cdot R_{\omega_3, w} \cdot C_{uvw} + D_{xyz} \quad (2.2)$$

де C_{xyz} вектор-стовбець координати точки C в системі $Oxuz$;

$R_{\omega_1, n}$ матриця повороту на кут ω_1 навколо осі n ;
 $R_{\omega_2, m}$ матриця повороту на кут ω_2 навколо осі m ;
 $R_{\omega_3, w}$ матриця повороту на кут ω_3 навколо осі w ;
 C_{uvw} вектор-стовбець координат точки C в системі $Duvw$;
 D_{xyz} вектор-стовбець координати точки D в системі $Oxyz$.
 Матриці повороту осей мають такий вигляд: [68, с.77; 30, с.53]

$$\begin{aligned}
 R_{\omega_1, n} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_1 & -\sin \omega_1 \\ 0 & \sin \omega_1 & \cos \omega_1 \end{pmatrix}, \\
 R_{\omega_2, m} &= \begin{pmatrix} \cos \omega_2 & 0 & \sin \omega_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega_2 & 0 & \cos \omega_2 \end{pmatrix}, \\
 R_{\omega_3, w} &= \begin{pmatrix} \cos \omega_3 & -\sin \omega_3 & 0 \\ \sin \omega_3 & \cos \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Сектор кодової послідовності, що проектується на початок відліку ОБФП, моделюватимемо за допомогою прямих a_1 та a_2 , що проходять через точку C , паралельно напрямним векторам r_1 та r_2 . Подальші розрахунки приведені для межі сектора a_1 . Формули для межі a_2 співпадають з точністю до заміни індексів $1 \rightarrow 2$. Оскільки кут між початком відліку кодового диска і межею сектора рівний β_1 , то координати напрямного вектора r_1 в системі $Duvw$ відповідно рівні

$$r_{1uvw} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 \\ \sin \beta_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{2.4}$$

Оскільки паралельне перенесення системи координат не змінює проєкцій вектора, то перетворення координат вектора в систему координат $Oxyz$ зводиться до множення вектор-стовпця r_{1uvw} на матриці повороту навколо осей w, m, n .

$$\mathbf{r}_{1xyz} = \mathbf{R}_{\omega_1, n} \cdot \mathbf{R}_{\omega_2, m} \cdot \mathbf{R}_{\omega_3, w} \cdot \mathbf{r}_{1uvw}, \quad (2.5)$$

де r_{1xyz} та r_{1uvw} – координати вектора \mathbf{r}_1 в системах координат Oxyz та Duvw.

В координатній системі Oxyz пряма a_1 описується такими рівняннями:

$$\frac{x - C_x}{r_{1x}} = \frac{y - C_y}{r_{1y}} = \frac{z - C_z}{r_{1z}}, \quad (2.6)$$

де C_x, C_y, C_z – координати точки C в с.к. Oxyz
 r_{1x}, r_{1y}, r_{1z} – координати напрямного вектора межі сектора в с.к. Oxyz

Далі, знайдемо точку T_1 перетину прямої a_1 із площиною xOz. Для цього сумісно розв'яжемо рівняння (2.6) та рівняння площини xOz ($y=0$). Координати точки T_1 відповідно будуть рівними

$$\mathbf{T}_{1xyz} = \begin{pmatrix} C_x - C_y \frac{r_{1x}}{r_{1y}} \\ 0 \\ C_x - C_y \frac{r_{1z}}{r_{1y}} \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Щоб знайти координати меж тіней секторів, що проєктуються на ОБФП, промодельємо поширення світла від точкового освітлювача L через точки T_1 та T_2 , що відповідають межам сектора, до поверхні корпусу ОБФП (точки P_1 та P_2) і далі до світлочутливої поверхні ОБФП (точки S_1 та S_2) (рис. 2.6).

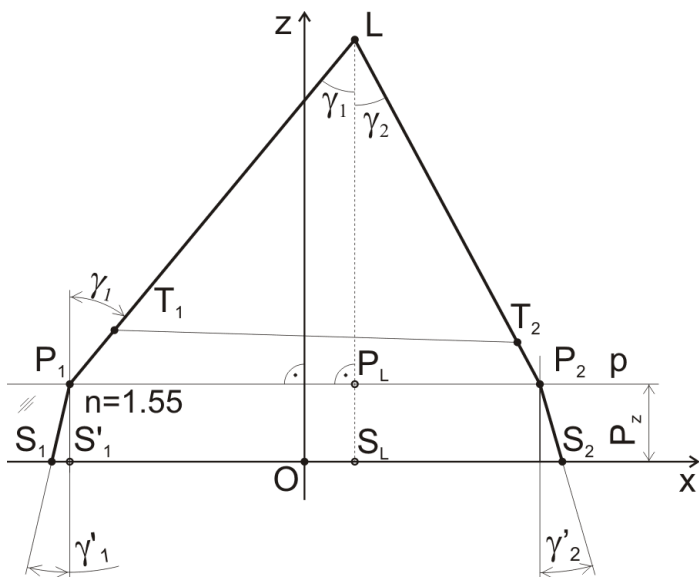


Рис. 2.6. Проектування сектора на поверхню ОБФП

Абсцису P_{1x} точки заломлення P_1 шукаємо сумісно розв'язавши рівняння прямої LT_1 та прямої p , яка є лінією перетину площини поверхні корпусу та координатної площини xOz (вважаємо p паралельною до осі абсцис)

$$\begin{cases} \frac{x - L_x}{T_{1x} - L_x} = \frac{z - L_z}{T_{1z} - L_z}, \\ z = P_z \end{cases}$$

звідки

$$P_{1x} = \frac{L_z - P_z}{L_z - T_{1z}} \cdot T_{1x} + \frac{P_z - T_{1z}}{L_z - T_{1z}} \cdot L_x, \quad (2.8)$$

де P_{1x} – абсциса точки заломлення променя, що проходить крізь межу сектора;
 P_z – апліката лінії перетину площини корпусу та xOz ;

T_{1x}, T_{1z} – координати точок перетину межі сектора та площини xOz ;

L_x, L_z – координати освітлювача.

При проходженні крізь поверхню корпусу світловий промінь заломлюється і, згідно з законом Снеліуса, синус кута падаючого променя в n раз більший за синус кута заломленого променя.

$$\sin \gamma_1 = n \cdot \sin \gamma'_1,$$

де γ_1, γ'_1 – кути падаючого та заломленого променя;
 n – коефіцієнт заломлення матеріалу корпусу.

Знайшовши з трикутників LP_1P_1 та $P_1S'_1S_1$ значення синусів кутів γ_1 та γ'_1 , підставляємо їх в попередній вираз, отримуємо

$$\frac{L_x - P_{1x}}{\sqrt{(L_x - P_{1x})^2 + (L_z - P_{1z})^2}} = n \frac{S'_1 S_1}{\sqrt{S'^2_1 S_1^2 + P_z^2}}.$$

Розв'язавши останнє рівняння відносно $S'_1 S_1$, отримуємо

$$S'_1 S_1 = \pm \frac{P_{1z} \cdot (L_x - P_{1x})}{\sqrt{(L_x - P_{1x})^2 \cdot (n^2 - 1) + (L_z - P_{1z})^2 \cdot n^2}}.$$

Шукана координата межі тіні сектора (абсциса точки S_1) рівна

$$S_{1x} = P_{1x} - \frac{P_{1z} \cdot (L_x - P_{1x})}{\sqrt{(L_x - P_{1x})^2 \cdot (n^2 - 1) + (L_z - P_{1z})^2 \cdot n^2}}. \quad (2.9)$$

Абсцису точки S_2 можна знайти за такими ж залежностями (з точністю до заміни індексів $1 \rightarrow 2$).

Модуль визначення положення. Користуючись залежностями (2.2-2.9) разом із таблицею кутових координат меж секторів (кути β_i), можна визначити індекси секторів, що проектується на поверхню ОБФП та положення тіней секторів відносно початку відліку ОБФП. Результати розрахунків передаються модулю визначення положення, який за кутами β_1, β_2

та координатами S_{1x} , S_{2x} відновлює кутове положення диска (кут ω_z') за такою формулою

$$\omega_z' = \beta_1 - \frac{S_{1x}}{S_{2x} - S_{1x}}(\beta_2 - \beta_1). \quad (2.10)$$

Похибка визначення кута знаходиться як різниця визначеного та заданого кутового положення

$$\Delta\omega = \omega_z' - \omega_z. \quad (2.11)$$

Результати моделювання. Якщо задатися параметрами сенсора та змінювати ω_z в межах $0..360^\circ$, то можемо отримати графіки зміни абсолютної похибки в діапазоні вимірювань. Результати моделювання похибки приведені на рис. 2.7. Геометричні параметри сенсора були прийняті такими:

Координати центру кодового диска \mathbf{D}_{xyz} , мм $(0\ 23,5\ 2)^T$

Координати освітлювача \mathbf{L}_{xyz} , мм..... $(0\ 0\ 12)^T$

Товщина корпусу ОБФП P_z , мм..... 1

Коефіцієнт заломлення матеріалу корпусу ОБФП n 1,55

Здані похибки виготовлення для побудови графіків зведені в табл. 2.1.

Результати моделювання показують, що сталі зміщення диска приводять до адитивної похибки визначення кута, яка легко виключається при початковій установці сенсора. Ексцентриситет кодової послідовності спричинює похибку відхилення від лінійності передавальної характеристики сенсора, що змінюється за законом синуса.

Таблиця 2.1.

Задані похибки виготовлення та результати моделювання

Графік	Зміщення центру ΔC_{xyz} , мм	Зміщення освітлювача ΔL_{xyz} , мм	Ексцентриситет, C , мм	Нахил осі диска $\Delta \omega_{xy}$, °	Середнє значення $\Delta \omega_z$, '	Амплітуда $\Delta \omega_z$, '
a	$(0; 0; 0)^T$	$(0; 0; 0)^T$	0	$(0; 0)^T$	0;0	0,0
b	$(0,25;0,5;0)^T$	$(0; 0; 0)^T$	0	$(0; 0)^T$	35,8	0,0
c	$(0,25;0,5;0)^T$	$(0,2;0,1;0,1)^T$	0	$(0; 0)^T$	31,8	0,0
d	$(0,25;0,5;0)^T$	$(0,2;0,1;0,1)^T$	0,2	$(0; 0)^T$	31,9	28,7
e	$(0,25;0,5;0)^T$	$(0,2;0,1;0,1)^T$	0,2	$(1; 1)^T$	32,9	28,7

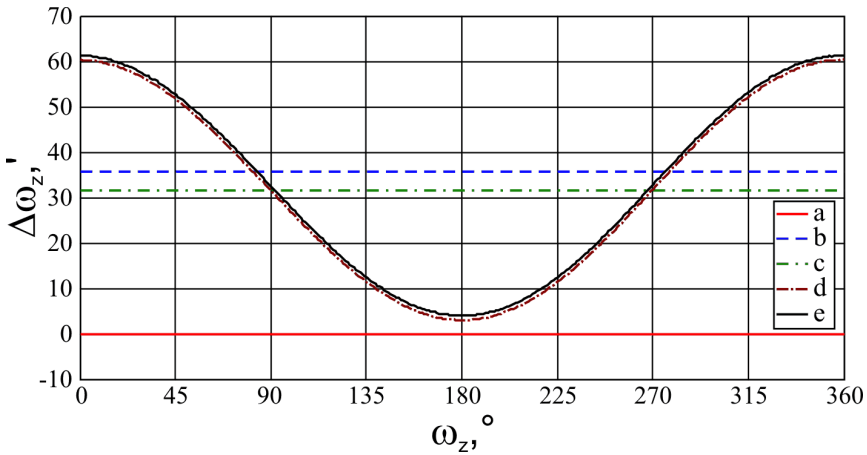


Рис. 2.7. Зміна похибки визначення кута

На рис. 2.8 представлені графіки залежності похибки визначення кута в залежності від зміщення диска, зміщення освітлювача, ексцентриситету та перекосу осі.

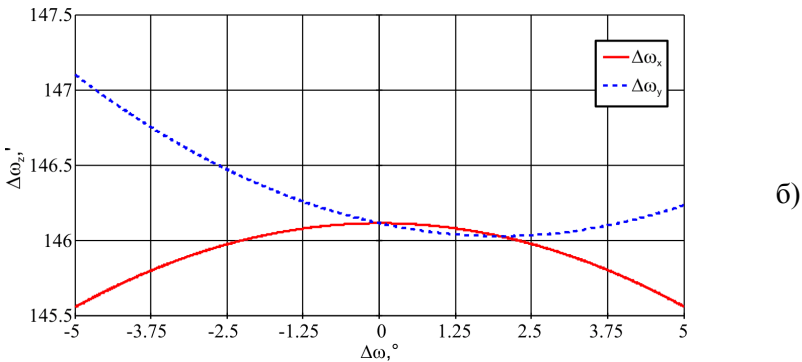
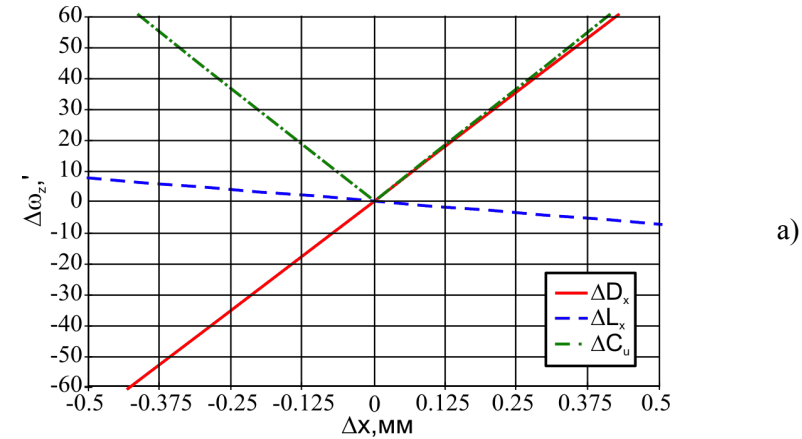


Рис. 2.8. Залежність похибки від зміщень а) та перекосу осі б)

2.3 Метод виключення механічних похибок

В підрозділі 2.2 описана модель сенсора кута, за допомогою якої було встановлено, що механічні похибки виготовлення спричинюють два типи похибок: постійні зміщення диска та освітлювача вводять адитивну похибку, а ексцентриситет кодової послідовності спричинює відхилення від лінійності передавальної характеристики сенсора кута. В той час як адитивні похибки легко виключаються під час прив'язки сенсора до об'єкта вимірювання, виключення похибки відхилення від лінійності вимагає складної (а

тому і дорогої) процедури калібрування. Більше того, випадкові зміщення диска, спричинені зазорами в опорах, за такої схеми вимірювання не можуть бути передбачені і скомпенсовані. Постає питання: чи існує схема вимірювання кутового положення, нечутлива до поперечного зміщення кодової послідовності? Наступний розділ дає ствердну відповідь на це запитання.

2.3.1 Сенсор кута, нечутливий до зміщення осі кодового диска

На рис. 2.9 приведена схема сенсора кута, нечутливого до необертового зміщення кодового диска [92; 42; 44; 45; 57]. Компенсація впливу зміщення осі кодового диска досягається шляхом паралельної обробки зображень, отриманих із двох діаметрально протилежно розміщених ОБФП. Метод полягає у зміні знаку систематичної похибки при зміні положення ОБФП [35, с.114].

Використання протилежно розміщених ОБФП для компенсації ексцентриситету та зміщень диску також запропоноване у [94], однак метод, описаний Johnston, передбачає визначення положення незалежно за обома каналами з подальшим алгебраїчним усередненням. Недоліком згаданого методу є можливість отримання некоректного результату для положень, близьких до 0, та більша чутливість до зміщення диску в напрямку, перпендикулярному осі ОБФП.

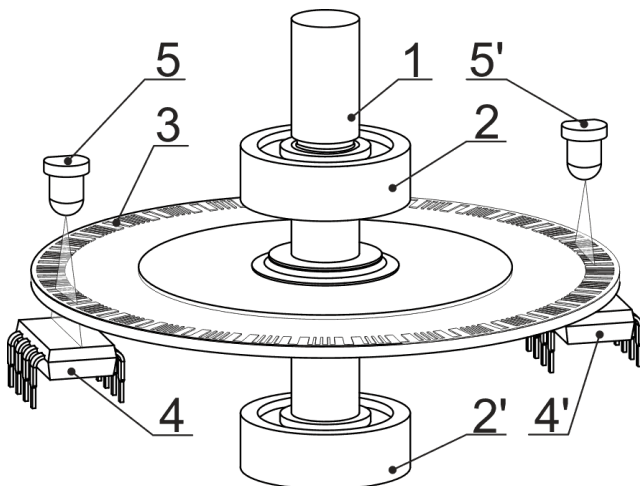


Рис. 2.9. Будова сенсора кута, нечутливого до зміщення осі диска

Розглянемо схему визначення кутового положення кодового диска за проєкціями секторів на два протилежні ОБФП (рис. 2.10). Введемо системи координат xOy та $x'O'y'$ зв'язані відповідно з першим та другим ОБФП так, що початки відріку O та O' суміщені з середніми пікселями ОБФП, а осі x та x' напрямлені вздовж осей ОБФП. Вважатимемо, система $x'O'y'$ повернута відносно xOy на 180° , а точка O' розміщена на осі y на віддалі d від осі x . Введемо координатну систему qCr так, що точка C суміщена з віссю кодової послідовності, а вісь r паралельна осі x . Нехай вісь u містить початок відріку кодового диска. Позначимо кут між віссю x та віссю u (шукане кутове положення) за ω , а кути між початком відріку диска та межами секторів, що проєктуються на центри ОБФП за $\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2$. Тоді S_1, S_2, S'_1, S'_2 – точки перетину меж секторів із координатними осями. Координати цих точок в системі qCr будуть рівні

$$\mathbf{S}_{1qr} = \begin{pmatrix} s_1 - C_x \\ -C_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{S}_{2qr} = \begin{pmatrix} s_2 - C_x \\ -C_y \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S}'_{1qr} = \begin{pmatrix} s'_1 - C_x \\ d - C_y \end{pmatrix} \quad \mathbf{S}'_{2qr} = \begin{pmatrix} s'_2 - C_x \\ d - C_y \end{pmatrix}$$

де $S_{1qr}..S_{2qr}$ координати точок $S_1..S_2$ в системі qCr ; s_1, s_2 – абсциси точок $S_1..S_2$ в системі xOy ; s'_1, s'_2 – абсциси точок $S'_1..S'_2$ в системі $x'O'y'$; C_x, C_y – координати точки C в системі xOy ; d – відстань між осями x та x' .

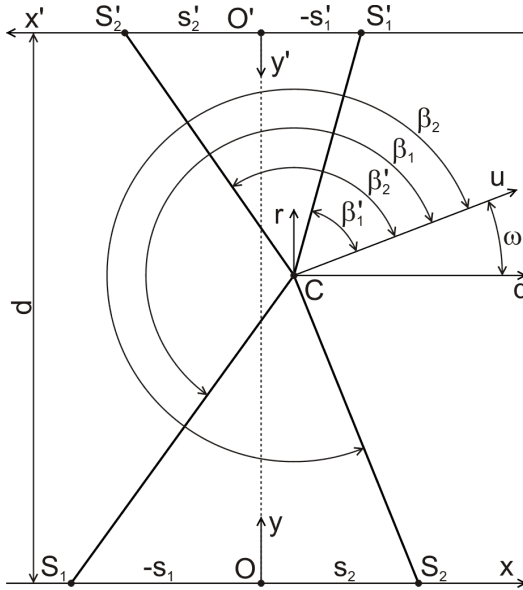


Рис. 2.10. Схема визначення позиції за двома ОБФП

Щоб знайти невідомий кут ω , розв'яжемо систему рівнянь, складену з виразів для котангенсів кутів $\omega + \beta_1.. \omega + \beta'_2$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{ctg}(\omega + \beta_1) = \frac{s_1 - C_x}{-C_y} \\ \operatorname{ctg}(\omega + \beta_2) = \frac{s_2 - C_x}{-C_y} \\ \operatorname{ctg}(\omega + \beta'_1) = \frac{s'_1 - C_x}{d - C_y} \\ \operatorname{ctg}(\omega + \beta'_2) = \frac{s'_2 - C_x}{d - C_y} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

За невідомі вважатимемо ω , C_x , C_y , d . Розв'язок системи (2.12) громіздкий і тому не приведений тут. Крім того, обчислення точного розв'язку (2.12) вимагає багато процесорного часу і тому малоприслатне для реалізації на МК. Для спрощення розв'язку лінеаризуємо функцію котангенса. Оскільки абсциси точок $S_1..S_2$ малі в порівнянні з C_y та $d - C_y$, то кути $\omega + \beta_1$ та $\omega + \beta_2$ близькі до $3\pi/2$, а кути $\omega + \beta'_1$, $\omega + \beta'_2$ близькі до $\pi/2$. Це дає змогу замінити котангенси на лінійні члени їх розкладу в ряд Тейлора в околі точок $3\pi/2$ та $\pi/2$:

$$\operatorname{ctg}(\alpha) \approx \frac{3\pi}{2} - \alpha, \quad \alpha \approx \frac{3\pi}{2},$$

$$\operatorname{ctg}(\alpha) \approx \frac{\pi}{2} - \alpha, \quad \alpha \approx \frac{\pi}{2}.$$

Таким чином система (2.12) перетворюється на таку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3\pi}{2} - (\omega + \beta_1) = \frac{s_1 - C_x}{-C_y} \\ \frac{3\pi}{2} - (\omega + \beta_2) = \frac{s_2 - C_x}{-C_y} \\ \frac{\pi}{2} - (\omega + \beta'_1) = \frac{s'_1 - C_x}{d - C_y} \\ \frac{\pi}{2} - (\omega + \beta'_2) = \frac{s'_2 - C_x}{d - C_y} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Звідки можемо знайти ω

$$\omega = \frac{\left(\left(\beta_2 - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot s_1 - \left(\beta_1 - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot s_2 \right) \cdot (\beta'_2 - \beta'_1) + \left(\left(\beta'_2 - \frac{\pi}{2} \right) \cdot s'_1 - \left(\beta'_1 - \frac{\pi}{2} \right) \cdot s'_2 \right) \cdot (\beta_2 - \beta_1)}{(s_2 - s_1) \cdot (\beta'_2 - \beta'_1) + (s'_2 - s'_1) \cdot (\beta_2 - \beta_1)} \quad (2.14)$$

Щоб врахувати періодичність тригонометричних функцій, значення кутів $\beta_1.. \beta_4$ корегують за такими правилами:

якщо $(\beta_1 < 5\pi/4)$ або $(\beta_1 > 7\pi/4)$ то

якщо $\beta_1 > 3\pi/2$, то $\beta_1 \leftarrow \beta_1 - 2\pi$;

якщо $\beta_2 > 3\pi/2$, то $\beta_2 \leftarrow \beta_2 - 2\pi$;

якщо $\beta_3 > \pi/2$, то $\beta_3 \leftarrow \beta_3 - 2\pi$;

якщо $\beta_4 > \pi/2$, то $\beta_4 \leftarrow \beta_4 - 2\pi$.

2.3.2 Імітаційне моделювання сенсора з двома ОБФП

Для перевірки ефективності визначення кутового положення диска за допомогою формули (2.14) доповнимо модель сенсора, описану в розділі 2.2, залежностями для визначення координат меж тіней секторів на додатковому ОБФП.

Введемо систему координат $O'x'y'z'$, зв'язану з другим ОБФП так, що точка O' співпадає з центральним пікселем ОБФП, вісь x' співпадає з віссю ОБФП і напрямлена протилежно до осі x , вісь z'

напрямлена до освітлювача, а площина $x'O'z'$ містить точку L' (рис. 2.11). Перетворення координат точки p в системі $Oxyz$ в координати системи $O'x'y'z'$ зводиться до паралельного переносу OO' та повороту навколо осей. Для перетворення координат вектора достатньо помножити його на матриці повороту

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{x'y'z'} &= \mathbf{R}_{x,-\varepsilon_1} \cdot \mathbf{R}_{y,-\varepsilon_2} \cdot \mathbf{R}_{z,-\varepsilon_3} \cdot (\mathbf{p}_{xyz} - \mathbf{O}'_{xyz}) \\ r_{x'y'z'} &= \mathbf{R}_{x,-\varepsilon_1} \cdot \mathbf{R}_{y,-\varepsilon_2} \cdot \mathbf{R}_{z,-\varepsilon_3} \cdot r_{xyz} \end{aligned}, \quad (2.15)$$

де $\mathbf{p}_{xyz}, \mathbf{p}_{x'y'z'}$ – координати точки p в системі $Oxyz$ та $O'x'y'z'$ відповідно;

$\mathbf{r}_{xyz}, \mathbf{r}_{x'y'z'}$ – координати вектора r в системі $Oxyz$ та $O'x'y'z'$ відповідно;

$\mathbf{R}_{x,-\varepsilon_1}, \mathbf{R}_{y,-\varepsilon_2}, \mathbf{R}_{z,-\varepsilon_3}$ – матриці повороту навколо відповідних осей (2.3);

\mathbf{O}'_{xyz} – координати точки O' в системі $Oxyz$.

Отже, використовуючи формули перетворення (2.15), можемо знайти координати точки C та напрямних векторів меж сектора, в координатній системі $O'x'y'z'$. Далі, за залежностями (2.7-2.9) можна знайти координати меж тіней в системі $O'x'y'z'$.

Результати розрахунків координат меж тіней разом із кутами $\beta_1, \beta_2, \beta'_1, \beta'_2$, між віссю, що містить початок відліку диска та межами секторів (рис. 2.11) передаються до модуля визначення кутового положення, який розраховує кутове положення диска (кут ω_z') за формулою (2.14). Порівнюючи задане та розраховане кутове положення можемо визначити абсолютну похибку вимірювання.

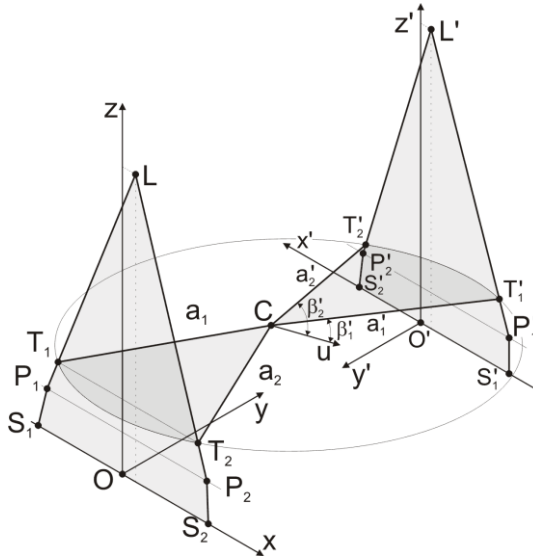


Рис. 2.11. Схема розрахунку координат меж тіней секторів на двох ОБФП

Заданося параметрами сенсора та розрахуємо зміну похибки вимірювання в діапазоні вимірювання.

Координати центру кодового диска D_{xyz} , мм $(0\ 23,5\ 2)^T$

Товщина корпусу ОБФП P_z, P'_z , мм 1

Коефіцієнт заломлення матеріалу корпусу ОБФП $n, n' \dots 1,55$

Координати освітлювача L_{xyz} , мм $(0\ 0\ 12)^T$

Координати центру додаткового ОБФП, мм..... $(0\ 47\ 0)^T$

Номинальний кут повороту додаткового ОБФП, ° $(0\ 0\ 180)^T$

В табл. 2.2 наведені похибки розміщення компонентів сенсора, середні значення та розраховані похибки визначення кута, що їм відповідають (наведені середнє значення та амплітуда похибки). На рис. 2.12 зображено графіки зміни похибки для вказаних в табл. 2.2 даних. Для порівняння приведений графік зміни похибки визначення кута за одним ОБФП (крива е).

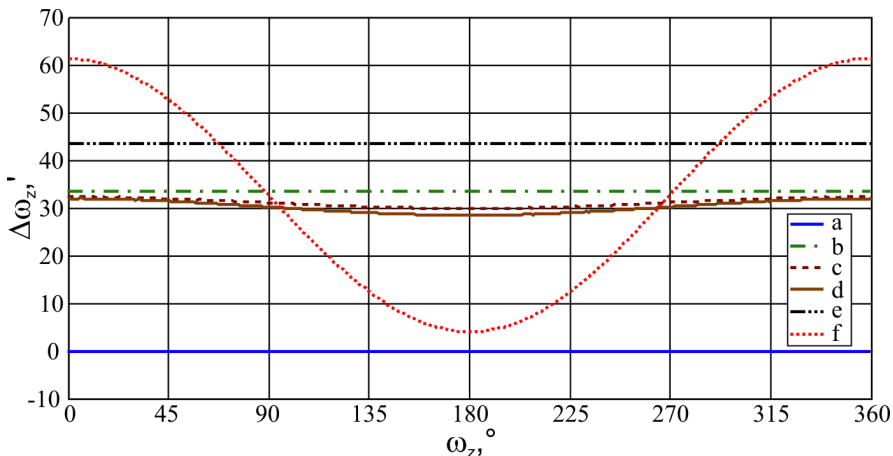


Рис. 2.12. Результати моделювання похибки визначення кута

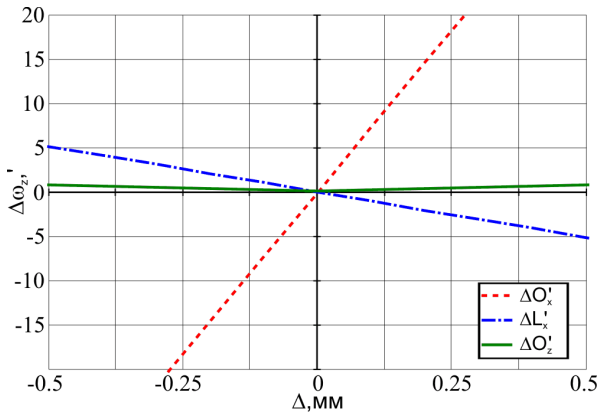
Аналізуючи графіки, можемо зробити такі висновки:

- якщо площина диска паралельна площині ОБФП, то зміщення кодового диска та ексцентриситет мало впливає на результуючу похибку (крива a);
- зміщення одного ОБФП відносно іншого приводить до адитивної похибки (крива b);
- нахил диска навколо осі ОБФП, та зміщення додаткового ОБФП вздовж осі z приводить до збільшення чутливості до ексцентриситету (криві c, d, e)

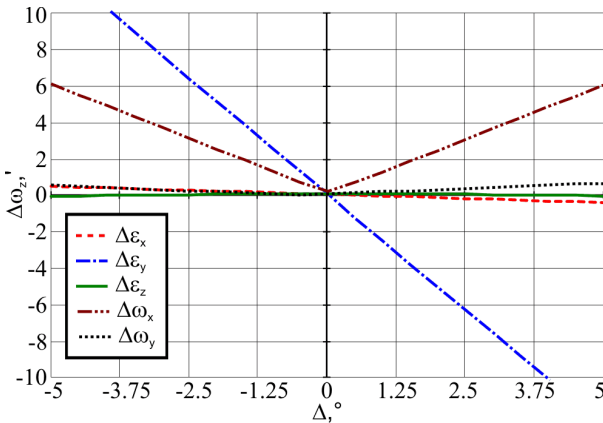
На рис. 2.13 а) приведені залежності постійної похибки від зміщення допоміжного ОБФП та освітлювача. На рис. 2.13 б) зображені графіки подвійної амплітуди похибки нелінійності, яка виникає при ексцентриситеті 0,2 мм в залежності від перекосів допоміжного ОБФП (криві $\Delta\epsilon_x$, $\Delta\epsilon_y$, $\Delta\epsilon_z$) та осі (криві $\Delta\omega_x$, $\Delta\omega_y$). Із графіків можна зробити висновок, що похибка нелінійності зростає при одночасній присутності ексцентриситету та перекосу осі або ОБФП.

Таблиця 2.2. Задані похибки виготовлення та результати моделювання

Графік	ΔC_{xyz} , мм	ΔL_{xyz} , мм	C, мм	$\Delta \omega_{xy}$, °	$\Delta O'_{xyz}$, мм	$\Delta \varepsilon_{xyz}$, °	$\Delta L'_{xyz}$, мм	$\Delta \omega_{z'}$, сер.	$\Delta \omega_{z'}$, (амп.)
a	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	0,2	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	0,0	0,1
b	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,2 \\ 0 \end{pmatrix}$	0,2	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	33,6	0,1
c	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,2 \\ 0,5 \end{pmatrix}$	0,2	$\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,5 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	31,4	1,1
d	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,2 \\ 0,5 \end{pmatrix}$	0,2	$\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,7 \\ 1 \\ 0,5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,5 \\ 1 \\ 0,8 \end{pmatrix}$	30,3	1,8
e	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,2 \\ 0,5 \end{pmatrix}$	0,0	$\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5 \\ 1 \\ 0,5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0,5 \\ 1 \\ 0,8 \end{pmatrix}$	43,6	0,0
f	$\begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,1 \\ 0,1 \end{pmatrix}$	0,2	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	-	-	-	32,9	28,7



а)



б)

Рис. 2.13. Залежність похибки від зміщень а) та перекосів осі б)

2.4 Вимірювання зміщення осі диска

В багатьох випадках безперервність процесу роботи обладнання чи важкодоступність місця встановлення сенсора кута ускладнюють періодичний профілактичний огляд та своєчасне виявлення метрологічної відмови, викликаной зношуванням опор осі. За таких умов важливою функцією сенсора є контроль

зношення опор та своєчасне інформування користувача про вихід зміщення осі сенсора за допустимі межі.

Відомий метод визначення зміщення осі диска, що передбачає нанесення на кодовий диск додаткової доріжки з концентричних кіл та використання додаткового детектора для визначення необертвого радіального чи осьового зміщення диска [95]. Недоліком такого методу є те, що він дозволяє фіксувати переміщення центру осі диска лише при його обертанні у ввімкненому стані – зразу ж після ввімкнення ця інформація відсутня. Окрім того, метод передбачає використання додаткових доріжок та детектора, що ускладнює конструкцію.

Використання двох діаметрально розміщених ОБФП, описане в пункті 2.3.1, окрім зменшення чутливості до радіального биття кодового диска, додатково дає змогу визначати зміщення осі кодової послідовності [38; 46]. Для цього достатньо розв'язати систему (2.13) відносно C_x :

$$C_x = -\frac{((\pi - \beta_1 + \beta'_2) \cdot s'_1 - (\pi - \beta_1 + \beta'_1) \cdot s'_2) \cdot s_2 + ((\pi - \beta_2 + \beta'_2) \cdot s'_1 - (\pi - \beta_2 + \beta'_1) \cdot s'_2) \cdot s_1}{(s_2 - s_1) \cdot (\beta'_2 - \beta'_1) + (s'_2 - s'_1) \cdot (\beta_2 - \beta_1)}, \quad (2.16)$$

де

C_x визначене зміщення осі кодової послідовності вздовж осі ОБФП;

$\beta_1.. \beta'_2$ кути відлічені від початку відліку диска до меж секторів, що проєктуються на початки відліку ОБФП;

$s_1..s'_2$ координати меж тіней секторів на ОБФП.

При цьому значення кутів корегуються за правилами, описаними в 2.3.1

Для перевірки методу, за допомогою математичної моделі описаної в пункті 2.3.2 визначали положення меж тіней секторів, що проєктуються на ОБФП [38]. Виходячи зі зміщення проєкцій секторів за формулою (2.16) розраховували зміщення осі диска. Результати розрахунку зміщення C_x для різних положень диска відображенні у вигляді графіка на рис. 2.14. Графік побудований для диску з ексцентриситетом кодової доріжки 0,2 мм, похибкою встановлення диску 0,25 мм, перекосом осі диска 1°, похибкою

встановлення додаткового ОБФП 0,5 мм, перекосом додаткового ОБФП 1°, похибкою встановлення освітлювачів 0,1 мм та 0,5 мм. Амплітуда отриманого графіку – 0,227 мм, середнє значення – 0,02 мм. Таким чином для розглянутого прикладу похибка визначення ексцентриситету становить

$$\varepsilon = \frac{0.227 \text{ мм} - 0.2 \text{ мм}}{0.2 \text{ мм}} \cdot 100\% = 14\% .$$

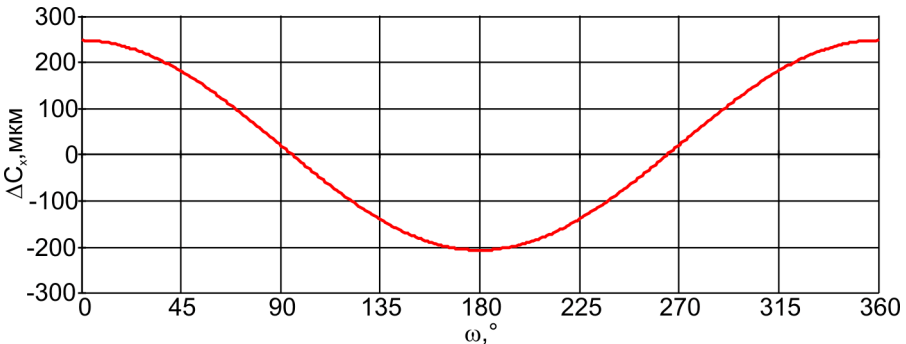


Рис. 2.14. Результати моделювання визначення зміщення осі

Запропонований метод визначення положення осі диска перевірили експериментально. Для цього отримували та опрацьовували зображення з двох діаметрально розміщених ОБФП дослідного взірця сенсора кута. Кутове положення та зміщення диска визначали за допомогою залежностей (2.14) та (2.16) виходячи зі зміщення меж тіней секторів на отриманих зображеннях. Результати розрахунку передавали на ЕОМ для подальшого аналізу. На рис. 2.15 зображено графік зміни зміщення осі диску, отриманий експериментально. Середнє значення виміряного зміщення осі 105 мкм, амплітуда – 49 мкм.

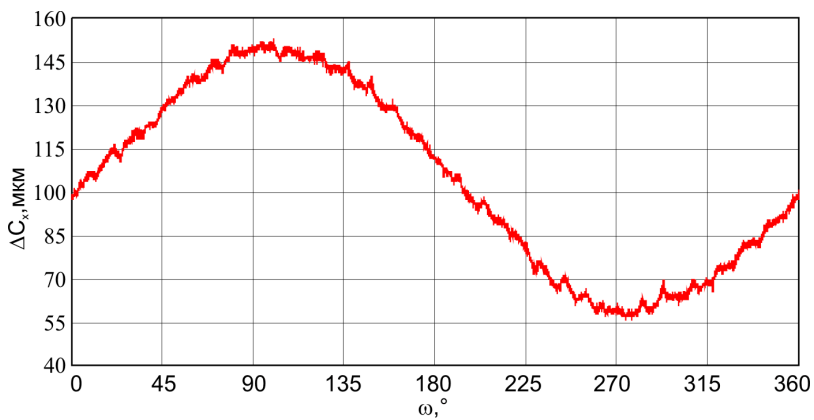


Рис. 2.15. Експериментально отриманий графік зміни координати центру диска

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕПАДІВ ІНТЕНСИВНОСТІ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ КУТА

У третьому розділі досліджено розподіл освітленості в зоні напівтіні секторів кодового диска сенсора кута. Запропоновано методика аналізу ефективності методів локалізації перепадів інтенсивності для одновимірних тіньових зображень та проаналізовано з її допомогою поширені методи субпіксельної локалізації перепаду інтенсивності для задач вимірювання кутових координат. Обґрунтовано використання попередньої гаусової фільтрації зображення для зменшення змінної складової похибки локалізації методом лінійної інтерполяції. Досліджено вплив параметрів методу лінійної інтерполяції фільтрованого зображення на змінну складову похибки локалізації.

3.1 Розрахунок освітленості в зоні тіні кодового диска

Як показано в пункті 2.3.2, точність визначення положення диска безпосередньо залежить від точності локалізації меж тіней секторів. Очевидним шляхом підвищення точності є зменшення розмірів пікселя, однак разом з цим зменшується його чутливість, зростають шуми, яскравіше проявляються дифракційні явища тощо [74]. Іншим шляхом до підвищення точності є застосування методів субпіксельної локалізації перепадів інтенсивності. Для аналізу та обґрунтованого вибору таких методів слід встановити розподіл освітленості в зоні напівтіні секторів диска.

Для моделювання процесу формування тіні сектора кодового диска скористаємося методами теоретичної фотометрії [39]. Прийmemo такі припущення:

- світлодіод моделюватимемо рівнояскравим чотирикутником $0,3 \times 0,3$ мм, що випромінює потік за законом Ламберта (яскравість не залежить від напрямку спостереження);
- ефект дифузного світіння корпусу врахуємо додаванням до потоку світлодіода потоку чотирикутного корпусу $0,5 \times 1,0$ мм відносно яскравістю 0,02 та фону відносно яскравістю 0,001 (рис. 3.1 б);

- втратами на поглинання та відбивання від оптичних поверхонь знехтуємо;
- заломлення в матеріалі диска знехтуємо;
- темні сектори вважатимемо абсолютно непрозорими, світлі – абсолютно прозорими.

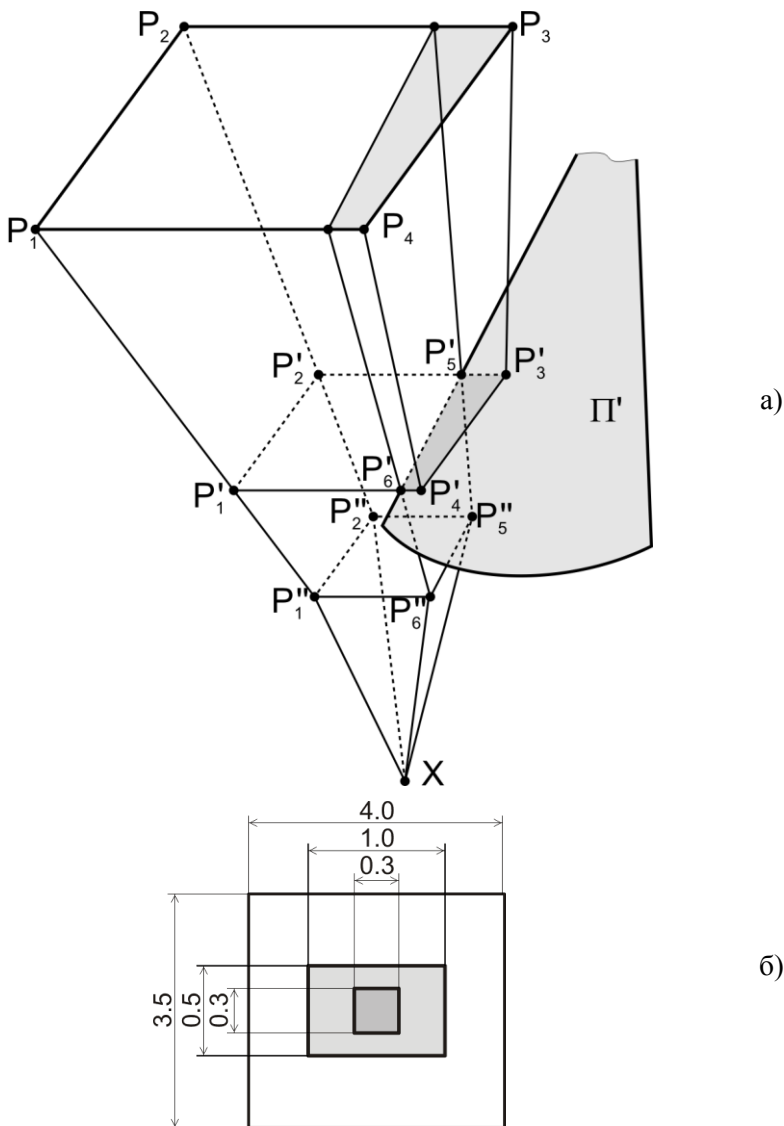


Рис. 3.1. Схема розрахунку світлового потоку в площині фотоматриці (а) та модель освітлювача (б)

Освітленість в довільній точці X фотоматриці можна розрахувати таким чином.

1. Використовуючи закони прямолінійного поширення та заломлення, побудувати хід пучка променів від поверхні світлодіода $P_1..P_4$ яскравістю B в точку X (рис. 3.1 а).
2. Знайти точки $P1'..P4'$ перетину пучка променів з площиною диска Π' .
3. Із чотирикутника $P1'..P4'$ прозорими секторами вирізати n -кутники $P'_{i,1}..P'_{i,n}$, які відповідають ділянкам світлодіода, що видимі з точки X .
4. В площині поверхні корпусу Π'' побудувати заломлене зображення знайдених n -кутників $P''_{i,1}..P''_{i,n}$.
5. Освітленість в точці X можна визначити, просумувавши елементарні освітленості dE , створювані частинами світлового пучка обмеженими елементарними тілесними кутами $d\omega$ по всьому тілесному куту світлового пучка ω . (рис. 3.2 а) [20]

$$E = \int_{\omega} dE = n \int_{\omega} B \cdot d\omega = \int_{\omega} B \cdot \cos(\theta) \cdot d\omega, \quad (3.1)$$

де

B – яскравість пучка;

$d\omega$ – вектор тілесного кута, що напрямлений з точки C в точку X і рівний по абсолютній величині тілесному куту $d\omega$;

n – вектор нормалі до освітленої поверхні в точці X ;

θ – кут між вектором n та $d\omega$.

Для рівнояскравого освітлювача інтеграл по тілесному куті ω (3.1) можна замінити на інтеграл по контуру L [20]:

$$E = \frac{B}{2} n \int_L da, \quad (3.2)$$

де L – контур, що обмежує поверхню освітлювача S ;

da – елементарні вектори які напрямлені вздовж зовнішньої нормалі бічної поверхні конуса світлового пучка і мають довжину

$d\alpha$ – кута при вершині елементарного рівнобедреного трикутника з основою dL і вершиною в точці X (рис. 3.2 б).

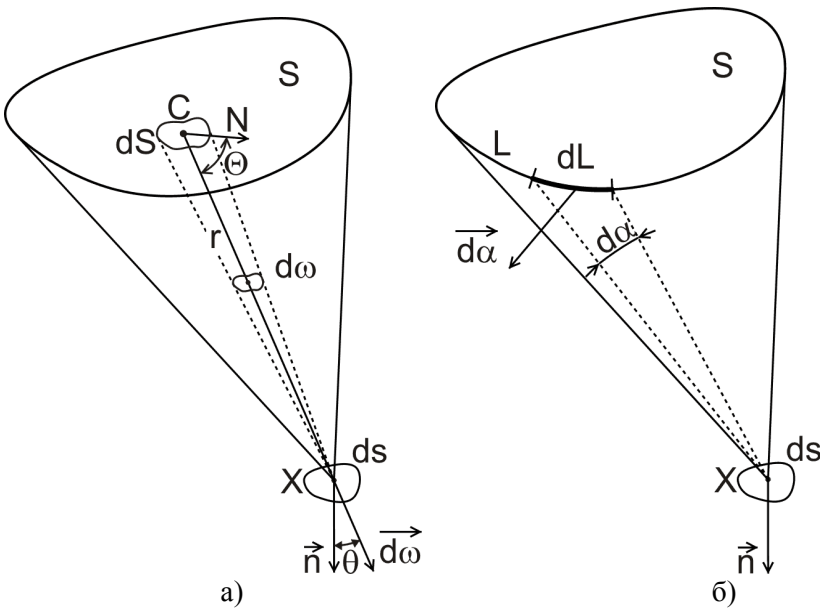


Рис. 3.2. Розрахунок світлового потоку від протяжного освітлювача а) – інтегрування по тілесному куту; б) – інтегрування по контуру

Оскільки освітлювач має форму багатокутника, то конус променів вироджується в піраміду, а інтегрування по контуру можна замінити на суму (3.3) [20]:

$$E = \frac{B}{2} n \sum_i \alpha_i, \tag{3.3}$$

де α_i – вектори рівні по абсолютній величині кутам при вершині піраміди і направлені вздовж зовнішніх нормалей її граней.

На рис. 3.3 а) показані результати розрахунку розподілу світлового поля в площині фотоматриці. Віддаль від матриці до диска 2 мм, від диска до світлодіода 8 мм. Товщина корпусу фотоматриці 1 мм. На графіку, зображеному на рис. 3.3 б), можемо

побачити, що зона напівтіні має вигляд ламаної. Різні кути нахилу перехідної зони відповідають впливу освітлення від корпусу та кристала діода [39; 41].

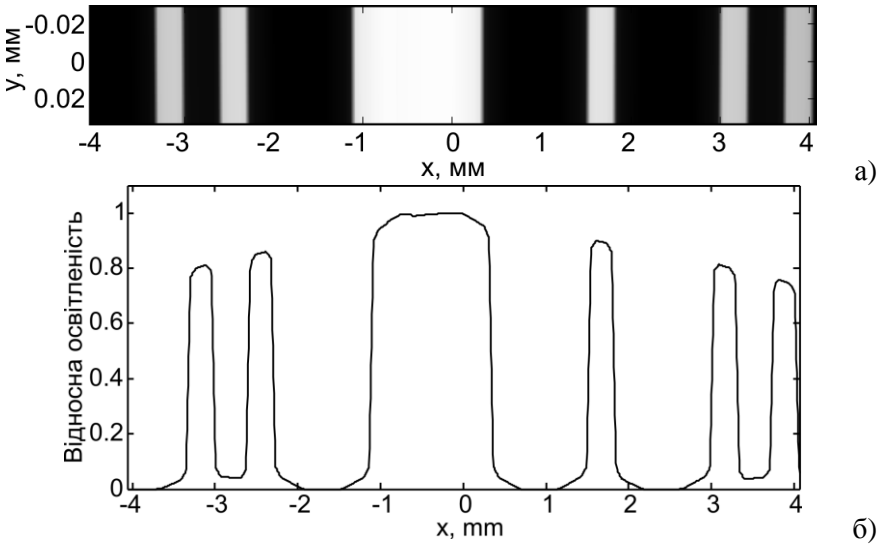


Рис. 3.3. Результати розрахунку розподілу освітленості
а) поле освітленості; б) графік зміни освітленості вздовж осі
фотоматриці

Експериментально отриманий розподіл освітленості. Щоб перевірити адекватність моделі утворення тіні сектора, розподіл освітленості в зоні напівтіні реєструвався за допомогою фотоматриці високою роздільною здатністю. Тінь від кодового диска, що освітлювався світлодіодом, проектувалася на матрицю 320×240 пікселів із розміром пікселя 5×5 мкм [37]. Відстань від матриці до диска становила 1 мм, від диска до світлодіода – 11 мм. Із зображень межі тіні (рис. 3.4 а) після попередньої обробки отримували профіль тіні в декількох перерізах 0-0..n-n. Із отриманого сімейства графіків (рис. 3.4 б) зміни освітленості очевидно, що прозорі ділянки диска більш спотворені ніж непрозорі. Для зменшення впливу забруднення прозорої ділянки

отримані графіки усереднювалися (усереднений графік відображений товстою лінією).

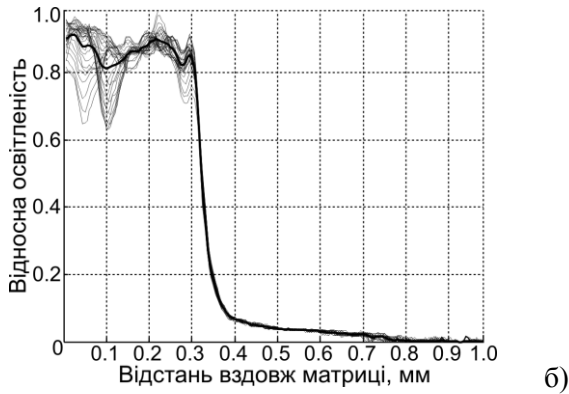
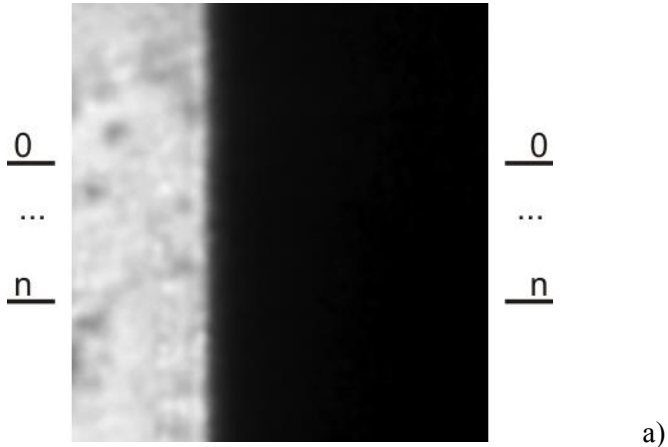
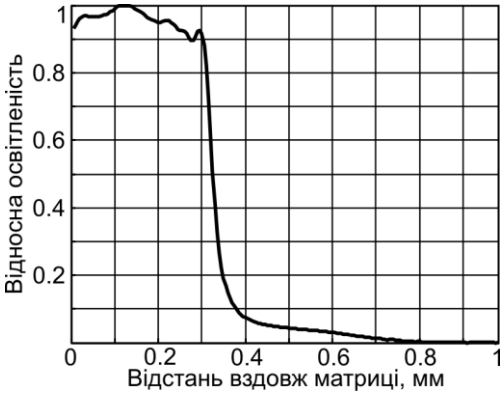


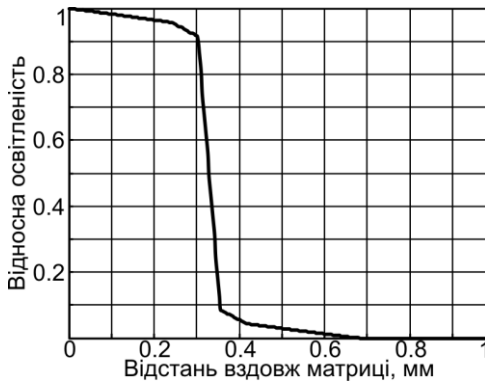
Рис. 3.4. Зображення межі тіні (а) та графік зміни освітленості в зоні напівтіні (б)

На рис. 3.5 а) та б) поруч відображено експериментальний та модельований графік розподілу освітленості. На обох графіках можемо спостерігати практично лінійні ділянки з різним кутом

нахилу кривої зміни освітленості, що відповідають впливові освітленості від напівпровідника, корпусу світлодіода та фону. На відміну від модельованого, експериментальний графік показує плавний перехід між цими ділянками, що можна пояснити спрощеннями, прийнятими при розрахунку освітленості ОБФП [37].



а)



б)

Рис. 3.5. Порівняння експериментального (а) і модельованого (б) перепаду

3.2 Метод оцінки ефективності методу локалізації перепаду

Значний вклад в сумарну похибку сенсора кута окрім ексцентриситету вносить похибка методу локалізації перепаду інтенсивності, пов'язаного з межею тіні сектора. Незважаючи на доволі велику кількість праць, що висвітлюють питання локалізації перепадів, важко назвати метод, оптимальний для всіх застосувань. Обираючи метод локалізації перепаду інтенсивності для сенсора кута, слід зважати на характер зображення диска, обмеження ресурсів мікроконтролера, необхідну точність та ін. Важливо дослідити якість методу локалізації перепадів для оптоелектронного визначення положення кодового диска сенсора кута.

3.2.1 Вимоги до методу та характеристика зображення диска

В розділі 2.3.2 та [44] показано, що постійне зміщення визначеної координати, що еквівалентне постійному зміщенню фотоматриці, приводить до адитивної похибки, яка автоматично виключається під час прив'язки сенсора. Тобто, похибка локалізації межі не впливає на результати вимірювання доти, доки вона залишається сталою за величиною та напрямком для всіх перепадів. Водночас, змінна складова похибки локалізації проявлятиме себе як відхилення від лінійності передавальної характеристики, яке не може бути виключене лінійним калібруванням.

На зображенні диска, отриманого за допомогою ОБФП (рис. 3.6), можна чітко розрізнити рівень темних та світлих секторів. Це дає змогу застосовувати для локалізації перепадів метод перетину з пороговим рівнем. Розподіл освітленості в зоні напівтіні має складний характер: межі тонких темних смуг частково накладаються одна на одну, а прозорі ділянки спотворені подряпинами та брудом. Це ускладнює виявлення меж секторів та може спричинити додаткову похибку локалізації перепаду.

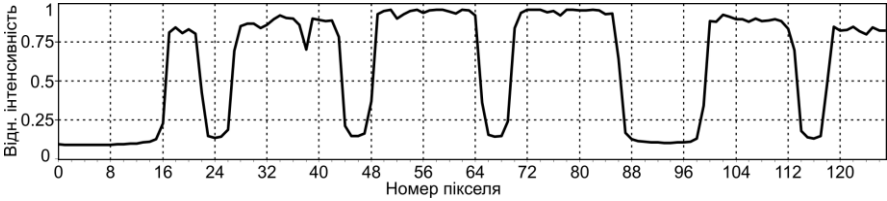


Рис. 3.6. Приклад зображення отриманого з ОБФП

Точність визначення межі тіні сектора проаналізовано за допомогою декількох відомих методів: лінійної інтерполяції (перетину з пороговим рівнем), фотометричної інтерполяції та методу Білінського. Також досліджено ефективність модифікованого методу лінійної інтерполяції (ЛІФЗ) та методу сплайн-інтерполяції фільтрованого зображення (СІФЗ).

Метод лінійної інтерполяції фільтрованого зображення (ЛІФЗ) полягає у фільтрації зображення за допомогою цифрового гаусового фільтру та пошуку точки перетину кусково-лінійно-інтерпольованого фільтрованого зображення з адаптивним пороговим рівнем I_{TH} . Зображення фільтрувалося шляхом згортання з гаусіаном

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Щоб зменшити чутливість методу до коливань рівня освітленості, пороговий рівень I_{TH} розраховувався для кожного перепаду таким чином

$$I_{TH} = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot k_{TH},$$

де I_{\min} та I_{\max} – мінімальний та максимальний рівень примежової ділянки нефільтрованого перепаду інтенсивності; k_{TH} – коефіцієнт перепаду (рис. 3.7).

В першому наближенні ступінь розмиття σ приймали рівним 1, а коефіцієнт порогового рівня $k_{TH} = 0,5$.

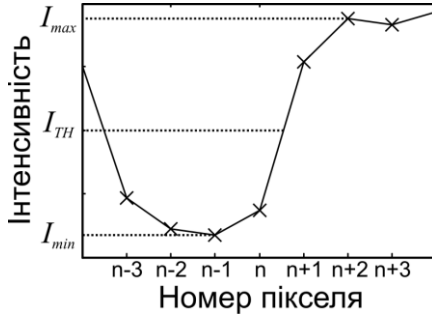


Рис. 3.7. Схема розрахунку порогового рівня

Метод сплайн-інтерполяції фільтрованого зображення (СІФЗ) відрізняється від ЛІФЗ лише заміною лінійної інтерполяції на інтерполяцію поліномами третього степеня.

3.2.2 Модель фотоматриці

Для дослідження похибок методів локалізації перепадів потрібна серія зображень, зміщених на визначену відстань. Експериментальне отримання серії таких зображень трудомістке. Альтернативним способом є використання модельованого чи виміряного розподілу освітленості та математичної моделі фотоматриці, яка враховує геометричні розміри пікселів та їхнє взаємне розміщення (рис. 3.8 а, б) [37; 59].

Електроніка фотоматриці перетворює накопичений заряд в пропорційну аналогову напругу і передає її на вихід. Далі, аналоговий сигнал може бути безпосередньо оцифрований або перетворений у відеосигнал [53]. Процес перетворення освітленості у вихідний аналоговий сигнал фотоматриці можна описати такою залежністю [53, с.57]:

$$I'_i = T \int \int_{\lambda \in S_i} E(p, \lambda) R(p) q(\lambda) dp d\lambda, \quad (3.4)$$

- де I'_i – кількість електронів, зібраних пікселем i ;
 T – період інтегрування;
 S_i – площа пікселя;

$E(p, \lambda)$ – сила світла на одиницю площі на одиницю довжини хвилі в точці p ;

$R(p)$ – просторова реакція в точці p ;

$q(\lambda)$ – квантовий вихід (кількість електронів на одиницю енергії світла).

Інтеграл розраховують по всій площі пікселя S_i та діапазону довжин хвиль λ для яких піксель дає ненульову реакцію.

Якщо вважати випромінювання монохроматичним, а просторову реакцію пікселя $R(p)$ величиною, що не залежить від координати p то залежність (3.4) можна звести до такої:

$$I'_i = k'_p \iint_{p \in S_i} E'(p) dp, \quad (3.5)$$

де k'_p – коефіцієнт, що враховує період інтегрування, спектральну чутливість, квантовий вихід та просторову реакцію пікселя.

Оскільки межі тіней практично паралельні до вертикальних меж пікселя, то інтегрування по площі можна замінити інтегруванням лінійної освітленості по ширині пікселя

$$I_i = k_p \int_{i \cdot p_d + \Delta x}^{i \cdot p_d + p_w + \Delta x} E(x) dx, \quad (3.6)$$

де I_i – вихідний сигнал пікселя i ; k_p – коефіцієнт приведення одиниць вимірювання; p_w , p_d – ширина та крок пікселів; Δx – зміщення фотоматриці; $E(x)$ – функція, що описує лінійний розподіл освітленості (рис. 3.8 в).

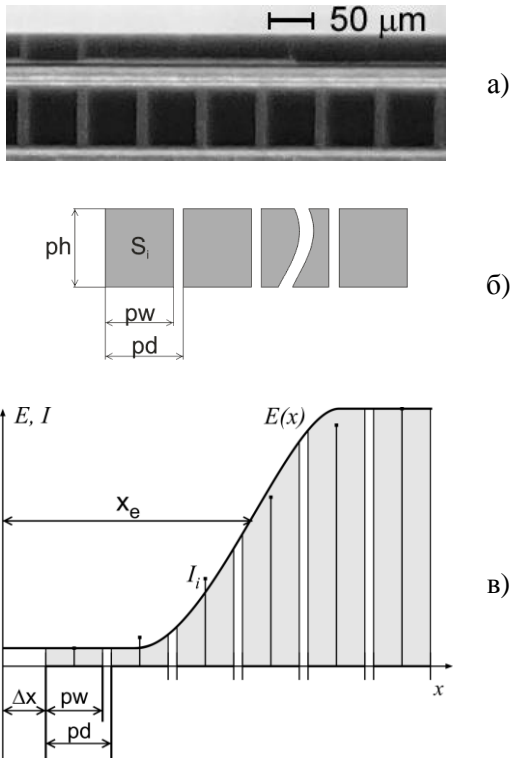


Рис. 3.8. Мікрофотографія ОБФП (а), розмір пікселів (б) та схема розрахунку сигналів пікселів (в)

Ефективність методів перевірялася на декількох перепадах інтенсивності (рис. 3.9): лінійно-змінні функції, яка є поширеним наближенням перепаду (рис. 3.9 а); лінійно-змінній функції з ділянками різного нахилу [39] (підрозділ 3.1) (рис. 3.9 б); функції Лапласа, що добре наближує перепад інтенсивності за умови великої кількості оптичних передавальних ланок системи формування зображення [8] (рис. 3.9 в); дослідному перепаді, отриманому шляхом вимірювання розподілу освітлення в зоні напівтіні за допомогою фотоматриці з малим кроком пікселів (рис. 3.9 г); перепаді, отриманому шляхом сумування двох

дослідних перепадів, що моделювало часткове накладання меж тонких непрозорих секторів (рис. 3.9 д).

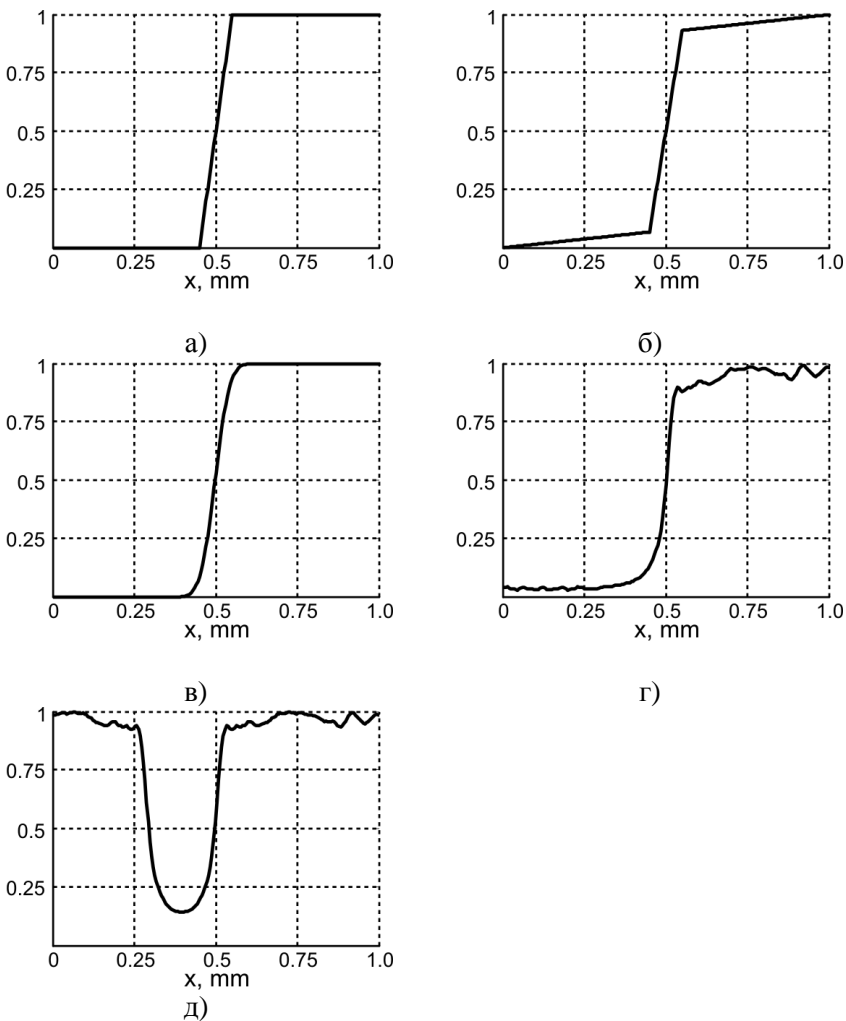


Рис. 3.9. Досліджувані моделі перепадів інтенсивності: а – лінійний; б – лінійний 2; в – Лапласа; г – дослідний; д – дослідний 2.

3.2.3 Результати моделювання

Для дослідження точності методів локалізації перепадів моделювали процес отримання та обробки зображення [37; 59; 60]. Для зміщень фотоматриці від 0 до 64 мкм, за формулою (3.6) визначали інтенсивності пікселів за якими з допомогою досліджуваних методів розраховували координату краю. Параметри геометрії пікселів відповідали фотоматриці TSL1401: ширину пікселів p_w приймали рівною 55,5 мкм, крок між пікселями p_d – 63,5 мкм. Як показники ефективності методів локалізації перепаду використовували розмах коливання визначеної координати краю Δ та максимальну різницю визначеної координати для перепадів рис. 3.9 г) та д) (вплив накладання меж) Δ' (рис. 3.10). Чим ці показники менші – тим меншою можна очікувати змінну складову похибки вимірювання кутового положення. Отримані результати наведені в табл. 3.1 та рис. 3.11.

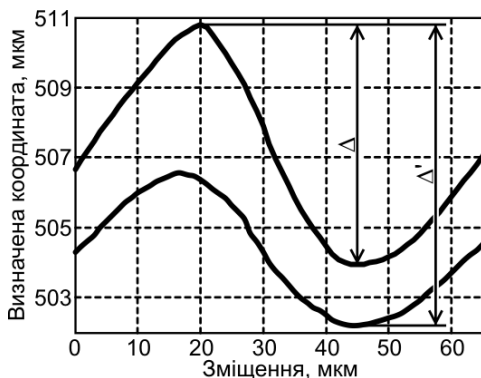


Рис. 3.10. Залежність визначеної координати від зміщення фотоматриці.

Таблиця 3.1.

Результати моделювання методів

Метод	Коливання визначеної координати краю Δ , мкм					Δ' , мкм
	Лінійний	Лінійний 2	Лапласа	Дослідний	Дослідний 2	
Лінійної інтерполяції	3,35	3,04	5,14	10,5	11,5	13,3
Фотометричної інтерполяції	3,29	5,27	9,50	9,2	5,83	9,2
Білінського	0,65	0,83	1,90	7,40	8,84	11,8
ЛФЗ	0,34	0,33	1,64	4,14	5,11	8,6
СІФЗ	0,34	2,2	1,64	4,36	6,86	7,7

Із результатів моделювання можна зробити висновок, що ефективність методів локалізації сильно залежить від характеру перепаду інтенсивності. Методи демонстрували кращі результати на перепадах у вигляді лінійно-змінної функції та функції Лапласа. Розмах коливання визначеної координати межі значно збільшувався при локалізації асиметричних перепадів (рис. 3.9 г та д). Найменший розмах Δ' коливання визначеної межі показав метод СІФЗ.

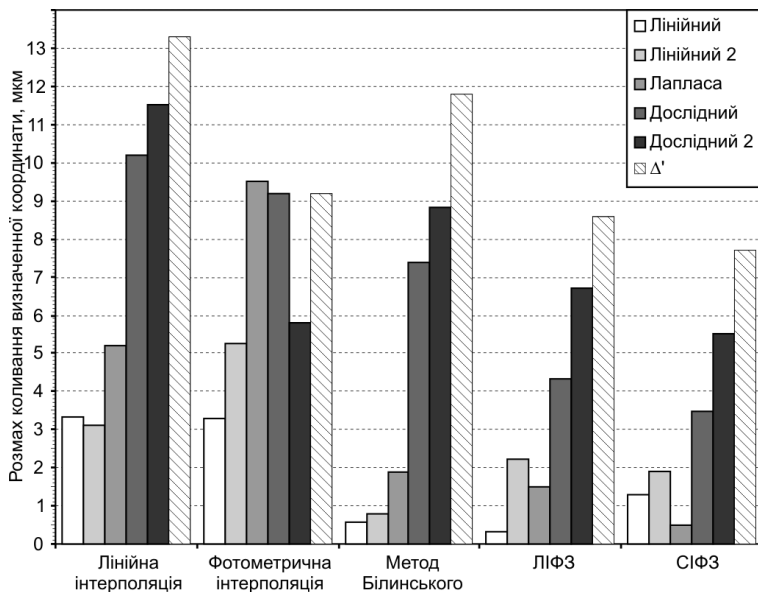


Рис. 3.11. Результати дослідження методів локалізації перепадів

3.3 Експериментальні дослідження ефективності методів локалізації

Щоб експериментально перевірити результати моделювання, зазначені методи використали для визначення положення диска оптоелектронного сенсора кута. При тому одночасно отримували і обробляли зображення з двох ОБФП, встановлених із протилежних сторін диска. Похибку визначення кута оцінювали за різницею результатів вимірювання двох каналів [59; 60]. Для зручності спостереження, з експериментальних даних вилучили нульову та першу гармоніки, які здебільшого спричинені зміщенням ОБФП, ексцентриситетом та перекосом кодової доріжки. На рис. 3.12 позначені розмах Δ та середньоквадратичне відхилення σ експериментальних даних.

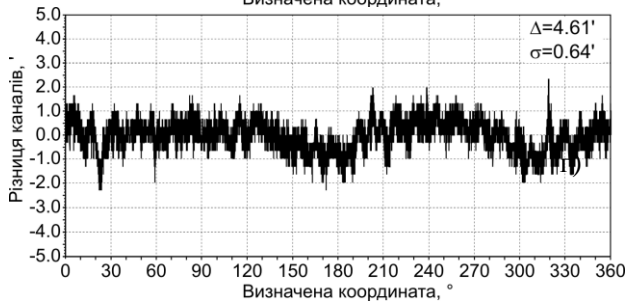
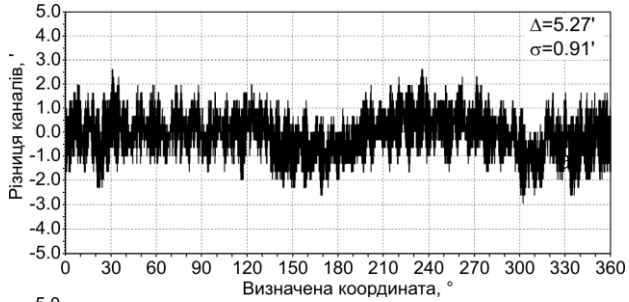


Рис. 3.12. Різниця результатів вимірювання за каналами як функція кута a – лінійна інтерполяція; b – фотометрична інтерполяція; v – ЛФЗ; z – СІФЗ

Визначення положення диска реалізовано за допомогою методу лінійної інтерполяції, фотометричної інтерполяції, ЛФЗ та СІФЗ. Найменшу похибку локалізації на неспотворених межах показав метод фотометричної інтерполяції. Однак, він виявився чутливим до форми перепаду інтенсивності – його похибка для забруднених примежових зон істотно зростала (напр. позиція 298° рис. 3.12 б). Найменший розмах та с.к.в. різниці результатів за каналами на всьому діапазоні вимірювання показали методи ЛФЗ та СІФЗ [59; 60]. При тому, реалізація СІФЗ вимагала на порядок більше процесорного часу ніж реалізація ЛФЗ, при виграші в точності на 15%.

Для порівняння результатів моделювання та експерименту оцінили вплив зміщення межі на різницю показів каналів за допомогою моделі [44] (підрозділ 2.2). При цьому модель модифікували, додаючи до координати межі тіні похибку, що змінюється з частотою пікселів і розмахом, отриманим в результаті моделювання методу локалізації межі (табл. 3.1). Отримані результати наведені в табл. 3.2, де σ_m – с.к.в., отримане в результаті моделювання, а σ_e – с.к.в., отримане в результаті експерименту. Окрім похибки коливання визначеної координати в експериментальних даних присутні складові, спричинені геометричними спотвореннями диска та неточностями нанесення кодових секторів. Оскільки похибка коливання визначеної координати періодично змінюється з кроком пікселів, то для зменшення впливу інших складових на σ_e відкидали всі гармоніки з частотами нижчими за частоту пікселів.

Номер гармоніки N_{px} , що відповідає частоті пікселів, можна оцінити, виходячи з номінальної відстані від ОБФП до осі диска r та періоду пікселів p_{dt} , приведенного до площини диска:

$$N_{px} = \frac{2\pi \cdot r}{p_{dt}}.$$

Для дослідного зразка r дорівнює 23,5 мм, p_{dt} дорівнює 59 мкм, а тому N_{px} дорівнює 2504. На рис. 3.13 наведено типовий спектр сигналу різниці результатів каналів, отриманого за допомогою дискретного перетворення Фур'є (нульова та перша гармоніки не показані). В околі гармоніки 2500 можна спостерегти розмитий пік, який, вочевидь, спричинений похибками методу визначення межі. Розмиття можна пояснити коливаннями відстані від ОБФП до центру кодової доріжки внаслідок ексцентриситету та зміщень диска. Через це, для визначення σ_e відкидали гармоніки з нульової по N_{px}' , де N_{px}' взяте з певним запасом – 2325.

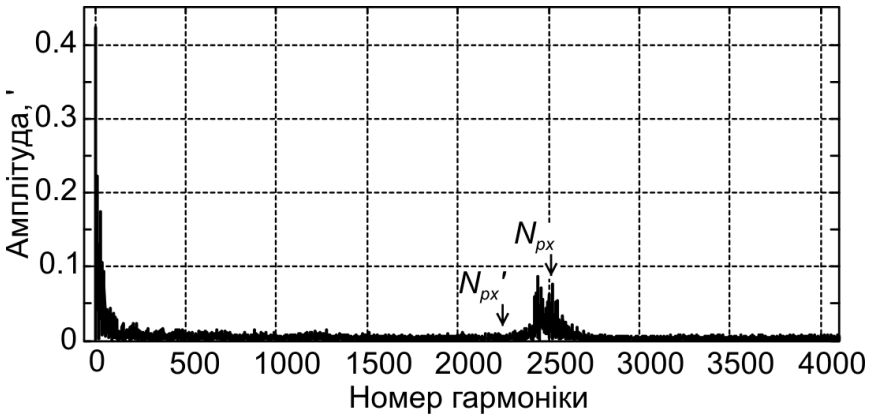


Рис. 3.13. Спектр типового сигналу різниці результатів каналів

Таблиця 3.2.

Порівняння результатів моделювання та експерименту

Метод	Δ , мкм	σ_m , '	σ_e , '	$(\sigma_e - \sigma_m)/\sigma_m$, %
Лінійної інтерполяції	13,3	0,50	0,68	36
Фотометричної інтерполяції	9,2	0,35	0,40	14
Білінського	11,8	0,45	-	-
Білінського (спрощений)	16,1	0,61	0,62	2
ЛФЗ	8,6	0,33	0,39	18
СІФЗ	7,7	0,29	0,34	17

Можна зауважити, що метод ЛФЗ включає декілька параметрів, вибір яких може впливати на розмах коливання визначеної координати тіні, а отже і на точність визначення кутового положення. Перший із них – ступінь розмиття фільтру – σ , другий – коефіцієнт порогового рівня k_{TH} . Для встановлення впливу цих параметрів на коливання похибки визначення координати була проведена серія експериментів, що полягали у вимірюванні с.к.в. різниці результатів вимірювання двох каналів сенсора. Щоб виключити вплив швидкості обертання, вісь сенсора повільно обертала за допомогою крокового двигуна та редуктора з сталим періодом, рівним 96 секунд на оберт. При цьому програмне забезпечення сенсора синхронно вимірювало положення диска за двома каналами та передавало результати на ЕОМ для аналізу. Далі визначали с.к.в. отриманих залежностей різниці результатів за каналами від положення диска s та s' . Щоб виключити вплив ексцентриситету та спотворень диска, при розрахунку s до уваги не бралася нульова та перша гармоніка, а при розрахунку s' – гармоніки з нульової по 2325. Експеримент повторювали змінюючи ступінь розмиття від 0,5 до 1,5 із кроком 0,1, а коефіцієнт порогового рівня k_{TH} від 40/256 до 160/256 із кроком 8/256. Результати розрахунку с.к.в. графіків різниці каналів, отриманих під час експериментів приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Розраховані с.к.в. експериментальних даних s' (в мінутах)

k_{TH}	σ										
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
40/256	0,47	0,33	0,40	0,51	0,60	0,54	0,65	1,23	1,56	1,70	1,71
48/256	0,57	0,32	0,27	0,34	0,43	0,39	0,45	0,83	1,15	1,35	1,58
56/256	0,65	0,40	0,25	0,24	0,30	0,27	0,33	0,55	0,72	0,87	1,04
64/256	0,71	0,49	0,31	0,23	0,22	0,23	0,25	0,40	0,49	0,54	0,60
72/256	0,73	0,56	0,39	0,28	0,23	0,25	0,24	0,30	0,36	0,40	0,44
80/256	0,73	0,60	0,46	0,36	0,28	0,31	0,28	0,25	0,27	0,30	0,32
88/256	0,70	0,61	0,50	0,42	0,35	0,36	0,33	0,27	0,25	0,26	0,27
96/256	0,68	0,60	0,51	0,45	0,39	0,39	0,37	0,31	0,29	0,28	0,29
104/256	0,66	0,59	0,52	0,46	0,42	0,40	0,39	0,36	0,34	0,33	0,34
112/256	0,64	0,58	0,51	0,46	0,42	0,41	0,40	0,38	0,36	0,36	0,36
120/256	0,63	0,57	0,51	0,46	0,43	0,42	0,41	0,38	0,38	0,37	0,37
128/256	0,63	0,56	0,51	0,47	0,43	0,43	0,42	0,39	0,38	0,38	0,38
136/256	0,63	0,57	0,52	0,48	0,44	0,44	0,44	0,40	0,39	0,39	0,39
144/256	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46	0,45	0,44	0,41	0,40	0,40	0,39
152/256	0,67	0,61	0,55	0,51	0,48	0,46	0,45	0,43	0,41	0,40	0,40
160/256	0,90	0,64	0,58	0,53	0,50	0,54	0,65	0,43	0,41	0,40	0,39

На рис. 3.14 зображено сімейство залежностей с.к.в. різниці каналів s'' від коефіцієнту порогового рівня при ступенях розмивання $\sigma=0,5..1,0$. Мінімальні значення с.к.в. різниці каналів ($s'=0,22'$) отримали при σ рівному 0,9 та k_{TH} рівному 0,25 (64/256) (рис. 3.15). Мінімальне значення с.к.в. різниці каналів, що відповідає мінімальній похибці локалізації отримане для ступеня розмиття $\sigma=0,9$ та коефіцієнта порогового рівня $k_{TH}=0,25$. Мінімальне значення с.к.в. різниці каналів, отримане для методу лінійної інтерполяції, становить 0,68', тобто втричі більше значення, отриманого для запропонованого методу ЛПФЗ.

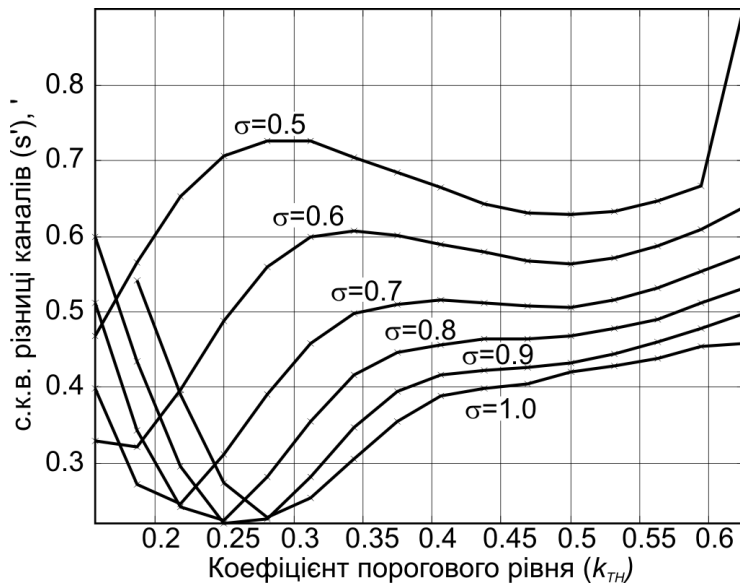


Рис. 3.14. Експериментально отримана залежність с.к.в. похибки визначення положення від коефіцієнту порогового рівня при ступенях розмиття $\sigma=0,5..1,0$

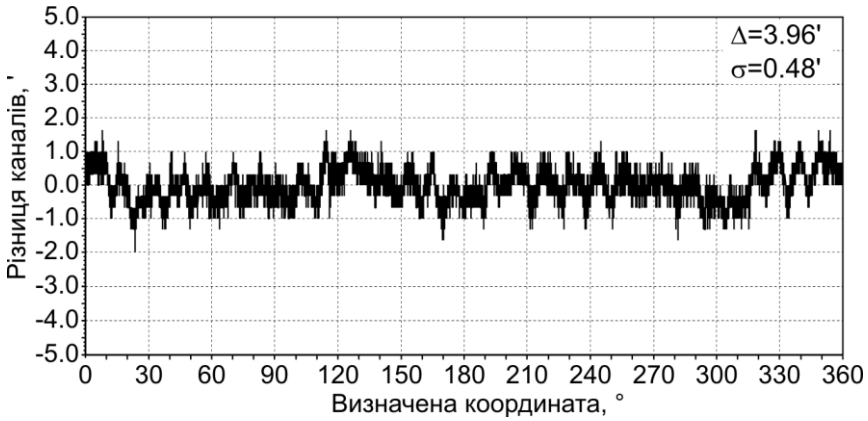


Рис. 3.15. Різниця показів каналів як функція кута для розмивання 0,9 та коефіцієнта порогу 0,25 (нульова та перша гармоніка відкинена)

Експеримент повторювали на другому екземплярі сенсора кута з кодovими дисками нижчої якості (менший контраст, більша похибка нанесення секторів). На рис. 3.16 а) зображені залежності s та s' від коефіцієнту порогового рівня отримані з кроком $2/256$, а на рис. 3.16 б) залежності мінімуму похибки від ступеня розмивання.

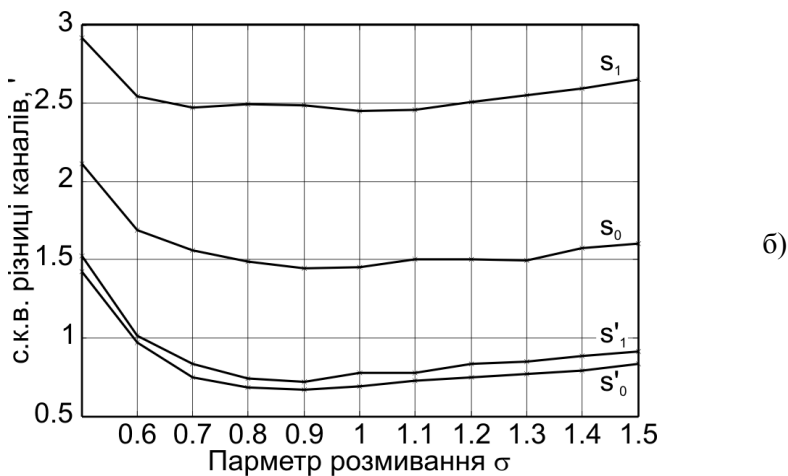
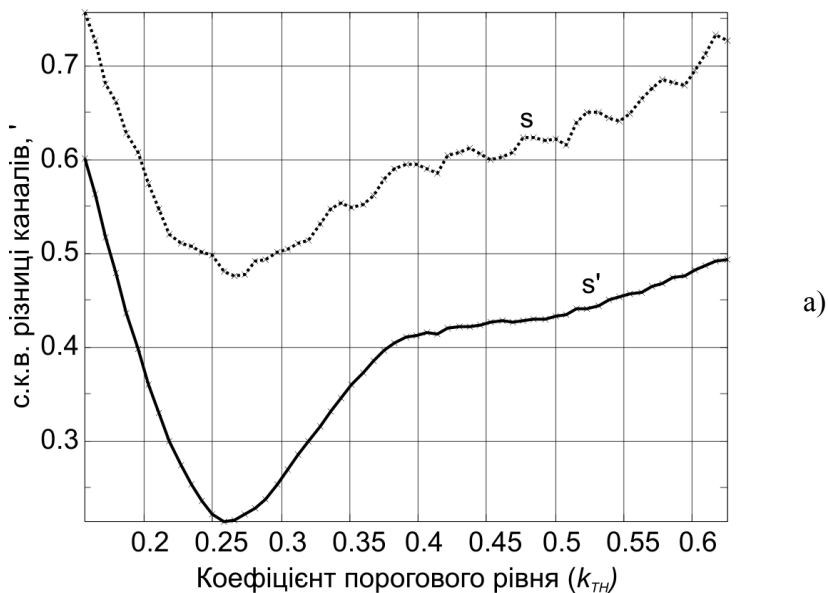


Рис. 3.16. Експериментально отримана залежність с.к.в. похибки визначення положення від коефіцієнта порогового рівня (а) та ступеня розмивання (б).

Висновки до розділу 3

1. Досліджено розподіл освітленості в зоні напівтіні. Запропоновано як наближення перепаду використовувати кусково-лінійну функцію. Зміна кута нахилу графіка освітленості можна пояснити конфігурацією освітлювача.
2. Запропоновано метод оцінки ефективності субпіксельних методів локалізації перепадів інтенсивності для оптоелектронних сенсорів кута, що враховує коливання визначеної координати при зміщенні межі тіні в межах пікселя. Встановлено, що на ефективність методу локалізації істотно впливає характер зміни освітленості в примежовій зоні перепаду. Із досліджуваних, найвищу точність та стійкість до впливу забруднень диску показали методи лінійної та кубічної інтерполяції фільтрованого зображення. Оскільки реалізація кубічної інтерполяції вимагає на порядок більше процесорного часу, а вираш в точності поглинається похибками диска, то для локалізації перепадів у практичних застосуваннях із розглянутих методів найдоцільніше застосовувати лінійну інтерполяцію фільтрованого зображення.
3. Метод визначення положення перепаду інтенсивності за перетином із пороговим рівнем удосконалено шляхом адаптивного вибору порогу та гаусового розмивання зображення, що дозволило досягнути зменшення похибки локалізації в 3 рази. Для зазначеного методу експериментально визначено оптимальне значення порогу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ КОДОВОГО ДИСКА ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА

В розділі проаналізовано методи кодування послідовностей на кодовій доріжці та дано рекомендації щодо їх застосування. Визначено мінімальні та максимальні радіуси диска на основі М-послідовностей. Запропонована методика проектування диска заданого радіусу.

4.1 Вимоги до кодової послідовності

Для однозначного визначення положення диска кодова доріжка має бути побудована так, щоб довільна послідовність символів, що проектується на ОБФП зустрічалася б лише раз для всієї доріжки.

Позначимо послідовність символів через S . Вважатимемо, що послідовність S періодична з періодом N .

$$S_i = S_{i+k \cdot N}, \quad k \in \mathbf{Z}.$$

Через $S^{(n, k)}$ позначимо довільну підпослідовність послідовності S довжиною k , що розпочинається з символу n і закінчується символом $n+k-1$. Тоді *довжиною однозначності* називатимемо таке мінімальне k , для якого справедливе твердження

$$S^{(i, k)} \neq S^{(j, k)}, \quad \forall (i \neq j) \ \& \ (i, j < N). \quad (4.1)$$

Чим коротша довжина однозначності, для послідовності заданого періоду та ОБФП тим більша допустима ширина символу, а отже і ймовірність правильного його розпізнавання.

Максимальний період послідовності для заданої довжини однозначності забезпечує послідовність максимальної довжини (М-послідовність), що володіє наступними властивостями [82; 83; 85; 104; 105] [84, с.312]:

- період послідовності рівний p^k-1 , де p – кількість символів в алфавіті (p – просте), k – довжина кодового слова;

- кількість входжень символів алфавіту відрізняється не більше ніж на 1;
- будь-яка підпоследовність символів довжиною k , окрім последовності з k нулів зустрічається лише раз.

M -последовності отримують на основі регістру зсуву зі зворотним зв'язком [82; 83; 105]. Регістр зсуву завантажується довільною комбінацією (за винятком всіх нулів), далі кожний розряд регістру множиться на відповідний коефіцієнт g_i породжувального поліному, добутки додаються по модулю p , а результат подається на вхід регістру зсуву (рис. 4.1). На виході регістру отримуємо M -последовність довжиною p^k-1 . Довжину последовності можна розширити до p^k , якщо вставити додатковий нуль в последовність нулів довжиною $k-1$ [90].

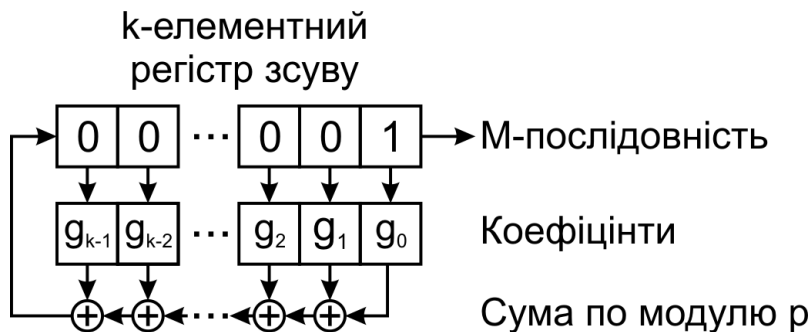


Рис. 4.1. Генерація M -последовності

M -последовність не єдиний варіант для створення кодового диска сенсора кута. Для цього теж застосовують последовність із двійкових слів розділених спец символами. Наприклад последовність чотирирозрядних двійкових слів розділені символом 2:

```
000020001200102001120100201
012011020111210002100121010
21011211002110121110211112
```

4.1.1 Мінімальна допустима різниця ширини тіней секторів.

Ширина тіні сектора кодового диска, виміряна за допомогою ОБФП, залежить від їхнього взаємного положення, зміщення освітлювача, похибок виготовлення диска та ін. Вихід вимірної ширини тіні сектора за межі коридору спричинить невірне розпізнавання символу та унеможливить визначення положення диска.

Межі зміни ширини тіні сектора розрахуємо методом мінімуму-максимуму. Для цього із заданої позиції межі сектора за законами геометричної оптики знайдемо абсцису межі тіні S_x (рис. 4.2):

$$\begin{aligned}\sin \gamma &= n \cdot \sin \gamma', \\ \frac{P_x}{\sqrt{P_x^2 + (L_z - P_z)^2}} &= n \frac{S_x - P_x}{\sqrt{(S_x - P_x)^2 + P_z^2}}, \\ S_x &= P_x \cdot \left(1 + \frac{P_z}{\sqrt{n^2 \cdot (L_z - P_z)^2 + (n^2 - 1) \cdot P_x^2}} \right), \\ P_x &= T_x \cdot \frac{L_z - P_z}{L_z - T_z}.\end{aligned}$$

де S_x – абсциса межі тіні; T_x – абсциса межі сектора; T_z – відстань від ОБФП до кодового диска; L_x – відстань від ОБФП до освітлювача; n – коефіцієнт заломлення матеріалу корпусу ОБФП.

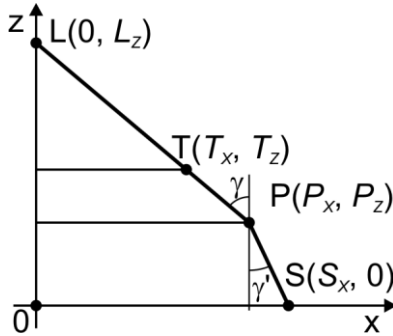


Рис. 4.2. Схема розрахунку координати тіні

Таким чином, залежність координати межі тіні від координати межі сектора можна описати формулою (4.2)

$$S_x(T_x) = T_x \cdot \frac{L_z - P_z}{L_z - T_z} \cdot \left(1 + \frac{P_z}{\sqrt{n^2 \cdot (L_z - P_z)^2 + (n^2 - 1) \left(T_x \cdot \frac{L_z - P_z}{L_z - T_z} \right)^2}} \right). \quad (4.2)$$

Якщо позначити ширину сектора через T_w , а координату його лівого краю через T'_x , то ширину тіні сектора можна обчислити так

$$S_w(T'_x, T_w) = S_x(T'_x + T_w) - S_x(T'_x).$$

Ширина тіні сектора буде мінімальною тоді, коли L_z та P_z будуть максимальні, T_z та T'_x – мінімальні (і навпаки). Нехай $L_z \pm \Delta L_z$, $T_z \pm \Delta T_z$ та $P_z \pm \Delta P_z$ – межі зміни конструктивних параметрів, $(0..w/2)$ – межі зміни T'_x , а $\pm \Delta T_x$ та $\pm \Delta S_x$ – межі похибок нанесення секторів та локалізації межі тіні. Також врахуємо, що на довжину хорди сектора впливатиме коливання відстані від центру диску до ОБФП – Δr . Таким чином

$$S_{w\min}(T_w) = S_w \left(\frac{w_s}{2}, (T_w - \Delta T_w) \frac{r - \Delta r}{r}, L_z + \Delta L_z, T_z - \Delta T_z, P_z + \Delta P_z, n \right) - \Delta S_x$$

$$S_{w\max}(T_w) = S_w \left(-\frac{T_w}{2}, (T_w + \Delta T_w) \frac{r + \Delta r}{r}, L_z - \Delta L_z, T_z + \Delta T_z, P_z - \Delta P_z, n \right) + \Delta S_x$$

$$\Delta S_w(T_w) = \frac{S_{w\max}(T_w) - S_{w\min}(T_w)}{2}. \quad (4.3)$$

Залежність меж зміни визначеної ширини тіні сектора від довжини хорди сектора наведені на рис. 4.3. При розрахунках прийнято $r=23,5\pm 0,2$ мм; $L_z=14\pm 0,5$ мм; $T_z=2\pm 0,5$ мм; $P_z=1\pm 0,01$ мм; $\Delta T_w=\pm 5$ мкм; $\Delta S_x=\pm 5$ мкм; $w_L=8,128$ мм; $n=1,55$.

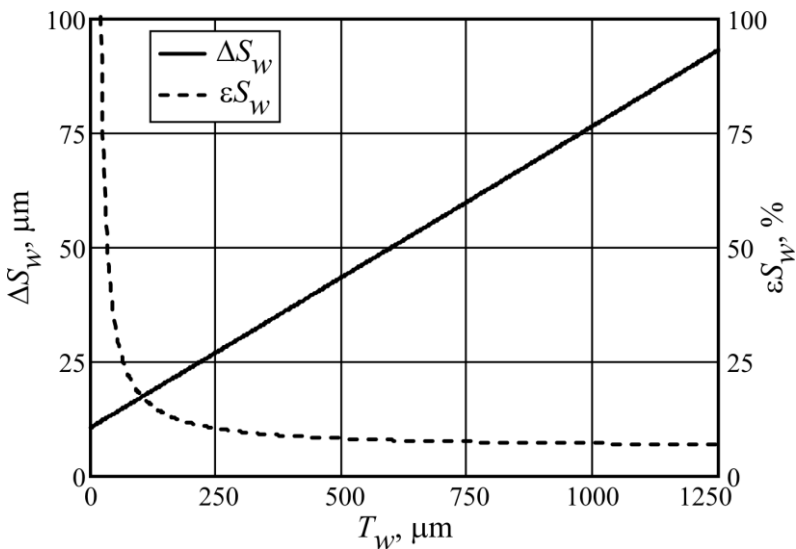


Рис. 4.3. Залежність меж зміни визначеної ширини тіні сектора від довжини хорди сектора

4.2 Аналіз методів представлення кодової послідовності

У процесі розроблення, виготовлення та дослідження експериментальних взірців сенсорів встановлені такі вимоги до методу подання псевдовипадкової послідовності на кодовій доріжці:

- самосинхронізація – має існувати можливість встановлення меж символів кодової доріжки; (для визначення зміщення тіні сектора відносно ОБФП необхідно, щоб кожний символ мав чіткі межі);
- максимальна ширина – ширина символів має бути такою, щоб довільний фрагмент доріжки, що проектується на ОБФП, зустрічався лише раз для всієї кодової послідовності; тому ширина кодових символів обмежена зверху розмірами ОБФП і довжиною кодового слова;
- мінімальна ширина – найдрібніші елементи кодування символу мають бути ширшими за роздільну здатність оптичної системи Δw , яка визначається розмірами пікселя фотоматриці та розмиттям тіней секторів (для побудованого сенсора дискретність розмірів елементів коду складає порядку 0,254 мм);
- різниця ширини секторів має бути більшою за невизначеність вимірювання ширини тіні;
- максимальне заповнення непрозорими секторами – оскільки забруднення прозорої ділянки доріжки може спричинити похибку розпізнавання символу, то для підвищення надійності варто максимізувати коефіцієнт заповнення доріжки непрозорими ділянками.

Методи кодування. У найпростішому випадку бінарний код кодується за допомогою імпульсного кодування: символ 0 зображують непрозорим сектором, символ 1 – прозорим (рис. 4.4 а). Недоліком такого кодування є відсутність властивості самосинхронізації [10, с.121], а тому воно непридатне для побудови кодової доріжки. Кодом із самосинхронізацією є манчестерське кодування, за яким 0 кодується переходом від непрозорого до прозорого сектора, а 1 – переходом від прозорого до непрозорого сектора (рис. 4.4 б) [72 с.585; 51; 76]. Недоліком манчестерського кодування є неможливість встановлення бітової синхронізації для

зображення послідовності однакових бітів та обмеження алфавіту лише до двох символів.

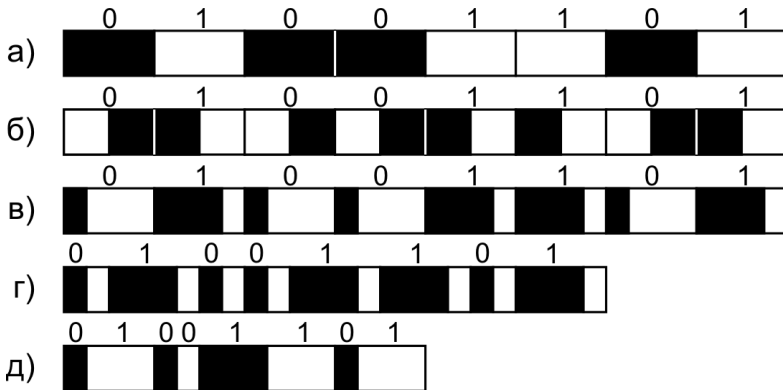


Рис. 4.4. Методи кодування псевдовипадкової послідовності
 а) – імпульсне; б) – манчестерське; в) – широтно-імпульсне;
 г) частотно-імпульсне; д) широтне

Недоліків манчестерського кодування позбавлений принцип широтно-імпульсного кодування, при якому кожний символ займає однакову ширину і кодується за допомогою прозорої та непрозорої смуги, а інформативним параметром є співвідношення між їхніми ширинами (рис. 4.4 в) [78]. Широтно-імпульсне кодування дає змогу надійно виявляти окремі символи і визначати їхнє положення, однак порівняно з імпульсним кодуванням вдвічі збільшує просторову частоту кодової доріжки (кожний символ кодується двома смугами).

За допомогою частотно-імпульсного кодування символи кодують темними смугами різної ширини, що відділені одна від одної світлими смугами одиничної ширини (рис. 4.4 г). Перевагою даного методу є високе заповнення кодової доріжки непрозорими смугами, а отже висока стійкість до забруднень.

Підвищити щільність запису можна відмовившись від смуг-розділювачів. Для цього слід чергувати прозорі та непрозорі смуги, а символи класифікувати, виходячи лише з їхньої ширини (рис. 4.4

д) [56; 62]. Такий метод запису далі називатимемо широтним кодуванням.

Мінімальні та максимальні довжини кодової доріжки. Від обраного методу кодування залежить мінімальна та максимальна довжина кодових доріжок, побудованих для заданої кодової послідовності та параметрів фотоматриці [56]. В загальному випадку довжину кодової доріжки W можна обчислити як суму добутків довжин окремих символів алфавіту w_i на кількість входжень символів у кодову послідовність N_i

$$W = \sum_{i=0}^{p-1} N_i \cdot w_i . \quad (4.4)$$

Відповідно, радіус диска, побудованого на основі кодової доріжки довжиною W можна обчислити так:

$$R = \frac{W}{2\pi} .$$

Широтно-імпульсне кодування. Мінімальну довжину кодової доріжки, записаної за допомогою широтно-імпульсного кодування, визначатиме роздільна здатність оптичної системи Δw та кількість символів алфавіту p . Для того, щоб розрізнити p символів, потрібно, щоб ширина символу була не менша $(p+1) \cdot \Delta w$ (рис. 4.5). Якщо загальна кількість символів кодової послідовності рівна N то її довжина обмежена знизу величиною W_{min}

$$W_{min} = N \cdot (p+1) \cdot \Delta w .$$

Для М-послідовності $N=p^k$, тому $W_{min} = p^k \cdot (p+1) \cdot \Delta w$.










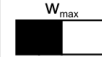





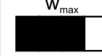
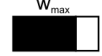
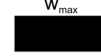
	Мінімальні розміри символів			Максимальні розміри символів		
	Широтно-імпульсне	Частотно-імпульсне	Широтне	Широтно-імпульсне	Частотно-імпульсне	Широтне
“0”						
“1”						
“2”						

Рис. 4.5. Визначення мінімальних та максимальних розмірів символів

Максимальна довжина кодової доріжки обмежена зверху кількістю символів кодової послідовності та розмірами фотоматриці. Для зчитування кодового слова довжиною k символів потрібно, щоб фотоматриця довжиною w_L вмщала $k+1$ символ – крайній символ буде частково проектуватися на межі фотоматриці і не буде розпізнаним. Тому максимальна довжина символу

$$w_{\max} = \frac{w_L}{k+1}. \quad (4.5)$$

Отже, довжина кодової доріжки, записаної широтно-імпульсним кодуванням не може перевищувати W_{\max}

$$W_{\max} = N \cdot w_{\max} = N \frac{w_L}{k+1}. \quad (4.6)$$

Для M -послідовності

$$W_{\max} = p^k \frac{w_L}{k+1}.$$

Частотно-імпульсне кодування. Мінімальна довжина доріжки записаної за допомогою частотно-імпульсного кодування визначається роздільною здатністю оптичної системи Δw та

властивостями обраної послідовності. Мінімальну ширину символів для частотно-імпульсного кодування (рис. 4.5) w_i можна визначити так

$$w_i = \Delta w \cdot (i + 2).$$

Доповнена нулем М-послідовність на своєму циклі містить однакову кількість символів алфавіту, тому кількість входжень N_i символу s_i в кодову послідовність довжиною N можемо обчислити за формулою

$$N_i = \frac{N}{p} = \frac{p^k}{p},$$

де p – кількість символів алфавіту;
 k – кількість символів кодового слова.

Отже, мінімальна довжина W_{min} частотно-імпульсно-кодової доріжки визначається так

$$W_{min} = \sum_{i=0}^{p-1} N_i w_i = \frac{p^k}{p} \Delta w \sum_{i=0}^{p-1} (i + 2),$$

$$W_{min} = p^k \frac{p + 3}{2} \Delta w. \quad (4.7)$$

Максимальну довжину доріжки, закодованої за допомогою частотно-імпульсного кодування, визначають довжиною фотоматриці, довжиною найширшого кодового слова та різницею між шириною символів.

Для М-послідовності p^k найширшим кодовим словом буде послідовність із k найширших символів w_{max} . Щоб прочитати таку підпослідовність фотоматриця приведеною довжиною w_L має вміщати k символів довжиною w_{max} та один символ довжиною $(w_{max} - \Delta w)$, що проектується на межі фотоматриці (Δw – роздільна здатність):

$$w_{max} k + (w_{max} - \Delta w) = w_L;$$

$$w_{\max} = \frac{w_L + \Delta w}{k + 1}. \quad (4.8)$$

Тоді всі інші символи матимуть максимальну довжину w_i ($i=0..p-1$)

$$w_i = \frac{w_L + \Delta w}{k + 1} - \Delta w \cdot (p - i - 1).$$

Максимальна довжина кодової доріжки W_{\max} буде рівна

$$\begin{aligned} W_{\max} &= \sum_{i=0}^{p-1} N_i w_i = \frac{p^k}{p} \sum_{i=0}^{p-1} \left(\frac{w_L + \Delta w}{k + 1} - \Delta w \cdot (p - i - 1) \right), \\ W_{\max} &= p^k \left(\frac{w_L + \Delta w}{k + 1} - \Delta w \frac{p - 1}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Широтне кодування. Мінімальну довжину кодової доріжки W_{\min} можна обчислити, виходячи з роздільної здатності оптичної системи Δw . Мінімальна ширина символів для широтного кодування (рис. 4.5) w_i рівна

$$w_i = \Delta w \cdot (i + 1).$$

Тому мінімальна довжина W_{\min} широтно-кодової доріжки визначається так

$$\begin{aligned} W_{\min} &= \sum_{i=0}^{p-1} N_i w_i = \sum_{i=0}^{p-1} \left(\frac{p^k}{p} \Delta w \cdot (i + 1) \right), \\ W_{\min} &= p^k \cdot \Delta w \frac{p + 1}{2}. \end{aligned}$$

Максимальна довжина доріжки записаної широтним кодуванням визначається аналогічно до максимальної довжини доріжки частотно-імпульсного кодування (4.9).

В табл. 4.1 наведено розраховані мінімальні та максимальні радіуси дисків, побудованих на основі М-последовностей, записаних широтно-імпульсним, частотно-імпульсним та широтним кодуванням, і які зчитуються фотоматрицею приведеною довжиною $w_L=7,222$ мм з оптичною роздільною здатністю $\Delta w=0,254$ мм [56]. Отримані допустимі межі зміни радіусу диска подано на рис. 4.6.

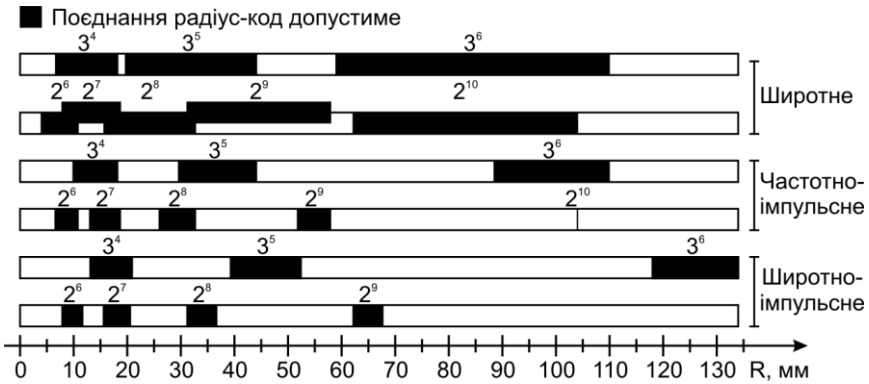


Рис. 4.6. Порівняння діапазонів допустимих радіусів кодових дисків

Таблиця 4.1.

Порівняння методів кодування

М- пос л.	p	k	N	Широтно- імпульсне		Частотно- імпульсне		Широтне	
				R_{min} мм	R_{max} мм	R_{min} мм	R_{max} мм	R_{min} мм	R_{max} мм
2^6	2	6	64	7,8	10,5	6,47	10,9	3,88	10,9
2^7	2	7	128	15,5	18,4	12,9	18,8	7,77	18,8
2^8	2	8	256	31,0	32,7	25,9	32,8	15,5	32,8
2^9	2	9	512	62,1	58,9	51,7	58,0	31,0	58,0
2^{10}	2	10	1024	124	107	104	104	62,1	104
3^4	3	4	81	13,1	18,6	9,82	18,3	6,55	18,3
3^5	3	5	243	39,3	46,6	29,5	44,2	19,6	44,2
3^6	3	6	729	118	120	88,4	110	58,9	110

4.3 Максимальна допустима різниця ширини елементів кодової доріжки

Про можливість зчитування коду за допомогою ОБФП заданого розміру можна судити оцінивши максимальну допустиму різницю між ширинами елементів кодової послідовності Δw . Зменшення Δw збільшує ймовірність невірної розпізнавання символів.

Розрахуємо максимальну різницю ширини секторів, яку можна забезпечити, зчитуючи задане кодування за допомогою фотоматриці заданої довжини [62]. При цьому враховуватимемо мінімальний розмір прозорого та непрозорого сектора w_{te} та w_{oe} , видимі розміри хорди кодового диска w_L , кількість символів алфавіту p та n_i – кількість символів певної ширини, що мають бути одночасно видимі для фотоматриці на ділянці з найширшими символами.

Для повної М-послідовності p^k ділянка з найширшими символами відповідає кодовому слову з k символів ($p-1$) разом із додатковим символом ($p-2$), що проектується на межу фотоматриці.

Для **широтного-імпульсного кодування** мінімальна ширина символів становить (рис. 4.7)

$$w = w_{oe} + \Delta w \cdot (p - 1) + w_{te}.$$

	Широтно-імпульсне	Частотно-імпульсне	Широтне
“0”	$w_{oe} \quad 2\Delta w + w_{te}$ 	$w_{oe} \quad w_{te}$ 	w_e
“1”	$w_{oe} + \Delta w \quad \Delta w + w_{te}$ 	$w_{oe} + \Delta w \quad w_{te}$ 	$w_e + \Delta w$
“2”	$w_{oe} + 2\Delta w \quad w_{te}$ 	$w_{oe} + 2\Delta w \quad w_{te}$ 	$w_e + 2\Delta w$

Рис. 4.7. Ширина символів для алфавіту з трьох символів ($p=3$)

Для того, щоб у вікні шириною w_L розмістити k основних та k' контрольних символів слід вимагати виконання такої нерівності:

$$(k + k') \cdot (w_{oe} + \Delta w \cdot (p - 1) + w_{te}) \leq w_L.$$

Звідки можна знайти максимально допустиму величину приросту ширини елемента символу Δw

$$\Delta w \leq \frac{w_L - (k + k') \cdot (w_{oe} + w_{te})}{(p - 1) \cdot (k + k')}.$$
 (4.10)

Максимальна довжина доріжки з широтно-імпульсним кодуванням може бути розрахована за такою формулою

$$W \leq N \cdot (w_{oe} + \Delta w \cdot (p - 1) + w_{te}),$$
 (4.11)

де N – кількість символів в послідовності (для M -послідовності $N=p^k-1$)

За умови максимальної різниці Δw (4.10)

$$W \leq N \cdot \frac{w_L}{k + k'}.$$

Для **частотно-імпульсного кодування** мінімальна ширина символів складає (див. рис. 4.7)

$$w_i = w_{oe} + \Delta w \cdot i + w_{ie},$$

де i – індекс символу в алфавіті ($i=0..p-1$)

Щоб зчитати $k+k'$ символів найширшого кодового слова на фотоматриці активною довжиною w_L мають в найгіршому випадку вміститися $(k+k'-1)$ найширших символів та один символ ширини $w_{oe} + \Delta w \cdot (p-2) + w_{ie}$, тому

$$(k + k' - 1) \cdot (w_{oe} + \Delta w \cdot (p - 1) + w_{ie}) + 1 \cdot (w_{oe} + \Delta w \cdot (p - 2) + w_{ie}) \leq w_L.$$

З цієї нерівності можна знайти максимально допустиму величину приросту ширини елемента символу частотно-імпульсного кодування Δw

$$\Delta w \leq \frac{w_L - (k + k') \cdot (w_{oe} + w_{ie})}{(p - 1) \cdot (k + k') - 1}. \quad (4.12)$$

Максимальна довжина доріжки з частотно-імпульсним кодуванням може бути розрахована за такою формулою

$$W \leq \sum_{i=0}^{p-1} N_i \cdot (w_{oe} + \Delta w \cdot i + w_{ie}),$$

де N_i – кількість символів алфавіту в послідовності.

Для М-послідовностей кількість символів алфавіту в послідовності

$$N_i = \begin{cases} \frac{p^k}{p} - 1, & i = 0 \\ \frac{p^k}{p}, & i \neq 0 \end{cases},$$

тому

$$W \leq p^k \cdot \left(w_{oe} + \Delta w \cdot \frac{p-1}{2} + w_{ie} \right). \quad (4.13)$$

Для **широтного кодування** мінімальна ширина i -го символу складає (див. рис. 4.7)

$$w_i = w_e + \Delta w \cdot i,$$

де i – індекс символу в алфавіті ($i=0..p-1$); w_e – мінімальна ширина символу.

Максимальну різницю ширини елементів символів алфавіту можна оцінити виходячи з умови (рис. 4.7)

$$(k + k' - 1) \cdot (w_e + (p - 1) \cdot \Delta w) + 1 \cdot (w_e + (p - 2) \cdot \Delta w) \leq w_L.$$

З цього можемо знайти максимально-допустиму різницю ширини елементів Δw

$$\Delta w \geq \frac{w_L - (k + k') \cdot w_e}{(k + k') \cdot (p - 1) - 1}. \quad (4.14)$$

Довжину кодової доріжки з символів широтного кодування з максимальною різницею ширини елементів ($W_{\Delta \max}$) визначимо так

$$W_{\Delta \max} = \sum_{i=0}^{p-1} \frac{p^k}{p} (w_e + i \cdot \Delta w) = p^k \cdot \left(w_e + \Delta w \frac{p-1}{2} \right). \quad (4.15)$$

В табл. 4.2 наведено розраховані максимальні різниці ширини елементів символів та радіуси отриманих дисків, побудованих на основі М-послідовностей, записаних широтно-імпульсним, частотно-імпульсним та широтним кодуванням, які зчитуються фотоматрицею приведеною довжиною $w_L=7,22$ мм. Мінімальний розмір непрозорого елемента прийнятий рівним 0,254 мм, прозорого – 0,351 мм.

Таблиця 4.2.

Максимальна різниця ширини для кодувань

М- посл.	p	k	N	Широтно- імпульсне		Частотно- імпульсне		Широтне	
				R мм	Δw_{\max} мм	R мм	Δw_{\max} мм	R мм	Δw_{\max} мм
2 ⁶	2	6	64	10,5	0,43	8,70	0,50	7,62	0,79
2 ⁷	2	7	128	18,4	0,30	15,8	0,34	13,6	0,63
2 ⁸	2	8	256	32,7	0,20	29,2	0,22	24,6	0,51
2 ⁹	2	9	512	58,8	0,12	54,6	0,13	45,4	0,41
2 ¹⁰	2	10	1024	107	0,05	103	0,06	84,6	0,34
2 ¹¹	2	11	2048	196	0,00	197	0,00	159	0,27
3 ⁴	3	4	81	18,6	0,42	13,8	0,47	12,4	0,61
3 ⁵	3	5	243	46,5	0,30	36,0	0,33	31,6	0,47
3 ⁶	3	6	729	120	0,21	96,8	0,23	83,2	0,37
3 ⁷	3	7	2187	314	0,15	266	0,16	225	0,29

На рис. 4.8 в координатах радіус диска – максимальна різниця ширини нанесені точки, що відповідають кодовим послідовностям. Як видно з діаграми, найбільшу різницю ширини елементів символів може забезпечити широтне кодування. Лише широтне кодування дає змогу побудувати кодові диски радіусом понад 120 мм із прийнятною різницею ширини смуг (понад 0,254 мм).

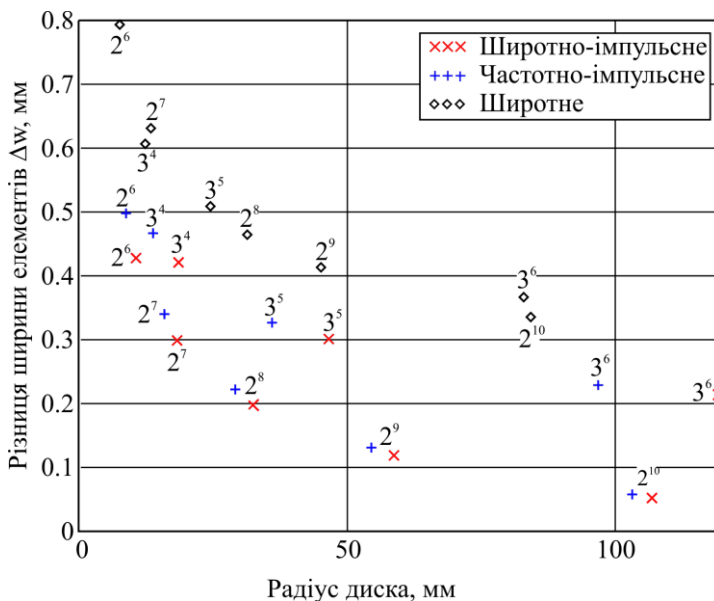


Рис. 4.8. Радіус диска та мінімальна різниця ширини елементів для різних кодувань та ПВП

4.4 Вибір коду для диска заданого радіусу

Роздільна здатність сенсора кута зв'язана з діаметром кодового диска, і зростає при його збільшенні. Однак, при проектуванні сенсорів кута на діаметр кодового диска накладаються додаткові обмеження: розміри корпусу, стійкість до деформації і т. д, тому на етапі вибору кодової послідовності діаметр диска часто вже визначений і фіксований. За таких умов виникає потреба в алгоритмі проектування кодової доріжки для диска заданого радіусу.

Для прикладу розглянемо процедуру проектування кодового диска активним радіусом $R=23,5$ мм, що зчитується фотоматрицею еквівалентною довжиною 7,22 мм. Для надійної класифікації символів потрібно забезпечити мінімальну ширину прозорої ділянки 0,351 мм, непрозорої – 0,254 мм та мінімальну різницю ширини елементів символів 0,254 мм.

За допомогою формул (4.10-4.15) розраховуємо максимально допустимі значення різниці ширини елементів символів та відповідні їм радіуси дисків для заданих послідовностей. Результати розрахунку відкладаємо на діаграмі (рис. 4.9). Области недопустимих радіусів та недопустимих різниць ширини елементів заштриховуємо. Кодові доріжки, що потрапляють в незаштриховану область можуть стати основою для проєктованого диска.

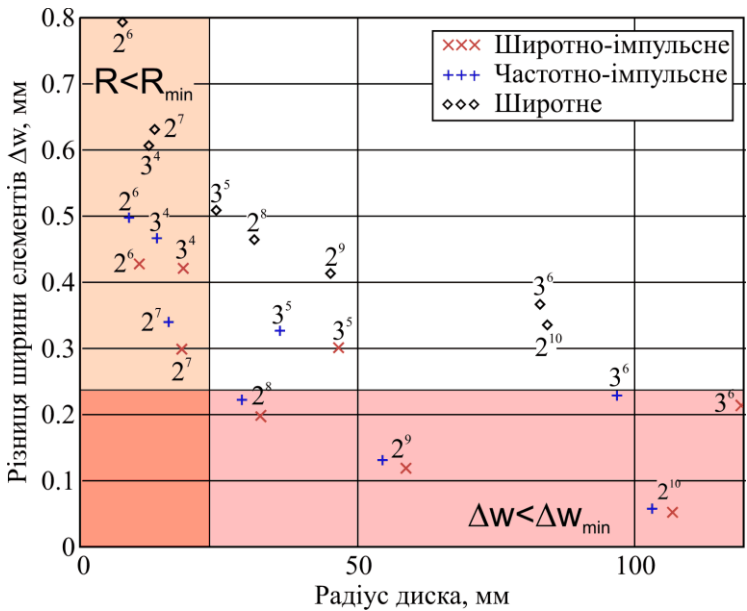


Рис. 4.9. Вибір методу кодування

При виборі кодової послідовності та методу кодування слід зважити на застосований метод локалізації секторів, можливі спотворення та забруднення диска. Для прикладу розглянемо кодовий диск на основі частотно-імпульсно-кодованої М-послідовності 3⁵. Кодова доріжка на основі М-послідовності записана частотно-імпульсним кодуванням дозволяє досягнути найкращого заповнення диска, однак, не дозволяє побудувати диск довільного радіусу (див. рис. 4.6). Відкидання частини кодової

послідовності в загальному випадку приводить до втрати властивості циклічної унікальності. Для відновлення цієї властивості усічену послідовність можна доповнити додатковим спец-символом "кінець доріжки". Для частотно-імпульсного кодування символ "кінець доріжки" можна позначати збільшенням розділювача останнього символу (на рис. 4.10 позначений "E"). Для широтного кодування символ "кінець послідовності" можна позначати символом шириною на Δw більшою за ширину найширшого символу w_{p-1} (рис. 4.10).

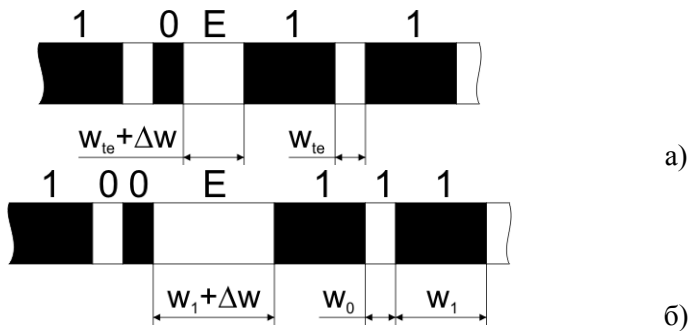


Рис. 4.10. Символ "кінець доріжки"

а) частотно-імпульсне кодування; б) широтне кодування

Далі, генеруємо М-послідовність 3^5 методами, описаними в [83], замінюємо символи так, щоб послідовність із р найширших символів не зустрічалася (для послідовності 3^5 замінюємо $1 \rightarrow 2 \rightarrow 0 \rightarrow 1$).

```

00000210211211200122101112120112212000
110212022200222100001021010010102020221
10001210200100212100112101220200022102
22022221111120120020021102201000202100
22021110012021221122201111012010110101
21212200111020121101120201100201022121
11220122212222

```

Виходячи з мінімальних розмірів сектора та розмірів ділянки диска, що проектується на поверхню фотоматриці можна розрахувати допустиму різницю ширини секторів. Для однозначного визначення положення диска з М-послідовністю 3^5 достатньо, щоб на матрицю одночасно проектувалося $k=5$ символів. Будемо вимагати, щоб на матрицю проектувався додатковий $k'=1$ символ, який дозволить виявити помилки декодування кодового слова і підвищити надійність визначення положення. Отже, допустима різниця ширини символів для частотного кодування (4.12)

$$\Delta w_{\max} = \frac{7.22\dot{i}i - (5+1) \cdot (0.254\dot{i}i + 0.351\dot{i}i)}{(3-1) \cdot (5+1) - 1} = 0.326\dot{i}i, \quad ,$$

або в одиницях відліку кута (одиницях молодших розрядів сенсора)

$$w_{oeA} = \left[\frac{w_{oe}}{R} \frac{2^{16}}{2\pi} \right] = 112, \quad w_{ieA} = \left[\frac{w_{ie}}{R} \frac{2^{16}}{2\pi} \right] = 156$$

$$\Delta w_A = \left[\frac{\Delta w_{\max}}{R} \frac{2^{16}}{2\pi} \right] = 144,$$

де w_{oeA} та w_{ieA} – кутова ширина мінімальної прозорої та непрозорої ділянки; Δw_A – кутова ширина приросту; .

Отже, довжина непрозорих ділянок символів "0", "1" та "2" відповідно рівні 112, 256 та 400 одиниць відліку кута; ширина розділювача – 156 одиниць відліку кута. Повна довжина символів "0", "1" та "2" відповідно рівні $w_0=268$, $w_1=412$, $w_2=556$.

Щоб обмежити довжину кодової доріжки, відкидаємо по одному символу з послідовності, розраховуємо загальну довжину і порівнюємо її із заданою ($2^{16}-w_E$ одиниць відліку кута). Процедуру повторюємо доти, доки довжина обмеженої послідовності не стане меншою за задану. Для нашої послідовності ця умова виконається для суми перших $N=188$ символів. Далі, послідовність доповнюється символом "кінець доріжки".

Різниця між отриманою та заданою довжиною послідовності може коливатися в межах $[0..w_2)$. Процедуру втинання послідовності повторюємо N раз, кожного разу циклічно зсуваючи вихідну послідовність на один елемент. Таким чином знаходимо обмежену послідовність, що найкраще вписується в задану довжину. Залишок різниці довжини між отриманою та заданою довжиною доріжки компенсуємо послідовним збільшенням ширини найширших ізольованих символів на одиницю кута.

На рис. 4.11 зображені диски, згенеровані за описаним алгоритмом.

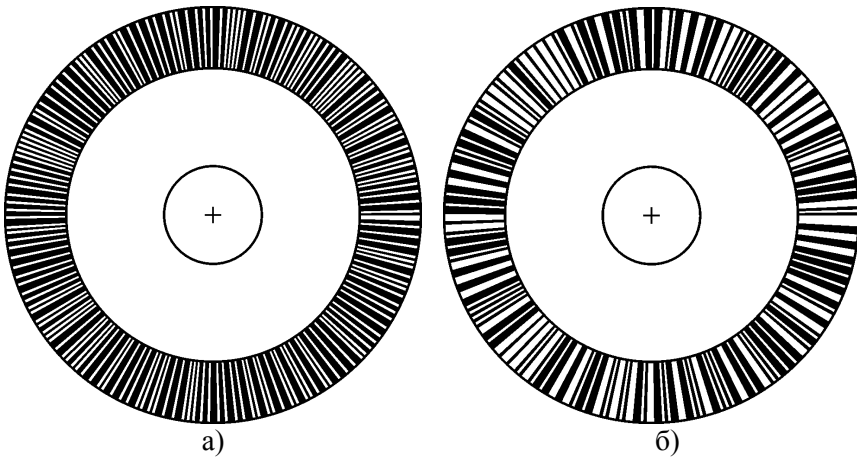


Рис. 4.11. Згенеровані кодові диски

а) 3^5 частотно-імпульсне кодування; б) 2^8 широтне кодування

Висновки

1. Проаналізовано методи кодування псевдовипадкової послідовності на диск. Встановлено, що від його вибору залежить співвідношення між розмірами символів, що впливає на надійність розпізнавання символів.
2. Запропоновано метод широтного кодування послідовності на диску оптичного сенсора кута, який полягає в кодуванні символів послідовності шириною секторів та відокремленні

символів чергуванням прозорих та непрозорих секторів. Використання запропонованого методу кодування дало змогу збільшити різницю ширини елементів символів, що зменшує ймовірність помилки розпізнавання символів, зменшити міжсимвольну інтерференцію та розширити діапазон допустимих радіусів дисків.

Запропоновано алгоритм вибору кодування для диску заданого радіусу.

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА КУТА

У п'ятому розділі наведено результати розроблення та аналіз експериментальних досліджень роботи інтелектуальних сенсорів кута. Описано функціональну схему та алгоритм роботи сенсора. Зокрема, відображено алгоритм резервування, який дає змогу в разі неможливості визначення положення за двома каналами визначити положення диска за зображенням лише з одного ОБФП. Описане технологічне програмне забезпечення для ЕОМ, яке дозволяє автоматизувати процес юстування та тестування сенсорів під час їх виготовлення.

5.1 Розробка функціональної схеми

Функціональна схема сенсора кута представлена на рис. 5.1 [44].

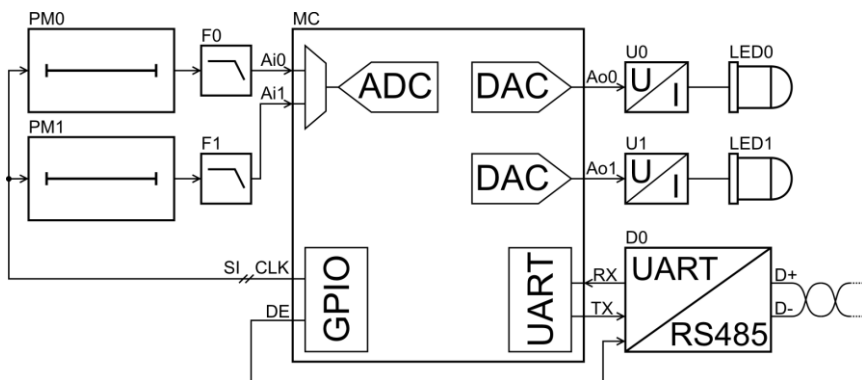


Рис. 5.1. Функціональна схема сенсора кута

Ядром електронної частини сенсора кута є мікроконтролер ADuC841 (MC), який реалізує функції оцифрування, обробки зображень, визначення положення, керування освітлювачами та взаємодії з вимірювальною системою. Вибір цього мікроконтролера зумовлений тим, що він містить швидко АЦП та

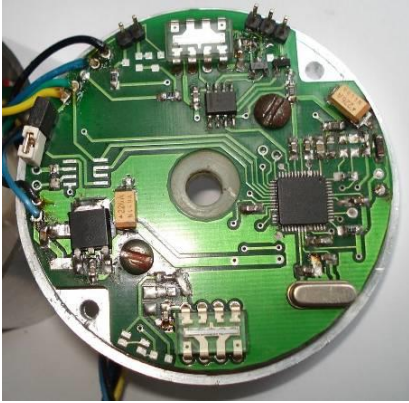
два канали ЦАП, що використовуються для керування освітлювачами.

Для отримання тіньового зображення кодового диска передбачені два ОБФП TSL1401 (PM0, PM1). ОБФП керуються двома цифровими сигналами SI (початок інтегрування) та CLK (тактові імпульси), спільними для обох мікросхем. Вихідні аналогові сигнали, що містять інформацію про розподіл освітленості ОБФП, по чергово оцифровуються аналогово-цифровим перетворювачем мікроконтролера. Така схема забезпечує отримання зображень двох фрагментів диску для одного і того ж моменту часу.

Для керування експозицією використовуються вбудовані канали цифро-аналогового перетворювача та перетворювачі напруга-струм (U0, U1). Це дає змогу плавно регулювати струм, а отже і яскравість світлодіодів-освітлювачів (LED0, LED1). При цьому тривалість експозиції може залишатися сталою.

Взаємодія з вимірювально-інформаційною системою відбувається за допомогою інтерфейсу RS485 (D0) в напівдуплексному режимі. Напруга +5В, що використовується для живлення вузлів сенсора виробляється лінійним стабілізатором MC78M05. Допустима вхідна напруга живлення 7..35 В, споживаний струм – близько 50 мА.

На рис. 5.2 зображено дослідний зразок сенсора абсолютного кута, реалізованого на мікроконтролері AduC841 та ОБФП TSL1401.



а)



б)

Рис. 5.2. Дослідний зразок (а) та кодовий диск (в)

На рис. 5.3 зображено антенну систему Квазар+7,6 разом із розробленими оптоелектронними сенсорами кута, встановленими на осі азимута та кута місця.

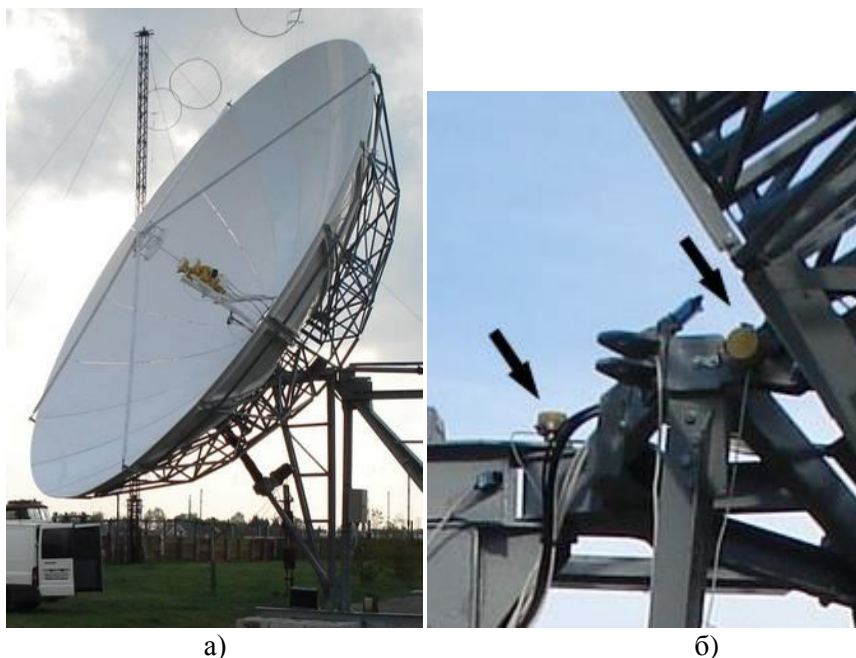


Рис. 5.3. Квзар+7,6 (а), сенсори, закріплені на ОПП (б)

5.2 Реалізація алгоритму функціонування

Отримання та обробка зображення диска реалізує мікроконтролер ADuC841. Після старту та ініціалізації розпочинається виконання головного циклу програми, в якому постійно відбувається опитування ОБФП, опрацювання зображень, визначення положення диска та опрацювання команд, отриманих послідовним інтерфейсом.

Опрацювання зображення складається з таких етапів (рис. 5.4).

1. Визначення глобального порогового рівня за формулою

$$u_{TH} = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min}) \cdot k_{TH}, \quad (5.1)$$

де u_{TH} - пороговий рівень;

u_{min} , u_{max} - рівень мінімальної та максимальної інтенсивності пікселів;

k_{TH} - коефіцієнт порогового рівня (0,26)

Якщо різниця між u_{max} та u_{min} менша за мінімально допустиму виникає помилка контрасту.

Характеристики світлодіода, ОБФП та кодового диску залежать від температури і змінюються в процесі старіння сенсора. Щоб компенсувати вплив цих процесів на отримані зображення, струм світлодіода корегується за максимальною інтенсивністю пікселя отриманого зображення u_{max} . Алгоритм корекції працює наступним чином: якщо u_{max} перевищує верхній поріг (0,996), то струм світлодіода зменшується на одну дискрету; якщо ж значення u_{max} не досягає нижнього порогу (0,863), то струм світлодіода збільшується на одну дискрету. Такий алгоритм дає змогу забезпечити максимальний контраст і не допустити насичення АЦП при зміні параметрів сенсора в процесі експлуатації.

2. Сегментація зображення на сектори. Щоб зменшити вплив забруднень та подряпин, алгоритм сегментації зображення використовує гістерезис – перехід від прозорого до непрозорого та навпаки фіксується по різних рівнях. Після сегментації кожний сектор інтерпретується символом виходячи з його ширини та рівня. Якщо розміри сектора менші мінімальних чи більші максимальних, програмне забезпечення сигналізує про помилку. В результаті успіху отримуємо рядок символів – фрагмент кодової послідовності.
3. Пошук входження отриманого фрагменту в рядку кодової послідовності. Для цього замість використання повільної бібліотечної функції `strstr` виконується пошук за допомогою хеш-таблиці. Якщо входження підпослідовності не вдається знайти, то програмне забезпечення сигналізує про помилку коду. В результаті успіху отримуємо кутове зміщення секторів фрагменту відносно початку відліку диска.

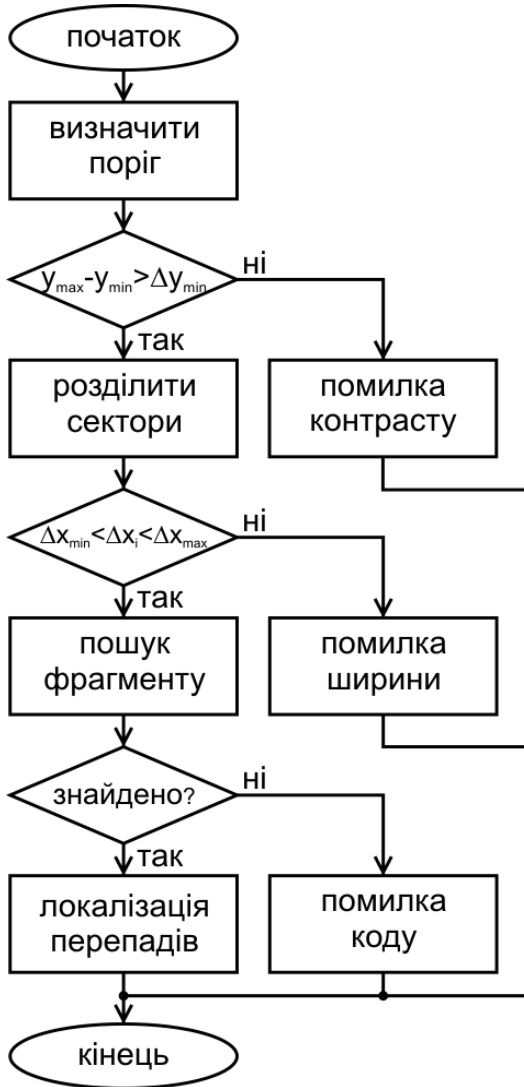


Рис. 5.4. Алгоритм опрацювання зображення

4. Субпіксельне уточнення положення меж секторів, що проєктуються на центр ОБФП. Щоб виключити похибку, пов'язану зі зміщенням визначених меж в протилежні

сторони, позиція визначається лише за спадними фронтами секторів: якщо центральний символ прозорий, враховується початок попереднього і кінець центрального, інакше – початок центрального і кінець наступного. Положення межі розраховується як точка перетину примежової кривої інтенсивності із пороговим рівнем. Пороговий рівень визначається застосуванням формули (5.1) для примежової ділянки.

5. Визначені положення меж тіней та кутове зміщення секторів фрагменту відносно початку відліку диска передаються функції визначення положення.

Алгоритм визначення положення диску схематично зображено на рис. 5.5. Наявність двох ідентичних каналів вимірювання дає змогу не лише послабити вимоги до точності виготовлення сенсора, але й зменшує ймовірність його відмови. Для підвищення надійності визначення положення кодового диска запропоновано механізм резервування, який за умови неможливості розпізнавання одного із зображень внаслідок поверхневих дефектів диска дозволяє визначати положення в одноканальному режимі – лише за одним зображенням [58]. При успішному розпізнаванні зображень обох каналів, положення диску визначається за методом, описаним в пункті 2.3.1. При цьому також розраховуються Δ_0 та Δ_1 – відхилення положень, визначених за кожним із каналів від положення визначеного за обома. При виникненні помилки опрацювання зображення одного з каналів положення диска визначається за іншим і корегується на величину відповідно Δ_0 чи Δ_1 . В такому випадку користувач отримує відповідне попередження. Така схема дає змогу успішно визначати положення диску при відмові одного з каналів, що суттєво підвищує надійність сенсора. Якщо інформація про зміщення недоступна, то значення Δ_0 та Δ_1 розраховуються з коефіцієнтів, збережених в енергонезалежній пам'яті на етапі калібрування. Калібрувальні коефіцієнти враховують постійне зміщення та ексцентриситет кодової послідовності.

$$\Delta_i = \text{Offset}_i + \text{Amplitude}_i \cdot \sin(\omega_i - \varphi_i),$$

де Offset_i – зміщення каналу i ($i=0..1$);

- $Amplitude_i$ – амплітуда похибки ексцентриситету каналу i ;
- ω_i – положення диска, визначене за каналом i ;
- φ_i – фаза похибки ексцентриситету каналу i .

Для кожної пари розпізнаних зображень також розраховується зміщення осі. Мікроконтролер зберігає мінімальне та максимальне зафіксоване зміщення осі в енергонезалежній пам'яті та видає їх за запитом користувача. Збережені значення зміщень можуть бути використані для виявлення зношення опор осі.

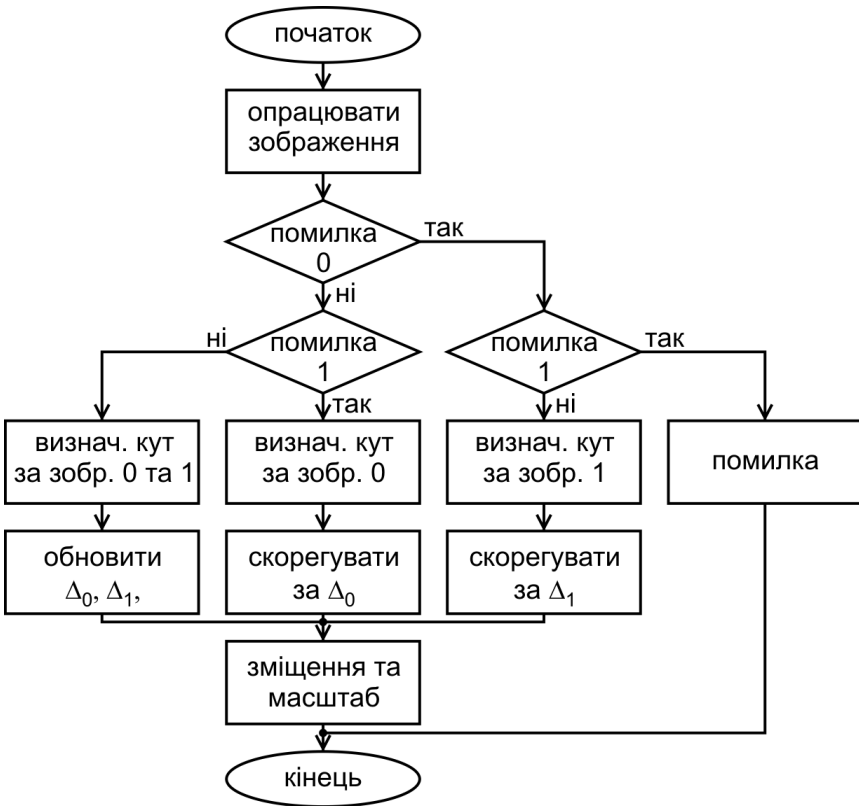


Рис. 5.5. Алгоритм визначення положення

Взаємодія з сенсором кута реалізована інтерфейсом RS485. Сенсор виконує роль підпорядкованого пристрою. Протокол передбачає команди, що повертають та встановлюють поточну позицію, роздільну здатність, інформацію про дату виготовлення, серійний номер, рівень освітленості, налаштування, швидкість зв'язку та калібрувальні коефіцієнти. Також передбачене віддалене оновлення програмного забезпечення, режим пониженого енергоспоживання, команди, що повертають зміщення осі, температуру та необроблене зображення з ОБФП.

Характеристики сенсора покращені шляхом введення таких інтелектуальних функцій як розрахунок кутової швидкості за визначеним кутом, адаптація алгоритму вимірювання кута до відмови одного із каналів, виявлення дефектів диска, діагностика зношення опор, адаптація до зміни характеристик світлодіода, кодового диска та ОБФП. Введення зазначених функцій дало можливість підвищити надійність та розширити функціональні можливості розробленого сенсора.

Для налаштування та діагностики сенсора розроблене технологічне програмне забезпечення для ЕОМ. Програма Optocontrol взаємодіє з сенсором кута через системний послідовний інтерфейс та надає оператору доступ до вимірювальних та діагностичних функцій сенсора. Optocontrol додатково реалізує ряд технологічних функцій як от оновлення мікропрограми контролера, контроль різниці показів каналів чи розрахунок калібрувальних коефіцієнтів.

Графічний інтерфейс програми організовано у вигляді набору сторінок, кожна з яких призначена для виконання визначеного набору операцій. Сторінка Position (рис. 5.6) відображає положення осі, визначене за одним чи двома каналами, час вимірювання та інформацію про помилки визначення положення. Передбачена можливість встановлення позиції.

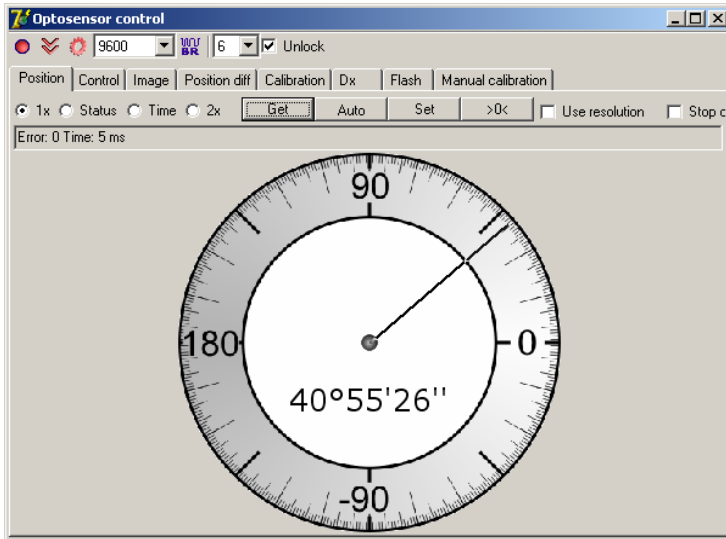


Рис. 5.6. Програмне забезпечення в режимі вимірювань

Сторінка Control (рис. 5.7) призначена для ручного керування освітлювачами, режимом роботи та роздільною здатністю сенсора. На сторінці відображається інформація про виготовлення, максимальне зафіксоване зміщення осі та температуру мікроконтролера.

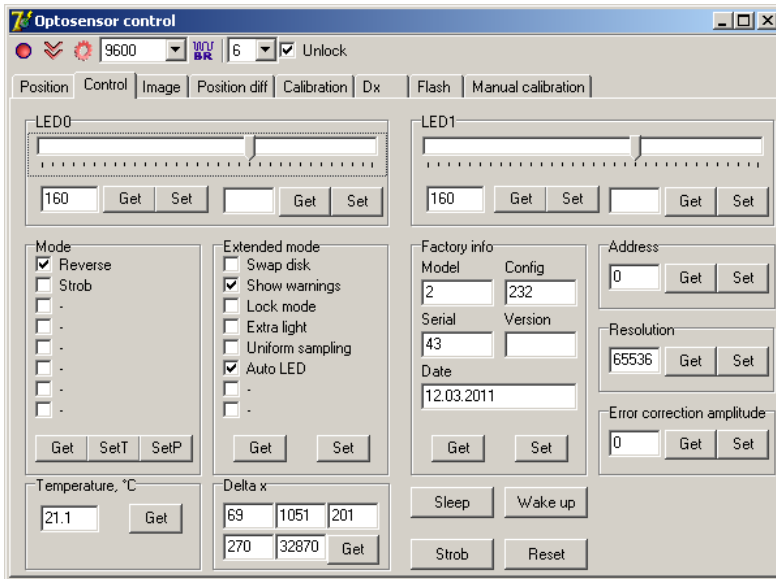


Рис. 5.7. Програмне забезпечення в режимі налаштування

На сторінці Position diff (рис. 5.8) відображаються результати самотестування сенсора кута. В цьому режимі програмне забезпечення опитує сенсор та при обертанні його осі будує графік зміни різниці показів каналів як функцію показів першого каналу. Отримані результати використовуються для контролю якості диска та відсутності помилок визначення положення. За різкими викидами на графіку можна робити висновок про ділянки кодового диску, що не можуть бути розпізнаними через спотворену поверхню чи похибки виготовлення.

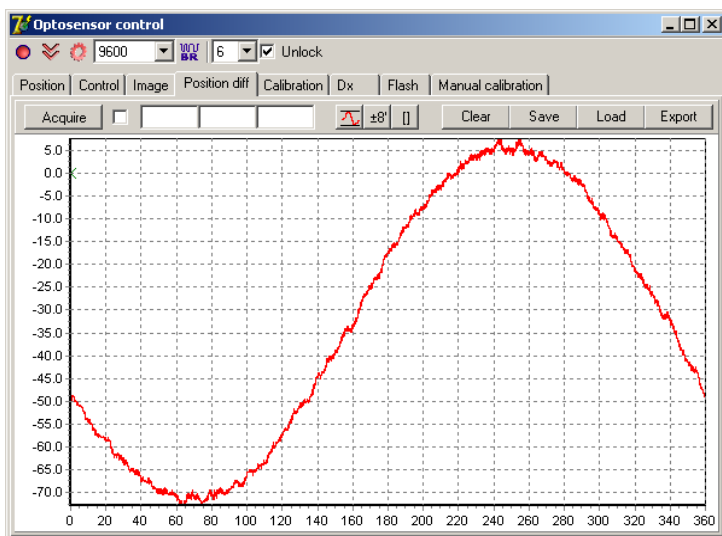


Рис. 5.8. Відображення графіку зміни різниці показів каналів

В режимі розрахунку калібрувальних коефіцієнтів (рис. 5.9) технологічне програмне забезпечення опитує сенсор кута та при обертанні осі будує графік залежності показів каналу 0 та 1 від показів, розрахованих за обома каналами. Після повного оберту осі сенсора програмне забезпечення виконує перетворення Фур'є отриманих даних, визначаючи таким чином зміщення, амплітуду та фазу відхилення показів каналів від показів, розрахованих за обома каналами. Отримані коефіцієнти зберігаються в енергонезалежній пам'яті сенсора та використовуються для розрахунку зміщень Δ_0 , Δ_1 .

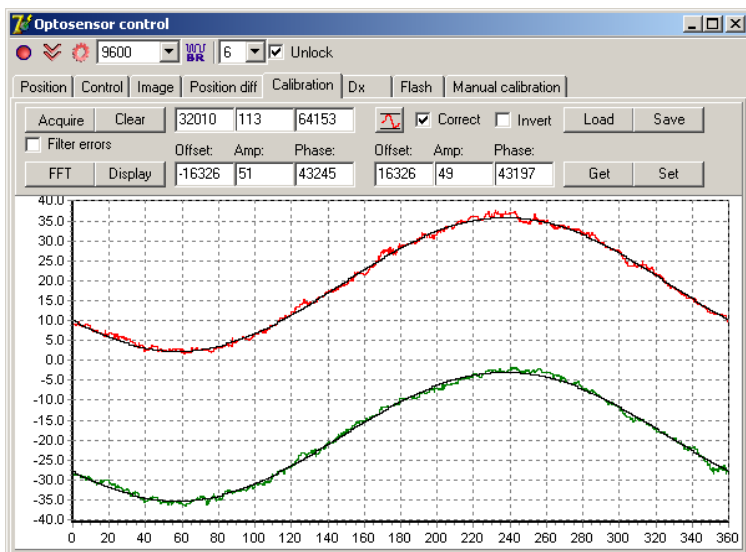


Рис. 5.9. Програмне забезпечення в режимі калібрування каналів

Режим відображення зображення (рис. 5.10) дає змогу контролювати якість диску та правильність складання сенсора.

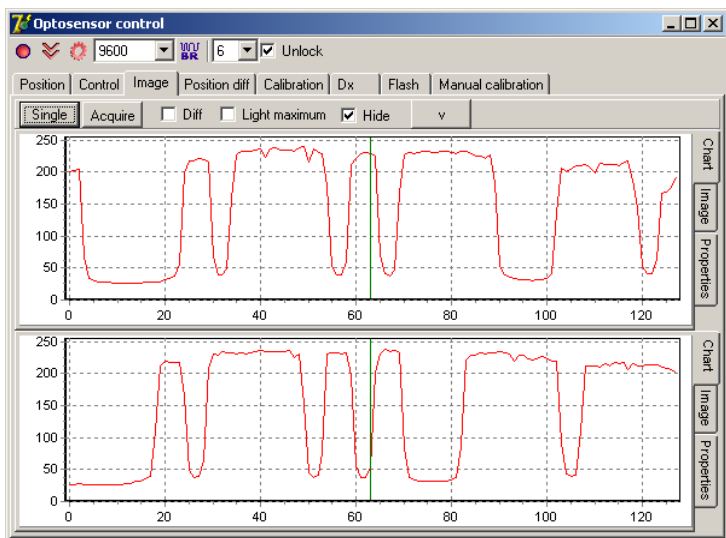


Рис. 5.10. Контроль якості диска та ОБФП

5.3 Дослідження похибок сенсора кута

5.3.1 Стенд автоматизованої перевірки сенсорів кута

Похибка відхилення від лінійності оптоелектронних сенсорів кута має складний характер і змінюється з кроком в декілька мінут. Окрім того, забруднення кодового диску може призвести до грубих похибок визначення кута на певних ділянках діапазону вимірювання. Щоб виявити такі похибки необхідно перевіряти сенсор із кроком, співрозмірним із його роздільною здатністю. Для вирішення цієї задачі розроблений стенд контролю сенсорів кута [61]. Стенд складається з п'ятиступінчатого циліндричного редуктора, вхідний вал якого обертається кроковим двигуном, а вихідний – з'єднаний із віссю досліджуваного сенсора. Роздільна здатність обертання осі сенсора складає 5,4". Програмне забезпечення стенду синхронно з відпрацюванням кроків опитує сенсор і запам'ятовує отримане положення. Отриманий графік зміни відхилення показів сенсора від положення вихідного валу

зображено на рис. 5.11. Суттєвим недоліком стенду є велика кінематична похибка редуктора ($17'$), що обмежує його застосування виявленням грубих похибок.

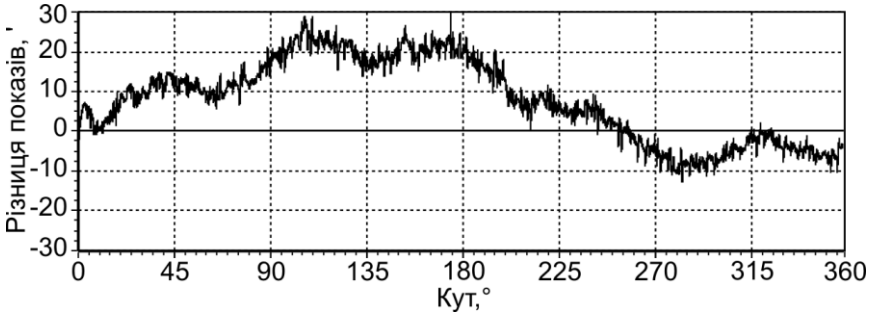


Рис. 5.11. Результати дослідження похибки на розробленому стенді

5.3.2 Порівняння показів розроблених сенсорів

Для експериментального підтвердження ефективності запропонованих рішень перевірили похибки дослідних взірців сенсорів кута. Для цього розроблений сенсор за допомогою жорсткої муфти закріпили на одній осі з сенсором USDigital A2. Заявлена межа похибки USDigital A2 – $\pm 2,6'$ (12 біт), при роздільній здатності $20''$ (16 біт). Щоб зафіксувати розбіжність показів, обидва сенсори синхронно опитували під час обертання їхніх осей. Результати порівняння представлені на рис. 5.12. Подвійна амплітуда отриманої залежності – $8,2'$, с.к.в – $1,3'$. Подвійна амплітуда залежності після вилучення перших двох гармонік – $\pm 5,6'$, с.к.в – $0,77'$.

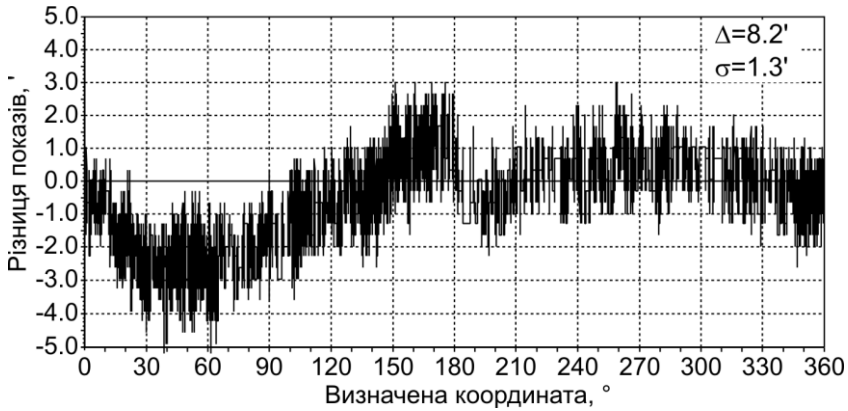


Рис. 5.12. Порівняння показів розробленого сенсора з показами USDigital A2

Наступний експеримент полягав у порівнянні показів двох зрізів сенсора кута закріплених на одній осі за допомогою жорсткої муфти. Подвійна амплітуда отриманої залежності (рис. 5.13) становить 4', с.к.в – 0,65', що вдвічі краще результату порівняння з А2. Подвійна амплітуда отриманої залежності без перших двох гармонік – 2,6', с.к.в – 0,45'.

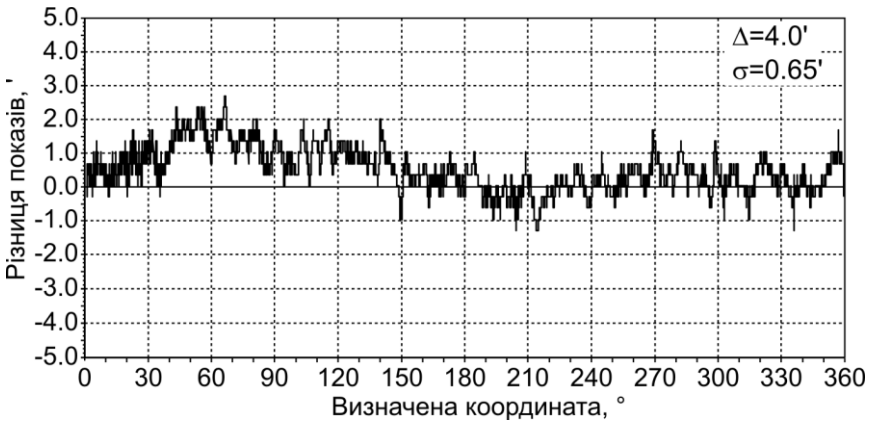


Рис. 5.13. Порівняння показів двох екземплярів розробленого сенсора

В обох випадках частина різниці показів сенсорів спричинена механічною деформацією конструкції дослідного стенду. Менший рівень високочастотних компонентів у другому досліді свідчить про ефективність застосованого алгоритму локалізації межі тіні на основі лінійної інтерполяції фільтрованого зображення (ЛФЗ).

5.3.3 Дослідження похибок за зразковим сенсором кута

Похибки розробленого сенсора кута дослідили шляхом порівняння його показів із показами зразкового приладу. Обладнання для перевірки надало ПАТ "Фіолент". Стенд повірки побудований на основі інкрементного сенсора кута HEIDENHAIN ROD 800 (межа похибки – $\pm 1''$) та засобу відображення VRZ-560 (рис. 5.14). Між осями сенсорів встановлена захисна фрикційна муфта.

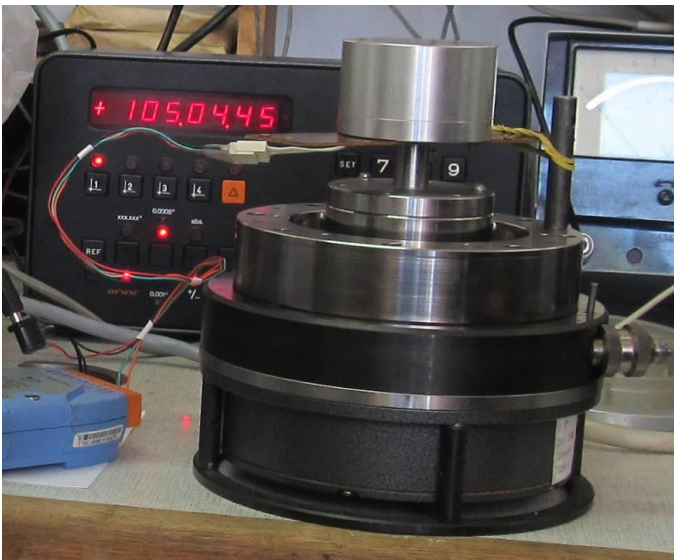


Рис. 5.14. Стенд дослідження точності сенсорів кута (ПАТ Фіолент)

Зафіксована розбіжність показів графічно представлена на рис. 5.15. Мультиплікативну похибку ($10''$) можна пояснити проковзуванням фрикційної муфти, спричинене перевищенням

допустимого моменту опору у вузлі ущільнення розробленого сенсора. На рис. 5.16 зображено відхилення отриманих даних від лінійної залежності.

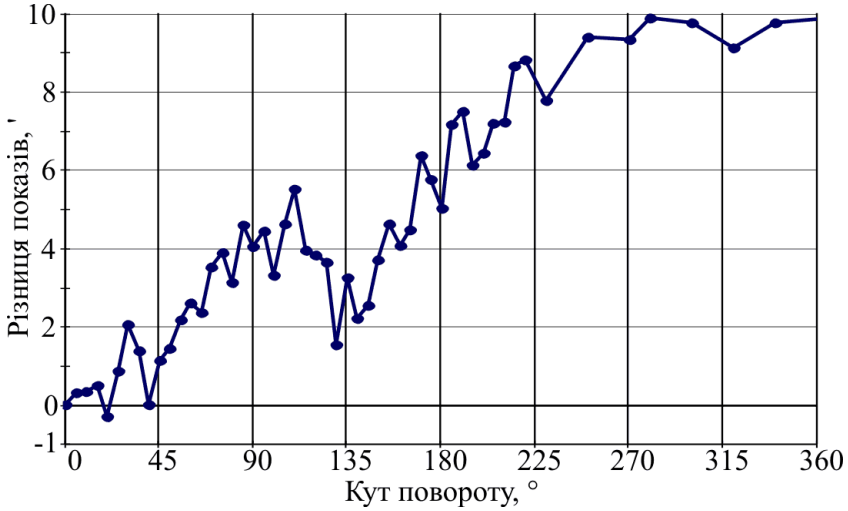


Рис. 5.15. Результати дослідження похибки сенсора кута

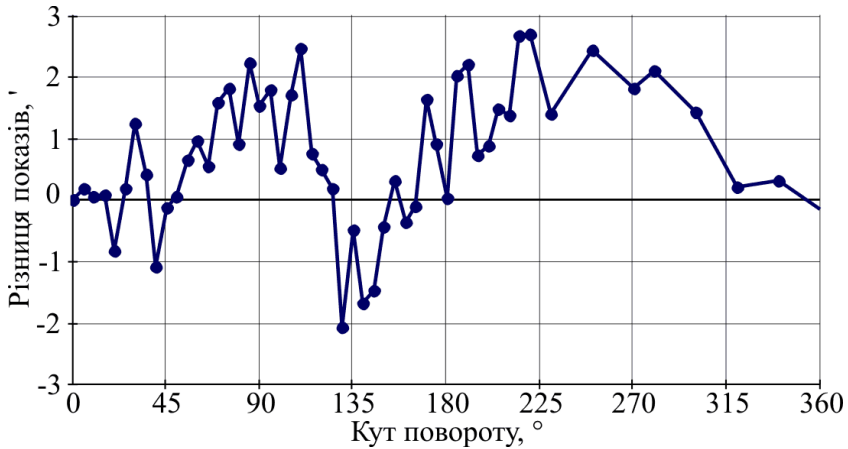


Рис. 5.16. Відхилення похибки від лінійної залежності

5.3.4 Дослідження похибок сенсора в складі антенної системи

Важливою характеристикою роботи сенсора кута є результуюча похибка системи, до якої він входить. Так, на ефективність роботи сенсора кута як відлікового пристрою антенної системи окрім власних похибок суттєво впливає якість спряження з конструкцією ОПП. Результати вимірювання додатково спотворюються похибками закріплення та механічним гістерезисом пружних елементів муфти.

Згідно вимог [5] для забезпечення точності наведення антени на сигнал супутника сенсор повинен забезпечувати роздільну здатність відліку кута, що не перевищує 1/10 ширини її діаграми направленості. Ширина діаграми направленості залежить від частотного діапазону сигналу та діаметру антени і може бути наближено розрахована за формулою [5]:

$$\theta_{\pm 3dB} = \frac{1.02 \cdot \lambda}{D},$$

де $\theta_{\pm 3dB}$ – ширина діаграми направленості по рівню ± 3 дБ, рад; λ – довжина хвилі, що приймається, м; D – діаметр рефлектора, м.

Антени з великим діаметром рефлектора мають досить вузьку діаграму направленості, що сягає десяти кутових мінут. Наприклад для антени з діаметром рефлектора 7 м в частотному діапазоні Ku (11/14 ГГц) ширина діаграми направленості по рівню ± 3 дБ становить 14 кутових мінут.

Похибки наведення антенної системи на супутник можна перевірити за умовою максимуму сигналу, використовуючи приймач пілот-сигналу супутника чи спектроаналізатор (рис. 5.17). Виходячи з цього запропонована методика комплексної перевірки роботи сенсора кута в складі антенної системи, що полягає в наступному.

Вибирають 4-5 штучних супутників Землі (ШСЗ), різниця кутових азимутальних координат між якими становлять 10-15 градусів. Антену наводять на максимальний сигнал кожного супутника і визначають координати супутників за фактичними показами кутових сенсорів. Порівнюючи покази кутових сенсорів з

розрахованими координатами супутників, знаходять різницю, яку приймають за похибку наведення.

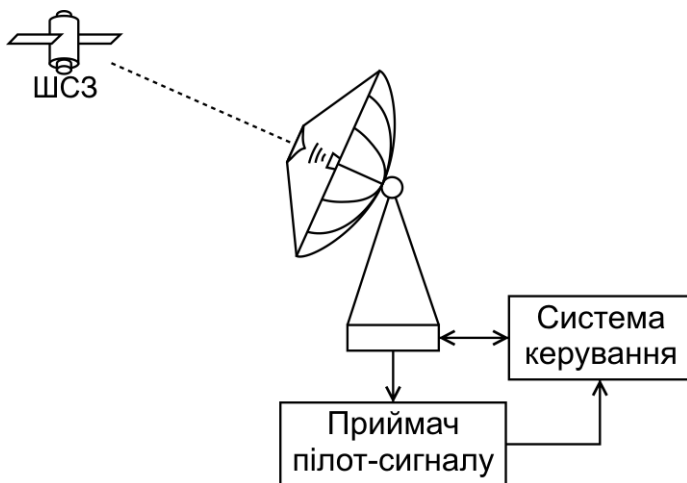


Рис. 5.17. Схема визначення максимуму сигналу з ШСЗ

Координати ШСЗ відносно системи координат, зв'язаної з місцем розташування антенної системи на земній поверхні на певний момент часу можна досить точно розрахувати за параметрами його орбіти. Такий розрахунок можна виконати за моделлю опису параметрів орбіт SGP4, яка враховує ряд додаткових факторів і поправок. Дані про параметри орбіт супутників, представлені у дворядковому форматі (Two-Line Element), запропонованому об'єднанням NORAD, доступні з інформаційних каталогів, наприклад, за адресою <http://celestrak.com/>. Дані каталогів періодично коригуються на основі вимірювань спеціальними технічними засобами системи спостережень за штучними космічними об'єктами.

Описаний метод дає змогу оцінити сумарні похибки сенсора кута в складі системи керування ОПП дзеркальної антени без використання зразкових засобів вимірювання кута таких як квадрант чи теодоліт.

5.4 Порівняння характеристик розробленого сенсора із світовими аналогами

В табл. 5.1 наведено порівняння характеристик розробленого сенсора з серійними зразками провідних світових виробників. За результатами порівняння характеристик сенсорів кута встановлено, що похибка розробленого сенсора на 30% менша за заявлену похибку сенсора USDigital A2, побудованого за аналогічною технологією, а собівартість втричі менша вартості згаданого сенсора. Собівартість та похибка розробленого сенсора в 10 разів нижча за вартість та похибку сенсора OMRON E6C3-AG5C, створеного на основі кодового диска Грея.

Таблиця 5.1.

Порівняльна таблиця параметрів сенсорів кута

Модель	Технологія ¹	Розрядність, біт	Похибка, "	Діаметр, мм	Прив'язка	Чутливість до забруднень	Ціна, USD
РИФТЭК РФ701	X	12	900	46	+	низька	?
OMRON E6C3-AG5C	ОГ	10	>1266		-	висока	926
СКБИС ЛИР-ДА119	ОР	15	150	19	+	висока	?
СКБИС ЛИР-ДА158	ОР	17	30	57	+	висока	?
СКБИС ЛИР-ДА190	ОР	24	5	90	+	висока	?
Heidenhain ECN 413	ОР	13	60	80	+	висока	?
Heidenhain RCN 8510	ОР	29	1	20 0	+	висока	?
Renishaw Resa 52	П2	26	5,5 ²	52 ³	+	низька	?
Renishaw Resa 550	П2	26	0,5 ²	55 0 ³	+	низька	?
AMO WMFA- 1010-0256	A	20	50 ²	82 ³	+	низька	?
AMO WMFA- 1010-1024	A	22	3,8 ²	32 6 ³	+	низька	?
Inductosyn 3.0	I	*	15	76, 2	?	низька	?
Inductosyn 12.3	I	*	2	31 2	?	низька	?
Fraba Posital OCD-...-16	ОГ	16	80	58	+	висока	?

Fraba Posital MCD-...	X	12	1260	33	+	низька	?
Pepperl-Fuchs AVS58-0	ОГ	16	40	58	-	низька	?
ELCIS 958SC16	ОГ	16	40	58	+	висока	?
ELCIS 100D/180000	ОР	18	5	100	-	висока	2000
SICK ARS60	?	13	108	60	-	висока	?
Megatron M600	П	16	180	63,5	+	середня	500
USDigital A2	П	16	>160	63,5	+	середня	500
Розроблений	П	16	120	64	+	низька	100 ⁴

Примітки:

¹ – X – вимірювання напрямку магнітного поля; ОР – оптичний із растровим інтерполятором; ОГ – оптичний із кодом Грея; П – на основі ПВП; П2 – на основі ПВП із двовимірним зчитуванням; А – AMOSIN.

² – не враховує похибок монтажу;

³ – не враховує габаритів головки зчитування;

⁴ – оцінка собівартості;

* – параметр відсутній

? – параметр невідомий.

Висновки

1. Описано функціональну схему та конструкцію інтелектуального оптоелектронного сенсора абсолютного кута, малочутливого до зміщення осі диска.
2. Описано алгоритм визначення положення за зображеннями фрагментів кодового диску та алгоритм резервування, який дає змогу в разі неможливості визначення положення за двома каналами визначати положення диска за зображенням лише з одного ОБФП.
3. Описане технологічне програмне забезпечення для ЕОМ, яке уможливило налаштування, тестування та юстування сенсора кута під час його виготовлення.

4. Приведені результати експериментальних досліджень точності розробленого сенсора кута.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У монографії розв'язана важлива науково-прикладна задача з розробки оптоелектронних сенсорів кута з покращеними характеристиками. Проведені дослідження дали змогу покращити точність, надійність та спростити технологію виготовлення сенсора. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано та класифіковано методи вимірювання кута. З'ясовано, що завдяки високій точності, швидкодії, нечутливості до електромагнітних завад, відсутності контакту перспективними є оптоелектронні методи вимірювання. Проблемою їх використання є високі вимоги до точності механічних вузлів та складні оптичні схеми.
2. Створено математичну модель оптоелектронного сенсора кута, що враховує конструктивні параметри, похибки виготовлення та особливості оптоелектронного визначення положення межі сектора однодоріжкового кодового диска. За її допомогою проаналізовано вплив дестабілізуючих факторів на похибку вимірювання кута і встановлено, що найсуттєвішими з них є випадкові зміщення та ексцентриситет кодового диска.
3. Удосконалено метод визначення кута, малочутливий до радіального та осевого зміщення кодового диска, який, завдяки опрацюванню зображення з двох протилежно встановлених фотоматриць, дає змогу виключити випадкові зміщення та ексцентриситет диска.
4. Запропоновано метод оцінки ефективності субпіксельних методів локалізації перепадів інтенсивності зображення для оптоелектронних сенсорів кута, який враховує коливання визначеної координати при зміщенні перепаду в межах пікселя, що дало змогу дослідити ефективність алгоритмів локалізації межі тіні. Метод визначення положення перепаду інтенсивності за перетином з пороговим рівнем удосконалено шляхом використання гаусової фільтрації та адаптивного вибору порогу, що дозволило зменшити похибку локалізації в 3 рази.
5. Запропоновано метод широтного кодування, який полягає в представленні символів послідовності секторами різної ширини з чергуванням прозорих та непрозорих смуг, що зменшує міжсимвольну інтерференцію, ймовірність помилки

розпізнавання символів кодового диска та дозволяє розширити діапазон допустимих радіусів дисків.

6. Результати досліджень використані при розробці оптоелектронного сенсора кута, малочутливого до зміщення осі диска. Використання двох каналів зчитування та удосконалених методів обробки зображення дозволило послабити вимоги до точності механічних вузлів, вдвічі зменшити похибки, знизити собівартість та ймовірність відмови сенсора. Взірці розробленого сенсора проходять досліду експлуатацію в складі антенних систем "Жасмин", "Витязь-7" та "Квазар+7,6". Отримані результати в подальшому також можуть бути використані при створенні оптоелектронних сенсорів лінійних переміщень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. с. SU1571759 СССР : МПК5 Н 03 М 1/24. Многоэлементный фотоприемник для преобразователей линейных и угловых перемещений в код / С.В. Свечников, В.Б. Богданович, А.Л. Паламарчук, А.П. Кияновский, Ю.В. Ушенин ; заявитель и патентообладатель Институт полупроводников АН УССР. – 4479070/24-24 ; заявл. 29.08.88 ; опубл. 15.06.90, Бюл. №22.
2. А.с. SU641484 СССР : МПК² G08 С 9/06. Фотоэлектрический преобразователь угла поворота вала в код / В.Б. Богданович, П.В. Здрилук, С.В. Свечников, И.Н. Хмелевский ; заявитель и патентообладатель Институт полупроводников АН УССР. – заяв. 10.07.77 2506404/18-24 ; опубл. 05.01.79 Бюл. №1.
3. Ацюковский В. А. Ёмкостные дифференциальные датчики перемещения / Ацюковский В. А. – М. : Гос. энергетическое изд., 1960. – 103с.
4. Баканов М. В. Информационные микромашины следящих счётно-решающих систем (вращающиеся трансформаторы, сельсины) / Баканов М. В., Лыскина В. А., Алексеев В. В. – М. : Сов. радио, 1977. – 88 с.
5. Белянский П.В. Управление наземными антеннами и радиотелескопами / Белянский П.В., Сергеев Б. Г. – М. : Сов. Радио, 1980. – 280 с.
6. Білінський Й. Й. Застосування методу просторової модуляції для вимірювання параметрів обертального руху / Білінський Й. Й., Білінська М. Й., Кухарчук В. В. // Автоматика-2006 : 13-а міжнар. конф., 25-28 вер. – 2006 р. : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 157.
7. Білінський Й. Й. Метод субпіксельного визначення краю об'єкта на зображенні на основі низькочастотної фільтрації / Білінський Й. Й., Мотигін В. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3. – С. 5–8.
8. Білінський Й. Й. Методи обробки зображень в комп'ютеризованих оптико-електронних системах: монографія / Й. Й. Білінський. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 272 с.

9. Білінський Й. Й. Субпiксельне вимiрювання геометричних параметрiв сегментних елементiв зображення / Білінський Й. Й. // Методи та прилади контролю якостi. – 2007. – Вип. 19. – С. 35-39.
10. Боккер П. Передача данных (Техника связи в системах телеобработки данных) / Боккер П.; [пер. с нем. под ред. Д.Д. Кловского]. – М. : Связь, 1980. – Т. 1: Основы. – 1980. – 264 с.
11. Бриндли К. Измерительные преобразователи : Справочное пособие; пер. с англ. / Бриндли К. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
12. Васильев В. Н. Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах [Электронный ресурс] / Васильев В. Н., Гуров И.П., Потапов А.С. // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению "Информационно-телекоммуникационные системы", 2008. – 46 с. – Режим доступа: <http://www.ict.edu.ru/ft/005648/62325e1-st12.pdf>
13. Введение в контурный анализ: приложения к обработке изображений и сигналов / [Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев и др.]; под ред. Я.А. Фурмана. – 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с.
14. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / [Э.Н. Асиновский, А.А. Ахметжанов, М.А. Габидулин и др.] ; под ред. А.А. Ахметжанова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
15. Высокоточные угловые измерения / [Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин и др.] ; под ред. Ю.Г. Якушенкова, М. : Машиностроение, 1987. – 480 с.
16. Войтович И. Д. Интеллектуальные сенсоры: Учебное пособие / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаб. Знаний, 2009. – 624 с.
17. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах / Вульвет Дж. ; [пер. с англ. под ред. А.С. Яроменка]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 200 с.

18. Габидулин М. А. Фотоэлектрические цифровые преобразователи перемещений пространственного кодирования / Габидулин М. А. // Штучний інтелект. – 2008. – №3. – С. 272-281.
19. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
20. Гуревич М. М. Введение в фотометрию / М. М. Гуревич – Л: Энергия, 1968. – 244 с.
21. Датчики измерительных систем : [Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.] ; пер. с франц. Н.В. Васильченко и др. – М. : Мир, 1992. – 480 с. : в 2-х кн., кн. 1.
22. Домрачев В.Г. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений : Справочное пособие / В.Г. Домрачев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
23. Емкосины / [Ф.Б. Гриневиц, М.Н. Сурду, А.С. Левицкий и др.] ; отв. ред. Новик А.И.; АН УССР. Ин-т электродинамики. – Киев : Наук. думка, 1990. – 168 с.
24. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем: навчальний посібник / Зайченко Ю.П. – К. : Видавничий дім «Слово», 2004. – 352 с.
25. Конюхов Н.Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства / Н. Е. Конюхов, А. А. Плут, П. И. Марков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
26. Коротаяев В.В. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений: Учебное пособие. / В.В. Коротаяев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев. – СПб : НИУ ИТМО, 2012–. – Ч 1 : Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений – 2012. – 114с.
27. Краснобаев А.А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации / Краснобаев А.А. – М.: ИПМ РАН, 2005. – 19 с. – (Препринт / РАН, ИПМ; № 114).
28. Кухарчук В. В Оптико-електронний засіб вимірювань кута повороту і кутової швидкості / Кухарчук В. В., Білинська М. Й. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №5. – С. 16–19.

29. Лепіх Я.І. Особливості створення хвилеводних структур для датчиків переміщень на ПАХ / Я.І. Лепіх, В.К. Лопушенко, В.А. Піддубний, Н.Ф. Жовнір // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2008. – №3. – С. 24-27.
30. Лурье А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М. : Госс. изд. физ.-мат. литературы, 1961. – 824 с.
31. Мелик-Шахназаров А.М. Измерительные приборы со встроенными микропроцессорами / Л.М. Мелик-Шахназаров, М.Г. Маркатун, В.А. Дмитриев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
32. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
33. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах / Мирский Г.Я. –М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.
34. Олексенко П. Ф. Оптиелектронний цифровий датчик кута повороту / П.Ф. Олексенко, Ю.В. Ушенін, Ю.В. Коломзаров, [та ін.] // *Наука та інновації*. – 2007. – Т 3.– № 6. – С. 4–12.
35. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. 2-е изд., перераб. и доп. / Орнатский П.П. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 455 с.
36. Основи побудови перспективних безпроводових сенсорних мереж : монографія / [М.Д. Гераїмчук, О.В. Івахів, М.І. Паламар, Б.М. Шевчук] ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 124, [2] с.
37. Паламар М. І. Визначення положення меж тіней в оптиелектронних датчиках кута / М. І. Паламар, А. В. Чайковський // *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : міжн. наук.-тех. конф., 19-21 травня 2010 р.* – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 235-236.
38. Паламар М. І. Вимірювання зміщення кодового диска давача кута / М. І. Паламар, А. В. Чайковський // *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., 11-12 травня 2011 р.* – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – С. 61-62.
39. Паламар М. Дослідження оптичного методу визначення положення кодового диска давача кута / М. Паламар,

- А. Чайковський // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2009. – № 3. – С. 110-117.
40. Паламар М.І. Комп'ютерні вимірювальні системи для дослідження біопотенціалів зорового аналізатора : дис. канд. техн. наук: 05.11.05 / Паламар Михайло Іанович. – Тернопіль, 1998. – 158 с.
 41. Паламар М. І. Моделювання зображення тіні сектора кодового диску оптоелектронного датчика кута / М. І. Паламар, А. В. Чайковський // ІХ міжн. наук.-техн. конф. Приладобудування 2010: стан і перспективи : зб. тез доповідей, 27-28 квітня 2010. – К. : ПБФ НТУ «КП», 2010. – С. 97.
 42. Паламар М. І. Оптико-електронний датчик кута для систем наведення великогабаритних антенних систем на космічні апарати / М. І. Паламар, А. В. Чайковський // VII міжн. наук.-техн. конф. Приладобудування 2008: стан і перспективи : зб. тез доповідей, 22-23 квітня 2008р. – К. : ПБФ НТУ «КП», 2008. – С. 84-85.
 43. Паламар М. Особливості прийому інформації дистанційного зондування Землі з низькоорбітальних космічних апаратів / Паламар М.І. // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя. – 2008. – № 2 – с.121-126.
 44. Паламар М. Розробка та метрологічний аналіз прецизійного датчика кута для антенних систем / М. Паламар, А. Чайковський // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – № 4. – С. 158-165.
 45. Паламар М. І. Спосіб компенсації похибок механічних вузлів оптико-електронного давача кута / М.І. Паламар, А.В. Чайковський // Всеукр. наук. конф. ТДТУ ім. І. Пулюя, 13-14 травня 2009 р. – Тернопіль, 2009. – С. 152.
 46. Пат. 57750 Україна, МПК (2011.1) G01B11/26, G01D 5/00. Спосіб визначення зміщення осі кодового диска абсолютного оптоелектронного давача кута / Чайковський А. В., Паламар М. І.; заявник і патентовласник Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. – u201010225; заявл. 19.08.2010; опубл. 10.03.11, Бюл. №5.

47. Покрас А.М. Системы наведения антенн земных станций спутниковой связи / Покрас А.М., Цирлин В.М., Кудеяров Г.Н. – М. : Связь, 1978. – 152 с.
48. Прецизионные датчики угла с печатными обмотками / [Л. Н. Сафонов, В. Н. Волнянский, А. И. Окулов, В. Н. Прохоров]. – М. : Машиностроение, 1977. – 152 с.
49. Прэрт У. Цифровая обработка изображений. Кн.1 / У. Прэрт ; [пер. с англ.] – М. : Мир, 1982. – 312 с.
50. Свечников С.В. Фотопотенциометры и функциональные фоторезисторы / Свечников С.В., Смовж А.К., Каганович Э.Б. – М. : Сов. радио, 1978. – 184 с.
51. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – М.: Вильямс, 2007. – 1104 с.
52. Справочник по электрическим машинам / [под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова]. – М. : Энергоатомиздат, 1989– .– Т. 2. – 688 с.
53. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. ; [пер. с англ. А.В. Назаренко, И.Ю. Дорошенко]. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.
54. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
55. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / [Грузман И. С., Киричук В.С., Косых В.П. и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. – 168.
56. Чайковський А. В. Вибір способу кодування кодового диска давачів кута / А. В. Чайковський, М. І. Паламар // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: зб. пр. II-ї наук.-тех. конф., Львів, 4-5 жовтня 2012 р. – Львів: ФМІ НАНУ, 2012 – С. 249-252.
57. Чайковський А. В. Інтелектуальний датчик кутового положення / А. В. Чайковський // Десята студентська наук. конф. ТДГУ ім. І. Пулюя, 18-19 квітня 2007 р. – Тернопіль: ТДГУ, 2007. – С. 209.
58. Чайковський А.В. Підвищення надійності оптоелектронного сенсора кутового положення / А.В. Чайковський // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф.,

- (Тернопіль, 5-6 червня 2013 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – С. 56-57.
59. Чайковський А.В. Порівняльний аналіз ефективності методів локалізації перепадів інтенсивності в задачах вимірювання кута / А. В. Чайковський // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 1 – С. 87-91.
 60. Чайковський А. В. Порівняльний аналіз методів локалізації перепадів інтенсивності для оптико-електронних сенсорів кута / А. В. Чайковський // ІХ міжн. наук.-техн. конф. Приладобудування 2010: стан і перспективи : зб. тез доповідей, 23-24 квітня 2013. – К. : ПБФ НТУ «КПІ», 2013. – С. 81-82.
 61. Чайковський А. В. Стенд для перевірки абсолютних давачів кута / А. В. Чайковський, М. І. Паламар // XV наук. Конф. ТНТУ ім. І. Пулюя, 14-15 грудня 2011 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2011 – С. 97.
 62. Чайковський А.В. Формування одностороннього кодового диска для інтелектуальних сенсорів кута / А. В. Чайковський, М. І. Паламар // Відбір і обробка інформації. – 2012. – № 37 (113). – С. 52-58.
 63. Шарин Ю.С. Комбинаторные шкалы в системах автоматики / Ю.С. Шарин, Я.Л. Либерман, В.Я. Анахов. – М. : Энергия, 1973. – 112 с. – (Б-ка по автоматике. Вып. 491).
 64. Шибаев С. С. Особенности применения ПЗС фотоприемников в акусто-оптических средствах обработки информации / Шибаев С. С. // Оптический журнал. – 2008. – том 75, №9. – с. 74-77
 65. Электрические измерения неэлектрических величин / [под ред. П. В. Новицкого]. – Л. : Энергия, 1975. – 576 с.
 66. Юкиш М.Й. Оптико-електронні засоби контролю параметрів обертового руху на основі методу просторової модуляції : монографія / М. Й. Юкиш, В. В. Кухарчук, Й. Й. Білінський. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 138 с
 67. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений / Л. П. Ярославский. – М. : Сов. радио, 1979. – 312 с.
 68. Altman S.L. Rotations, Quaternions, and Double Groups / Simon L. Altman. – Oxford: Oxford University Press, 1986. – 303p.

69. Incremental angle measuring systems based on the AMOSIN [Electronic resource]. – AMO GmbH, 2012. – 76 p. – Access mode:
http://www.amo-gmbh.com/fileadmin/amo/produkte/prospekt/P_WMI_EN_20120822.pdf
70. Arsić M. New pseudorandom code reading method applied to position encoders / M. Arsić and D. Denić // *Electronic Letters*, Vol. 29, No. 10. – 1993. – pp. 893–894.
71. Becerikli Y. Alternative Neural Network Based Edge Detection / Y. Becerikli, E. H. Demiray, M. Ayhan, K. Aktas // *Neural Information Processing*. – 2006. –Vol. 10, PP. 193-199. – DOI:10.1.1.106.423
72. Benvenuto N. Algorithms for Communications Systems and Their Applications / Benvenuto N., Cherubini G. – Southern Gate: Wiley, 2002. – 1305p.
73. Canny J. F. Finding Edges and Lines in Images / Canny J. F. – Cambridge : MIT, 1983. – 146 p.
74. Chen T. How Small Should Pixel Size Be? / Chen T., Cartyse P., Gamal A. Wandell B. // *Proc. SPIE*. – 2000. – vol. 3965, P. 451-459. – DOI:10.1.1.78.5482
75. Denić D. High-Resolution Pseudorandom Encoder with Parallel Code Reading / Denić D., I. Randelović, M. Rančić. // *Electronics and Electrical Engineering*. – 2004. – №7(56). – P.14-18.
76. Denić D. Novo rešenje problema sinhronizacije očitavanja koda kod pseudoslučajnih pozicionih enkodera / Dragan Denić, Goran Miljković, Dragan Živanović, Milan Simić // *INFOTEH-JAHORINA*. – 2001. – Vol. 10, Ref.E-VI-8. – P. 879-882.
77. D. Recent Trends of Linear and Angular Pseudorandom Encoder Development / Denić D., I. Randelović, G. Miljković // *SPEEDAM 2006: Int. Symposium*, 23-26.05.2006. – Taonnina, Italy, 2006. – P. S28-49–S28-53
78. Design Considerations for an Absolute Steering Angle Encoder Demo [Electronic resource] / TAOS. – 2005. – 12 p. – Access mode:
<http://www.taosinc.com/getfile.aspx?type=press&file=encoderdesign4b.pdf>

79. Etzion T.K. Near Optimal Single-Track Gray Codes / T.K. Etzion, K.G. Paterson // IEEE Transactions on information theory. – 1996. – vol. 42, no.3. – P. 779-789.
80. Fischer J. DSP Based Measuring Line-scan CCD Camera / J. Fischer, T. Radil // IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 8-10 September 2003, Lviv, Ukraine. – 2003. – P. 345-348.
81. Garner H. Design and Analysis of an Absolute Non-Contact Orientation Sensor for Wrist Motion Control / H. Garner, M. Klement, K.-M. Lee // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, 8-12 July 2001, Como, Italy. – 2001. – PP. 69-74
82. Golomb S. Shift Register Sequences / Golomb, S. – San Francisco: Holden-Day, 1967. – p.
83. Golomb S.W. Signal Design for Good Correlation : For Wireless Communication, Cryptography and Radar / Golomb S. W., Guang Gong. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 438 p.
84. Goresky M. Algebraic Shift Register Sequences / Mark Goresky, Andrew Klapper , 2009. – 521 p.
85. Goresky M. Pseudo-noise Sequences based on Algebraic Feedback Shift Registers / Mark Goresky, Andrew Klapper // Transactions on information theory. – 2002. – vol. 48, no. 11. – P. 2826-2836
86. Heath M. Comparison of Edge Detectors A Methodology and Initial Study / M. Heath, S. Sarkar, T. Sanocki, K. Bowyer // Computer Vision and Image Understanding. – 1998. – Vol. 69, No. 1. – pp. 38–54.
87. Hiltgen A.P. Single-track Gray codes / Hiltgen A. P., Paterson K. G., Brandestini M. // IEEE Transactions on information theory. – 1996. – vol. 42, Issue: 5. – P. 1555-1561.
88. Jones B.E. Digital Displacement Transducer Using Pseudo-random Binary Sequences and a Microprocessor / B.E. Jones, K. Zia // Trans Inst M C, Vol. 3, No. 1, Jan-Mar 1981, pp 13-20.
89. Lei Y. Subpixel Edge Detection Based on Morphological Theory / Lei Y., Jiafa N. // World Congress on Engineering and

- Computer Science 2008 WCECS, Oct. 22-24 2008, 2008. – DOI:10.1.1.149.3399
90. Mehrl D. J. Position Detection Using Maximal Length Sequences [Electronic resource]: Intelligent optosensor designer's notebook / Mehrl D. J., TAOS, Access mode: <http://www.taosinc.com/getfile.aspx?type=press&file=iosdn1.pdf>
 91. Mena J. B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification / Mena J. B. // Pattern Recognition Letters. – 2003. – vol.24. – P.3037–3058
 92. Palamar M. Absolute encoder insensitive to mounting errors / M. Palamar, A. Chaikovskiy // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2012 : proceedings of the VIIIth Intern. Conf., Lviv, 2012. – P. 95.
 93. Pat. DE4436784, Germany, IPC6 G01B11/00. Absolute position measuring system / Vogt, P.; applicant Carl Zeiss; appl. 14.10.1994 publ. 27.04.1995. – 8p.
 94. Pat. GB2126444, United Kingdom, IPC3 G08C 9/00. Position measuring apparatus / Johnston J. S.; applicant Rosemount Engineering Company Limited; appl. 1.09.83; Pub: 21.03.1984
 95. Pat. GB2430818, United Kingdom, IPC H03M1/30. Optical encoder indicating rotational and non-rotational movement / Cheah Chiang Sun, Yeoh Chin Heong, Tai Li Chong; applicant: Avago Technologies ECBU IP (Singapore) Pte. Ltd; appl. 29.09.2006; publ. 04.04.2007. – 26 p.
 96. Pat. WO0201160, WIPO, IPC7 G01D 5/347, H03M 1/24. Position encoder using statistically biased pseudorandom sequence / Boyton, Desmond, Bruce; applicant Bishop Innovation Limited; appl. 22.06.2006, publ. 3.01.2002. – 22p.
 97. Pat. WO2006107363, WIPO, IPC (2006.01) G01D5/26 G01D 5/36. Imaging optical encoder / Hollander, S.; appl. 17.01.2006 publ. 12.10.2006. – 33p.
 98. Pat. WO2010049222, WIPO, IPC6 G01D5/249; G01D5/347. Absolute position code and position measuring device / Lingk Christoph; applicant Dr Johannes Heidenhain GmbH; Lingk Christoph; appl. 23.09.2009; publ. 06.05.2010. – 42p.
 99. Pat. US4945231, USA, IPC⁵ G01D 5/34. Compound rotary encoder for detecting the rotation angle and the number of rotations of a rotor shaft / H. Ohya; T. Miyatani, K. Kawamura,

- Y. Kawabata.; Assignee: Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha; appl. 1.06.1989, publ. 31.07.1990 13p.
100. Pat. US5235181, USA, IPC⁵ G01D 5/34. Absolute position detector for an apparatus for measuring linear angular values / M. Durana, R. Gallay, Ph. Robert.; Assignee: Tesa S.A; appl. 9.12.1990, publ. 10.08.1993 7p.
 101. Petriu E.M. Absolute Position Measurement Using Pseudo-Random Binary Encoding / Petriu E.M. // IEEE Instrum. and Meas. Magazine. – 1998. – Vol. 1, No. 3. – pp. 19-23.
 102. Schwartz M. The Structure of Single-Track Gray Codes / Moshe Schwartz, Tuvi Etzion // IEEE Transactions On Information Theory. – 1999. – vol. 45, no. 7. – P. 2383-2396.
 103. Šedivý J. Precision Single-line Dimension Measurement Using CMOS Image Sensor and photometric interpolation [Electronic resource] / Šedivý J., Fischer J. – 4p. – Mode of access: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?rep=rep1&type=pdf&doi=10.1.1.137.9277>
 104. Smith A. R. General shift register sequences of arbitrary length / Smith A. R. // IEEE Transactions On Computers. – 1971. – vol. C-20, no. 4. – P. 456-459.
 105. Song H.Y. Feedback Shift Register Sequences / Song H.Y. ed. G. J. Proakis // Encyclopedia of Telecommunications. – New York : John Wiley & Sons, 2002. – 37p.
 106. Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures: Technical Report FGBV-96-03 Forschungsgruppe Bildverstehen / Steger C. – München: Technische Universität München, 1996. – 32p.
 107. Steger C. Evaluation of Subpixel Line and Edge Detection Precision and Accuracy [Electronic resource] / C. Steger // Forschungsgruppe Bildverstehen (FG BV), Informatik IX. – München : Technische Universität München. – 9p. – Mode of access: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.54.6822&rep=rep1&type=ps>.
 108. Triggs B. Empirical Filter Estimation for Subpixel Interpolation and Matching [Electronic resource] / Triggs Bill, CNRS-INRIA. – 2001. – 8 p. Mode of access:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.143.6098&rep=rep1&type=pdf>

109. Truchetet F. Subpixel edge detection for dimensional control by artificial vision / F. Truchetet, F. Nicolier, O. Lalignant // *Journal of Electronic Imaging*. – 2001. – vol.10(1) .– P. 234–239
110. Vondel B. Sub-pixel edge detection / Björn Van de Vondel, Gerrit Van de Velde. – Sint-Katelijne-Waver: DE NAYER Instituut Onderzoeksgroep Digitale Technieken. – 2004. – 7 p.