

Лекція 14. Оптоелектронні сенсори абсолютних кутових положень

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 високим 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.

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 зме-

ншити 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.

На сьогоднішній день важко уявити сучасне автоматизоване виробництво, або пристрій який б не був оснащеним датчиком кутового повороту (ДКП). Енкодер – електромеханічний пристрій, призначений для вирішення однієї з найважливіших задач в області промислової автоматизації: вимірювання лінійних і кутових переміщень. Це датчик, який застосовується в промисловості з метою перетворення підконтрольної величини в електричний сигнал. За допомогою нього визначається, наприклад, положення вала електричного двигуна. У зв'язку з тим, кожен пристрій, в якому застосовується обертання, обов'язково повинен бути оснащений приладом, контролюючим точність обертального моменту. Популярними сферами використання подібних перетворювачів є системи точного переміщення.

Енкодери незамінні в процесі виробництва на верстатобудівних підприємствах, в робототехнічних комплексах. Використовують їх також у багатьох сучасних вимірювальних приладах, які потребують реєстрації високоточних вимірювань кутів обертання, поворотів і нахилів. Наприклад використання енкодерів в системах наведення проміння антени для відслідкування руху космічних апаратів.

Перевагами оптоелектронних сенсорів кута на основі псевдовипадкової послідовності є можливість роботи при великих похибках закріплення, використання простих технологій та доступних компонентів.

Положення твердого тіла, яке обертається навколо нерухомої осі, може бути описаним двограним кутом φ , утвореним двома площинами, які вміщують вісь обертання, одна з яких нерухома, інша – зв'язана з тілом. Із одержанням інформації про кутове положення тіла також пов'язане визначення його кутової швидкості та прискорення – відповідно першої та другої похід-

ної 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.

14.1 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 $6'..10^\circ$. Перевагою даного методу є можливість отримання абсолютного відліку та простота використання; недоліками є зношування провідної доріжки та відносно низька точність.

Відсутність механічного зношування провідної доріжки властива оптоелектронним безконтактним потенціометрам на основі позиційно-чутливих фотопотенціометрів чи функціональних фоторезисторів.

Вихідна напруга фотопотенціометра визначається положенням світлового зонду, який 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.

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 ви-

готовлення, 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.

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 ємнісників до 1". Обмеженням ємнісних сенсорів є складність їх взаємодії з цифровою інформаційно-вимірювальною системою (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 . 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 $\pm 20'' \dots \pm 10'$. Похибку систем на основі обертових трансформаторів із електричною редуцією зменшують до 1".

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. 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. Перевагами індуктосинів є висока точність, нечут-

ливість до ексцентриситету диска та стійкість до впливів жорстких умов експлуатації. Недоліками - чутливість до електромагнітних завад та складна обробка сигналу.

Магнітний сенсор кута використовує принцип вимірювання, заснований на визначенні напрямку магнітного поля постійного магніту, прикріпленого до ротора за допомогою двох взаємоперпендикулярно розміщених сенсорів Хола. 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, яка зчитується голівкою, чутливою до залишкової намагніченості. Два вихідні парафазні гармонічні сигнали інтерполюються для отримання вищої роздільної здатності. 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 голівки зчитування. Похибка інкрементних сенсорів кута лежить в межах $\pm 3'' \dots \pm 50''$, абсолютних $\pm 3'' \dots \pm 30''$. 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. У хвилеводі, виконаному у вигляді тонкої плівки ZnO на поверхні кварцу, збуджують

ПАХ. Положення рухомого приймача можна визначити за фазовим зсувом вихідного сигналу. Серед переваг методу - відносно висока точність та малі габарити.

Принцип роботи сенсора кута повороту на основі методу просторової модуляції полягає в тому, що кутові 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. Перевагами даного способу є повна відсутність контакту, високі динамічні характеристики, можливість вимірювання кутової швидкості, биття та вібрацій. Недоліком способу є велика похибка вимірів ($\pm 0,8\%$).

Принцип дії оптоелектронних інкрементних сенсорів кута (растрових інтерполяторів) полягає у модуляції світлового потоку за допомогою оптично спряжених вимірювального та індикаторного растру. 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 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.

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 диска використовують код Грея, який характерний тим, що сусідні кодові комбінації відрізняються лише в одному розряді (рис. 14.1, а). Недоліком такого сенсора є складність отримання високої роздільної здатності в обмежених габаритах сенсора. Оптична схема зчитування для більше як 14 доріжок та розмірів диска до 100 мм надто ускладнюється. Щоб обійти це обмеження, деякі сенсори підвищують роздільну здатність інтерполюючи сигнал, отриманий з останньої кодової чи додаткової інкрементної доріжки.

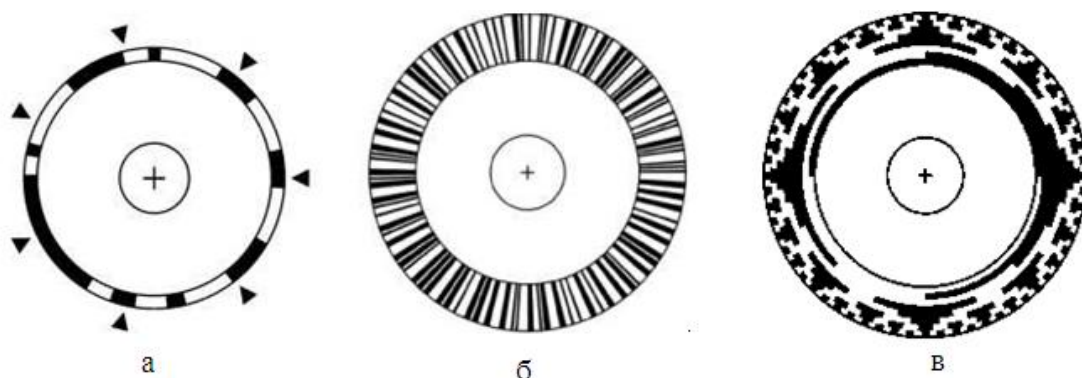


Рисунок 14.1 - Кодовий диск на основі класичного коду Грея (а), однодоріжкового коду Грея (б) та псевдовипадкової послідовності (в)

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.

В.Е. Jones та К. Zia запропонували альтернативний спосіб створення оптоелектронних сенсорів кута та переміщення на основі однієї кодової доріжки з символів псевдовипадкової послідовності. На прозорий диск наносять доріжку, яка складається з символів послідовності, закодованої прозо-

рими та непрозорими секторами різної ширини (рис. 14.1, в). За допомогою світлодіода фрагмент кодової доріжки проектується на однорядковому багатоеlementному фотоприймальному пристрої (ОБФП), розміщеному 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. Модифікації способу також дозволяють визначати положення за двома координатами, об'єднують інкрементальний та абсолютний відлік чи відрізняються способом кодування диска. Перевагами сенсорів кута на основі псевдовипадкової послідовності (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.

Розглянуті методи вимірювання кута можна класифікувати за декількома ознаками: відліком, діапазоном вимірювання, вихідним сигналом, фізичним принципом.

14.2 Аналіз методів вимірювання кутового положення

Вимірювання абсолютного кутового положення є дуже важливим у промислових додатках та робототехнічних системах, а особливо при взаємодії об'єктів промислової автоматизації з використанням технології Internet of Things. Існує багато різних методів для датчиків абсолютного положення, особливо енкодерів. Існує два великих класи енкодерів – магнітні та оптичні.

14.2.1 Магнітні енкодери

Порівняно з оптичними енкодерами кількість методів вимірювання абсолютного кутового положення магнітних енкодерів невелика. Для магнітних енкодерів у яких відсутній вал, як правило, підтримується два вихідні канали (канали А і В), які мають розходження фаз між собою на 90 градусів. Оскільки

ки Z-фаза, яка генерується один раз на коло, використовується для створення опорної точки або нульової точки в магнітних енкодерах, більшість типів магнітних енкодерів є датчиками відносного положення. Хоча багатополюсні були досліджені досить давно, в них важко виконати намагнічення та задовольнити вимоги щодо досягнення малих розмірів, високої роздільної здатності та абсолютного кута.

Для типу магнітних енкодерів з валом буде генеруватися лише одне коло синусоїдальних та косинусних сигналів, і, отже, абсолютне кутове положення можна легко отримати за допомогою зворотних тригонометричних функцій. Однак цей тип датчика не можна закріпити на пристроях з порожнистим валом, наприклад, на роботах.

Принцип дії магнітного абсолютного енкодера: над датчиком розміщуються магніт, який спеціально намагнічено таким чином, щоб полюси розташовувались в вертикальній площині. Датчик реагує на зміну магнітного поля в радіальній системі координат. Сигнал з датчика магнітного поля потрапляє спочатку на мільтиплексор де відбувається первинне кодування сигналу. На даному етапі механічний кут перетворюється в два диференціальних сигналу з фазовою різницею 90° – синусний і косинусний.

Синусно-косинусні сигнали пропорційні величині магнітного потоку, обробляються в диференціально аналоговому колі із застосуванням класичної техніки скасування зрушень, а потім оцифровуються АЦП з роздільною здатністю в 14 або 15 біт.

Отримані дані передаються в блок цифрової обробки сигналу (ЦОС). Основним елементом блоку ЦОС є 16-бітний RISC-мікроконтролер, який використовує цифрове представлення сигналів для обчислення кута а допомогою табличній функції арктангенса, застосовуваної до співвідношення сигналів U_Y/U_X :

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_Y}{U_X}\right).$$

Функціональність ЦОС управляється спеціальним алгоритмом мікроконтролера, який зберігається в пам'яті ROM.

На додаток до функції арктангенса ATAN алгоритм контролює усе аналогове коло, вихідну передавальну характеристику, вихідний протокол, етапи калібрування, програмування і режими самодіагностики.

На відміну від класичних датчиків Холла розглянутий вимірювальний принцип забезпечує поліпшену температурну точність, здатність вимірювати кути в діапазоні 360° з високою лінійністю, незалежною від взаємоположення датчика і магніту.

На рисунку 14.4 показано принцип дії абсолютного багато-обертального магнітного енкодера.

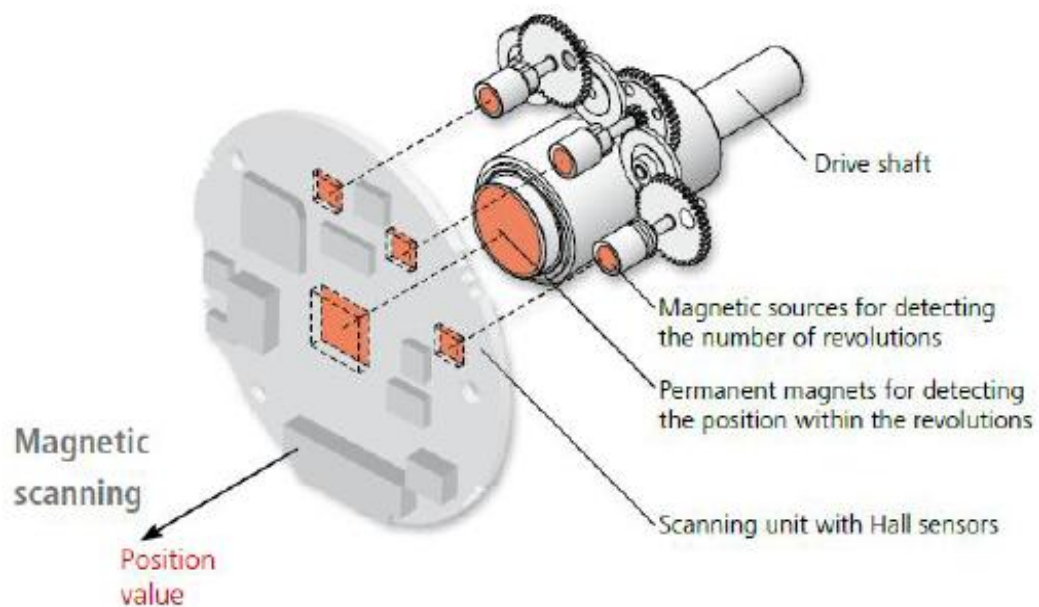


Рисунок 14.4 – Принцип дії абсолютного багато-обертального магнітного енкодера

Завдяки сучасній технології Opto-Asic за один оборот може бути сформовано до 18 біт (262 144 кроки). Це доповнюється до 4096 абсолютних відсканованих оборотів. Обробка сигналу відбувається на швидкості FPGA. Цей тип сканування використовується завжди, коли значення позиції потрібно фіксувати дуже швидко та з високою роздільною здатністю.

Магнітні поворотні енкодери – це вибір для пристроїв з меншими вимогами щодо точності, роздільної здатності та часу. Роздільна здатність обертання становить 11 біт, і це доповнюється 4096 абсолютними відсканованими обертами. Розширена обробка сигналу відсутня, хоча роздільна здатність цього пристрою є програмована.

14.3.2 Оптичні енкодери

Оптичний енкодер, показаний на рисунку 14.5, складається із спеціального оптичного диска, який обертається, світлодіода і фотодетектора. Диск з нанесеною оптичною шкалою закріплений на валу. Кодовий диск обертається перед нерухомою маскою, перекриваючи світлове випромінювання світлодіода. Світло, яке проходить через маску, приймається фотодетектором, який генерує імпульси у формі квазисинусоїди, яка перетворюється в меандр, що обробляється лічильником. При обертанні об'єкту спеціальний датчик прочитує інформацію і перетворить її в імпульси.



Рисунок 14.5 – Схема оптичного енкодера

Оптичні енкодери розрізняють за типом отримуваної інформації:

- одиночні;
- здвоєні (квадратурні);
- на двійкових кодах;
- на кодах Грея.

Одиночний енкадер має оптичний диск з рівномірно нанесеними радіальними прорізами по колу. Куту повороту відповідає кількість підраховуваних імпульсів. Гідність такого енкадера – дешевизна і простота реалізації.

Недоліки:

- при запуску системи не ясне початкове положення валу;
- помилки при підрахунку імпульсів на кордоні прорізу – можуть бути помилкові спрацьовування;
- неможливо визначити напрям обертання.

Квадратурний енкадер має оптичний диск з прорізами, показаними на рисунку 14.6.

У такому енкадері прочитується кількість імпульсів і враховується напрям обертання. Крім того, можна уникнути помилкових спрацьовувань при підрахунку імпульсів.



Рисунок 14.6 - Квадратурний енкадер

Недолік – при запуску невідоме початкове положення валу.

Енкадер на двійкових кодах. Оптичний диск такого енкадера забезпечує відсутність помилок при запуску, відсутність помилок при підрахунку імпульсів, можливість визначити напрям обертання.

Недоліки:

- проблеми з граничним положенням, якщо міняється більш за один біт;
- дорожнеча і складність реалізації;
- обмеження в роздільній здатності – чим вище точність, тим більше потрібно каналів для збільшення розрядності передаваного кута.

Енкодер на кодах Грея. Оптичний диск з кодом Грея забезпечує визначення точного положення валу в кожен момент часу, відсутність помилок при запуску системи, підрахунку імпульсів на кордонах, можливість визначити напрям обертання, відсутність проблем з граничними положеннями – міняється одночасно не більш за один біт.

Недоліки:

- збільшення вартості і складність реалізації;
- додаткові обмеження в роздільній здатності – чим вище точність, тим більше необхідно каналів.

Є два основних типи оптичних енкодерів: інкрементні і абсолютні. Інкрементний енкодер вимірює швидкість обертання і може видати відносне положення, в той же час як абсолютний енкодер вимірює безпосередньо кутове положення і на виході дає швидкість. Якщо не брати до уваги зміну інформації про місцезнаходження, то з інкрементного енкодером, як правило, легше працювати і він забезпечує еквівалентну дозвіл при набагато нижчій вартості, ніж абсолютні оптичні енкодери.

14.4 Інкрементні оптичні енкодери

Оптичні поворотні інкрементні енкодери (датчики кута повороту) стали найбільш популярним пристроєм для вимірювання кутової швидкості і положення в моторах, на валу колеса або рульового механізму (рис. 14.7).

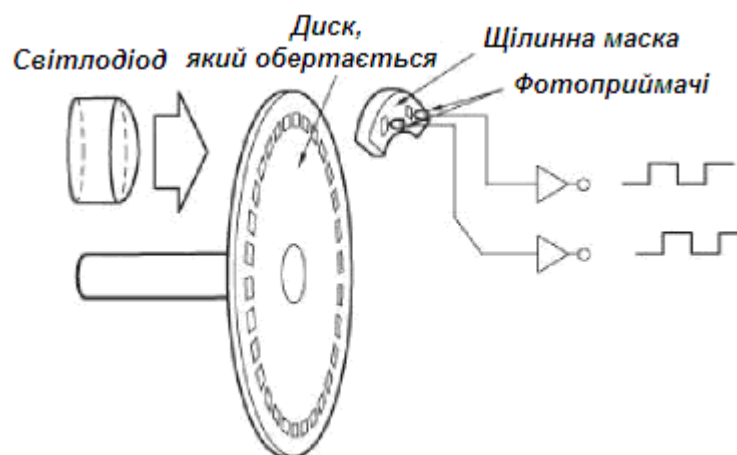


Рисунок 14.7 - Принцип дії інкрементного енкодера

У мобільних роботів, енкодери використовуються для контролю положення або швидкості коліс і інших, керованих за допомогою моторів з'єднань (рис. 14.8).

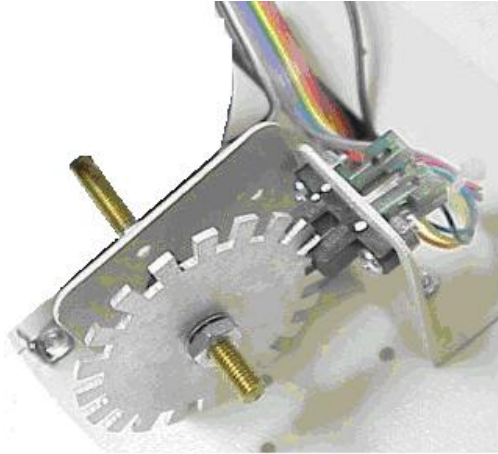


Рисунок 14.8 – Контроль положення або швидкості коліс

Інкрементні енкодери використовуються в якості датчиків швидкості в колі зворотного зв'язку в системах управління, які працюють на середніх і високих швидкостях, але на дуже малих швидкостях чутливі до шумів і проблем зі стабілізацією через помилки квантування. Поліпшена перехідна характеристика вимагає більшої швидкості оновлення, яка для даного числа ліній зменшує число можливих імпульсів енкодера для інтервалу дискретизації (рис. 14.9).

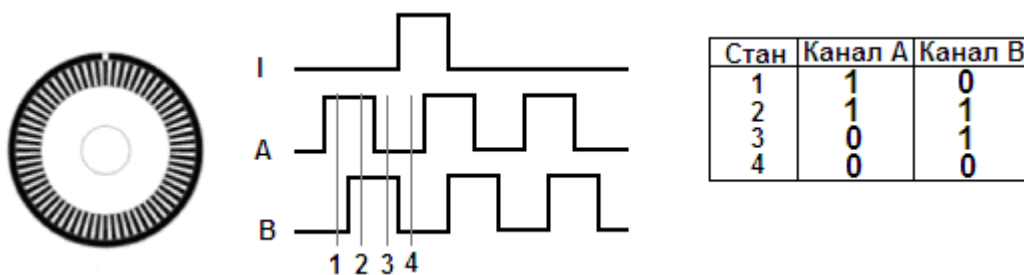


Рисунок 14.9 - Принцип дії квадратурного інкрементного оптичного енкодера

Наслідком інкрементного характеру фазо-квадратурних вихідних сигналів є те, що будь-який дозвіл кутового положення може бути виражено не в абсолютній формі, а тільки щодо деякої опорної точки. Створення такої точ-

ки відліку може бути зроблено декількома способами. Для додатків, які включають безперервне обертання на 360 градусів, більшість енкoderів включає в якості третього каналу спеціальний індексний вихід, який переходить в високий стан на кожному повному обороті вала. Проміжні положення вала потім визначаються числом, на яке збільшився, або зменшився лічильник імпульсів від цього відомого індексованого положення. Одним з недоліків такого підходу є втрата інформації про відносне становище в разі збою живлення.

У разі обмеженого обертання, такого як зворотно-поступальний рух уздовж напрямних (як в верстатах з ЧПУ) можна використовувати електричні кінцеві вимикачі або механічні обмежувачі для завдання початкового положення. Для поліпшення повторюваності, повернення в вихідне положення розбивається на два етапи. Ось обертається зі зниженою швидкістю у відповідному напрямку до тих пір, поки не зустрінеться механізм зупинки, після чого відбувається зворотне обертання протягом визначеного короткого проміжку часу. Вал обертається повільно назад до зупинки на заданій повільній швидкості з цієї заданої початкової точки, тим самим, усуваючи будь-які зміни в інерціальній навантаженні, які могли б вплинути на остаточне вихідне положення. Цей двоетапний підхід використовується, наприклад, при старті крокової двигуна для ініціалізації позиціонування друкуючої головки в принтерах.

14.5 Абсолютні оптичні енкoderи

У машинобудуванні для здійснення правильного позиціонуванні систем контролю за пересуванням постійно потрібні найостанніші і точніші позиційні дані. Завдяки своїй здатності у будь-який момент здійснювати привласнення точних і однозначних позиційних значень якій-небудь кутовій позиції або позиції переміщення абсолютні енкoderи стали однією з найважливіших сполучних ланок між механічною частиною машини і її блоком управління.

Абсолютний енкодер не втрачає свого значення при втраті живлення і, якщо в знеструмленому стані вал енкодера повернув на певний кут або якусь кількість зворотів, то при появі напруги енкодер відразу видасть нове, фактичне кутове положення валу і фактичний номер звороту. Завдяки цій властивості не потрібно після кожного включення системи виконувати рух механічних частин машини на стартову позицію, що є безперечною перевагою абсолютних енкодерів перед інкрементними (імпульсними).

Перевагою абсолютного енкодера є також і те, що він не схильний до перешкод. У випадках, коли сигнал з диска не може бути повноцінно прочитаний енкодером, наприклад, якщо вал обертається дуже швидко, точний кут повороту буде зареєстрований, коли швидкість обертання зменшиться. Але навіть при швидкому обертанні валу можлива реєстрація положення, хоч і з меншою точністю. Для цього в увагу просто береться лише інформація яка поступає від більш старших розрядів, тобто спотворена (за рахунок великої швидкості обертання) інформація поступає від молодших розрядів просто ігнорується. Абсолютний енкодер стійкий до вібрацій і іншого роду перешкодам, оскільки помилка в результаті підрахунку «помилкових» імпульсів, які виникли в результаті, наприклад, вібрації, виключена.

14.5 Види цифрових кодів і особливості їх використання в системах позиціонування

Бінарні коди (БК) складаються лише з двох символічних станів наприклад чорний або білий, світлий або темний, провідник або ізолятор. Бінарний код в цифровій техніці це спосіб представлення даних у вигляді комбінації двох знаків, які можна позначити як 0 і 1. Знаки або одиниці БК називають бітами. Одним з обґрунтувань вживання БК є простота і надійність накопичення інформації в якому-небудь носіїві у вигляді комбінації всього двох його фізичних станів, наприклад у вигляді зміни або постійності світлового потоку при прочитуванні з оптичного кодового диска.

У таблиці 14.1 представлено дві основні можливості кодування – двійкове кодування і кодування по методу Грея, а також способи представлення інформації в різних системах числення.

Двійково-десятковий код (Binary code decimal)

Двійково-десятковий код є широко розповсюдженим кодом, який може оброблятися безпосередньо мікропроцесором і є основним кодом для обробки цифрових сигналів. Двійково-десятковий код складається лише з 0 і 1.

Найбільше число, яке може бути виражене двійковим кодом, залежить від кількості використаних розрядів, тобто від кількості біт в комбінації, яка виражає число. Наприклад, для вираження числових значень від 0 до 7 досить мати 3-розрядний, тобто 3-бітовий код.

Таблиця 14.1 – Види кодування

Десяткове число	Звичайне двійкове кодування		Кодування у кодї Грея	
	Двійково-десятковий BCD (Binary)	Шістнадцятирічний HEX (hexadecimal)	Код Грея BCD (Gray)	Шістнадцятирічний HEX (hexadecimal)
0	0000	0	0000	0
1	0001	1	0001	1
2	0010	2	0011	3
3	0011	3	0010	2
4	0100	4	0110	6
5	0101	5	0111	7
6	0110	6	0101	5
7	0111	7	0100	4
8	1000	8	1100	C
9	1001	9	1101	D
10	1010	A	1111	F
11	1011	B	1110	E
12	1100	C	1010	A
13	1101	D	1011	B
14	1110	E	1001	9
15	1111	F	1000	8

Двійково-десятковий код є багатокроковим кодом. Це означає, що при переході від одного положення (значення) в інше можуть змінюватися декілька біт одночасно. Наприклад, число 3 в двійковому кодї 011. Число ж 4 в двійковому кодї 100. Відповідно, при переході від 3 до 4 міняють свій стан на

протилежне все 3 біта одночасно. Прочитування такого коду наводить до того, що із-за недосконалості зчитування, наприклад, із-за неминучих відхилень (допусків) при виробництві кодового диска, зміна інформації від кожної з доріжок окремо ніколи не відбувається одночасно. Як наслідок, при переході від одного числа до іншого, короткочасно (або постійно в разі зупинки валу енодера безпосередньо на критичній ділянці переходу) видається невірна інформація про положення валу. Так, на ділянці вищезазначеного переходу від числа 3 до 4 дуже вірогідна видача числа 7, коли, наприклад, старший біт під час переходу поміняв своє значення трохи раніше чим останні. Таким чином, використання звичайної двійкової коди може з великою вірогідністю наводити до видачі числа, далекого від реального значення, і, як наслідок, непередбачуваного реагування системи управління або контролера на спотворений сигнал енодера. Аби уникнути цього застосовується однокроковий код, наприклад, код Грея.

Код Грея (Gray code).

Код Грея ідеально личить для систем механічного позиціювання, в т.ч. абсолютних енодерів. Код Грея переважає звичайний двійковий тим, що володіє властивістю постійності бінарної комбінації: зміна кодованого числа на одиницю відповідає зміні кодовій комбінації лише в одному розряді. Таким чином, код Грея є однокроковим кодом. Він будується на базі двійкового за наступним правилом: старший розряд залишається без зміни, а кожен подальший розряд інвертується, якщо попередній розряд вихідного двійкового коду дорівнює одиниці.

З таблиці 14.1 видно, що число представлене кодом Грея, при переході від одного числа до іншого (сусіднього), міняє своє значення лише в одному розряді інформації, в той час, як в двійковому кодi можуть поміняти свій стан декілька розрядів (біт) одночасно.

В разі використання коду Грея погрішність при прочитуванні інформації на ділянці переходу від одного числа до іншого приведе лише до того, що цей перехід буде лише декілька зміщений за часом, проте видача абсолютно

невірного значення кутового положення на ділянці переходу повністю виключається. Це особливо актуально для датчиків, де носієм/джерелом інформації (наприклад, про положення валу енкодера) є механічний елемент. В разі абсолютного енкодера це оптичний диск з механічно нанесеними на нього мітками, де мінімальні геометричні погрішності/зсуви декількох оптичних доріжок/секторів відносно одне одного не виключаються із-за погрішностей офсетного друку при виробництві на стадії нанесення малюнка на оптичний диск. На рисунку 14.10 представлений диск енкодера з малюнком (растром) у форматі коду Грея.

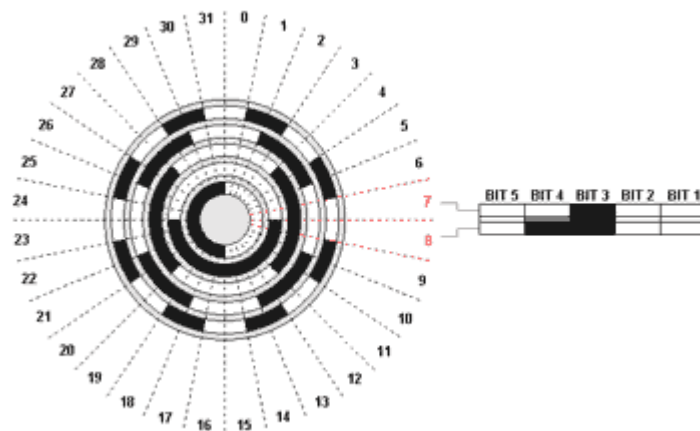


Рисунок 14.10 - Диск абсолютного енкодера з растром в кодї Грея

Перевагою коду Грея є також його здатність дзеркального відображення інформації. Так, інвертуючи старший біт можна простим чином міняти напрям рахунку. Цю функцію виконує вхід «Complement». Залежно від потенціалу на цьому вході видаване енкодером значення буде таким, що зростає або спадає при одному і тому ж фізичному напрямі обертання осі.

Оскільки інформація, виражена в кодї Грея, має чисто кодований характер, що не несе реальної числової інформації, його необхідно перед подальшою обробкою спершу перетворити в стандартний двійковий код. Перетворення коду Грея в звичний бінарний код можна здійснити програмно (у контролері) або використовуючи просту схему з інверторами і логічними елементами «Виключне АБО» (XOR) (рис. 14.11).

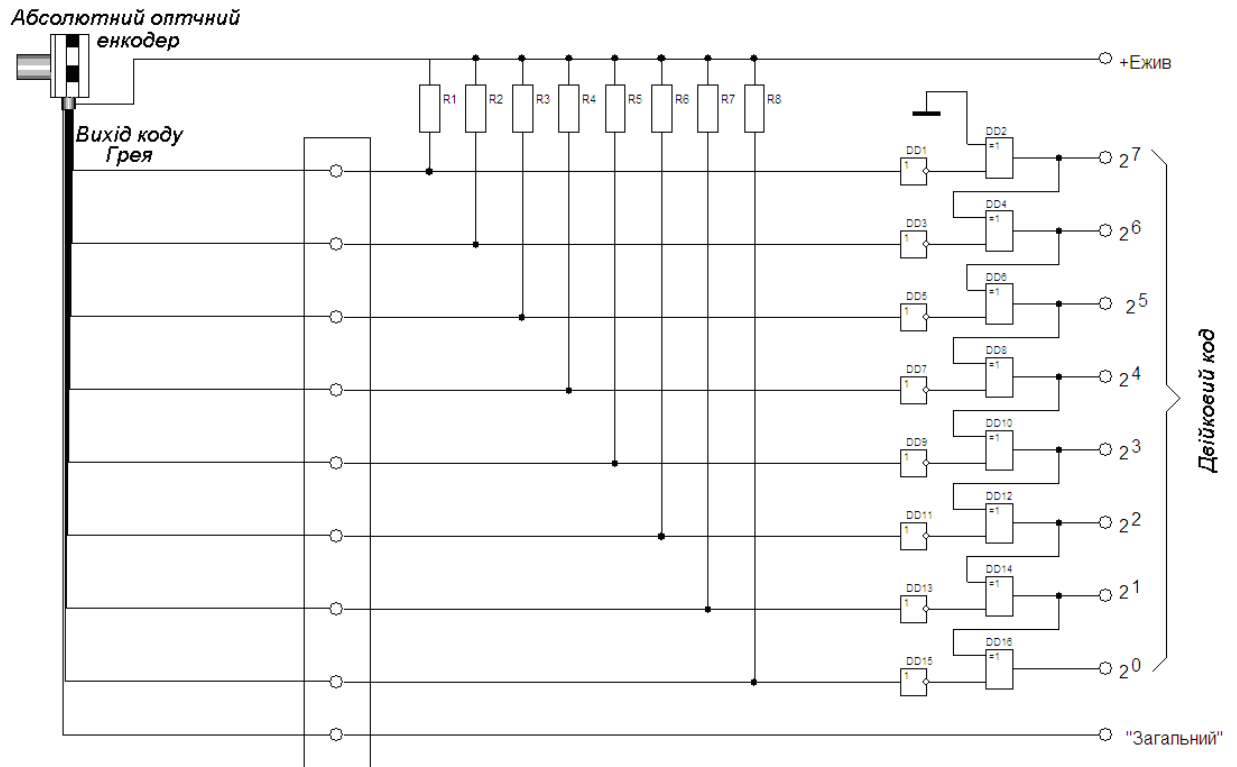


Рисунок 14.11 - Схема перетворення коду Грея у двійковий код

14.6 Конструкція оптичного абсолютного енкодера

Вимірювальна система абсолютного оптичного енкодера складається з наступних основних компонентів:

- поворотний вал вмонтований на двох підшипниках;
- кодовий оптичний диск, встановлений на вал;
- інфрачервоний світлодіод (як джерело світла);
- опто-електронна (фототранзисторна) прочитуюча матриця;
- схема обробки сигналу;
- у багатооборотному енкодері додатково вбудовується редуктор з декількох кодових оптичних дисків зі світлодіодами і прочитуючими матрицями для кожного з них.

Інфрачервоні промені світлодіода просвічують кодовий диск і потрапляють на фототранзисторну прочитуючу матрицю, розташовану із зворотного боку кодового диска (рис. 14.12).

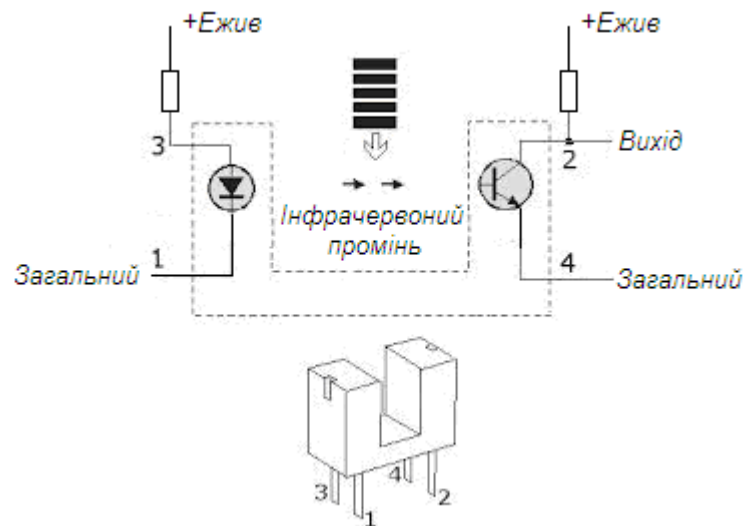


Рисунок 14.12 – Датчик енкодера

При кожному кроці кутового положення кодового диска темні його ділянки запобігають попаданню світла на ті або інші фототранзистори прочитуючої матриці які перетворюють світлові сигнали в електричні. Електричні сигнали перетворюються електронікою енкодера у двійковий код.

У більшості промислових застосувань використовуються поворотні енкодери з роздільною здатністю до 15 біт за оберт і до 4096/256000 відсканованих обертів. Обробка сигналу в процесорі забезпечує безліч функцій оцінки та оптимальне пристосування до певних вимог. Також можуть генеруватися такі сигнали, як кінцеві вимикачі та контроль швидкості.

Для оптичних енкодерів, заснованих на формах розташування фотодетекторів, методи можна розділити на два типи.

У першому типі способу кодування фотодетектори розташовані вздовж радіального напрямку. Одним із методів цього типу є природний двійковий метод кодування, який полегшує енкодерам отримання абсолютного кута обертання. Однак енкодери схильні до помилок зчитування, особливо перехресних помилок, оскільки більша кількість бітів може змінюватися між сусідніми секторами масштабу. Метод кодування сірого кольору - це один ефективний спосіб вимірювання абсолютного кутового положення, широко використовується в оптичних енкодерах. Цей метод може усунути перехресні помилки, введені природним двійковим методом кодування.

Недоліком цього методу є те, що він не може зчитувати значення кута безпосередньо, оскільки сигнали повинні бути переведені в натуральний двійковий код. Оскільки чим вище роздільна здатність енкодера, тим більше доріжок потрібно в цих двох методах. Енкодери, які використовують цей метод, відносно великі та складні.

В другому типі способу кодування всі фотодетектори розташовані вздовж окружного напрямку (рис. 14.13).

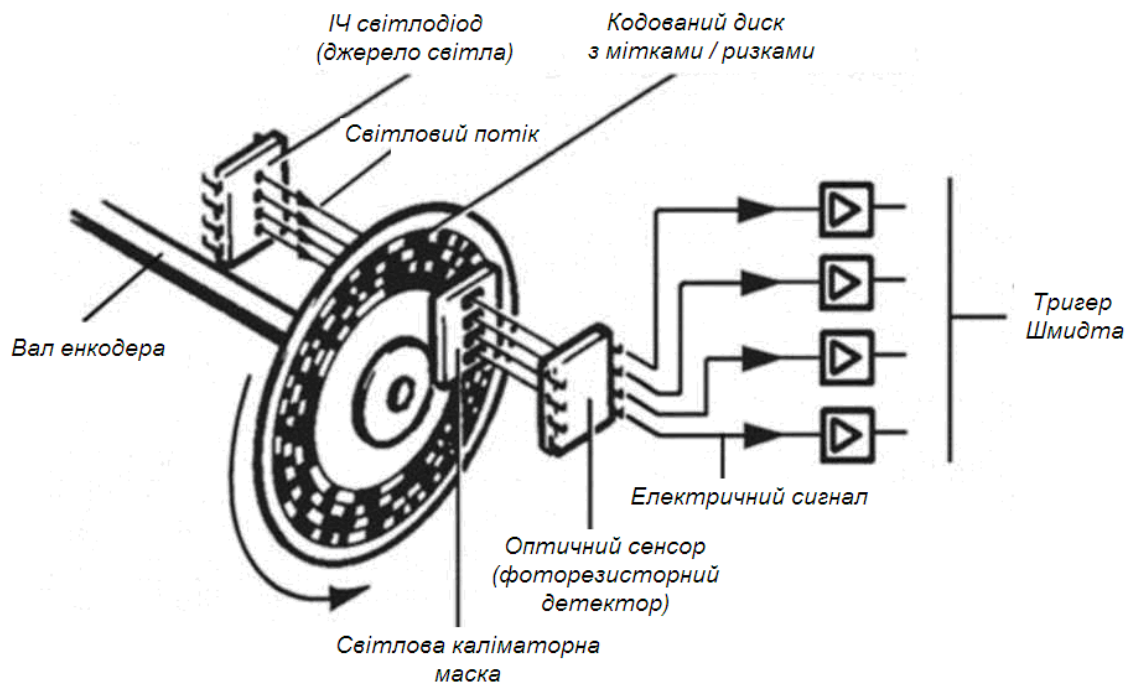


Рисунок 14.13 - Фотодетектори розташовані вздовж окружного напрямку

Матричне кодування є одним із методів цього типу. Згідно з ним, кодовий диск енкодера розділений на різні віялоподібні області (рис. 14.14).

Крім того, головки для читання, які лежать в одній доріжці, але на різних ділянках, використовуються для представлення різних бітів інформації про місцезнаходження. Розмір енкодера може бути значно зменшений. Однак похибки вимірювання, спричинені помилками встановлення енкодерів, будуть більшими, ніж інші два методи, згадані вище. Метод псевдовипадкового кодування використовується для вимірювання абсолютного кутового положення.

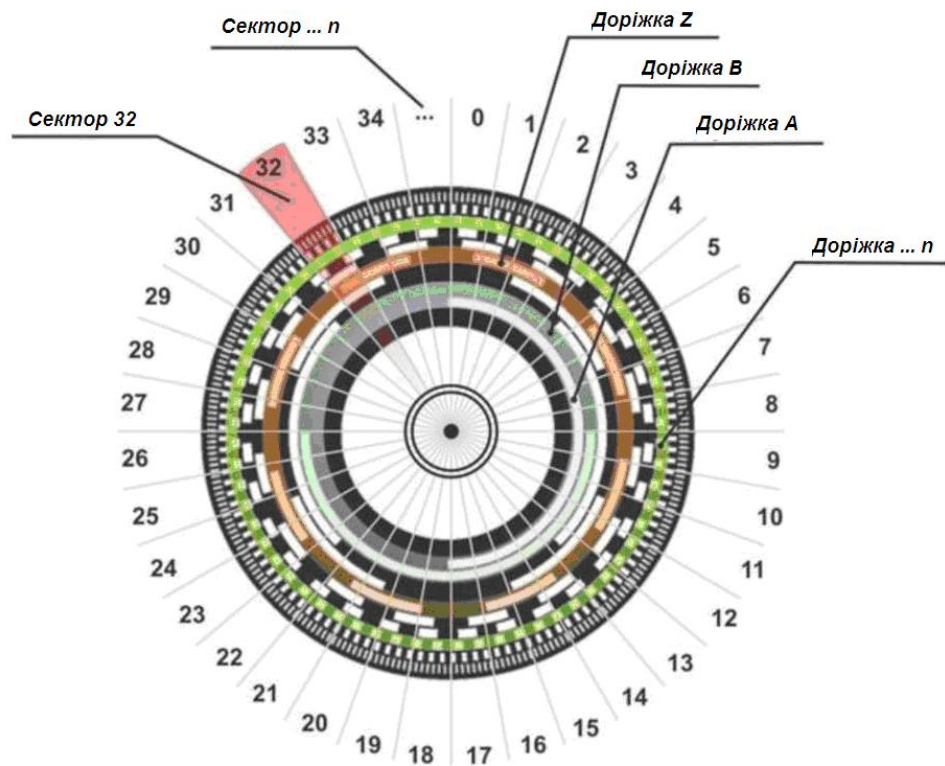


Рисунок 14.14 - Розділення диска на сектори

У цьому методі енкодер складається з доріжки коду синхронізації та доріжки коду індексу, що допомагає зменшити розмір енкодера. Однак кількість головки зчитування та щілин буде збільшуватися в геометричній прогресії із покращенням точності вимірювання енкодера. Тому метод рідко використовується у багатобітових енкодерах.

Енкодери типу ноніуса мають дві - три доріжки на кодовому диску для вимірювання абсолютного положення обертання, прості в конструкції та компактні в порівнянні з іншими. Однак метод вимірювання абсолютного кута положення повинен «знати» номери щілин, навколо яких обертався кодер, що навряд чи можна отримати в реальному застосуванні.

Метод кодування шин з М-кодом дозволяє уникнути грубих помилок і корисний для мінімізації фізичних розмірів енкодерів. Однак для досягнення більш високої роздільної здатності абсолютні енкодери, що використовують метод кодування М-коду, повинні включати невеликий крок щілини, що заважає фотодетектору енкодера отримувати фіксовану амплітуду сигналу.

В методі квазіабсолютного кодування, кодовий диск енодера складається з доріжки циклічного коду та доріжки коду індексу. Всі ефективні біти кодування позиції перераховані в доріжці індексного коду. Отже, по окружному напрямку повинно бути багато фотодетекторів. Метод корисний для мінімізації розмірності енодера, однак для отримання першого коду позиції йому потрібен процес завантаження. Тому певною мірою воно не належить до методу абсолютного вимірювання положення. Використовуючи метод даного типу, розмір енодерів можна значно зменшити порівняно з двома іншими методами першого типу. Однак у цих методах існує багато фотодетекторів, що є ще одним обмеженням для збільшення роздільної здатності вимірювання та зменшення розмірів енодерів.

Існують два типи абсолютних енодерів:

- абсолютні однооборотні енодери;
- абсолютні багатооборотні енодери.

Абсолютний одно-оборотний енодер - це датчик кутового положення, який підраховує кількість унікальних цифрових кодів за один оборот обертання диска.

Абсолютний багатооборотний енодер - це датчик кутового положення, який підраховує кількість унікальних цифрових кодів за більш, ніж один оборот обертання диска за допомогою спеціального механічного вузла і додаткових фотодетекторів.

На рисунку 14.15 показано принцип роботи абсолютного оптичного енодера з редуктором. Такий пристрій можна використовувати для вимірювання куту оберту, коли енодер розмінюється на осі двигуна, що здійснює багато обертів перш, ніж механізм редуктору здійснить хоча б один повний оберт.

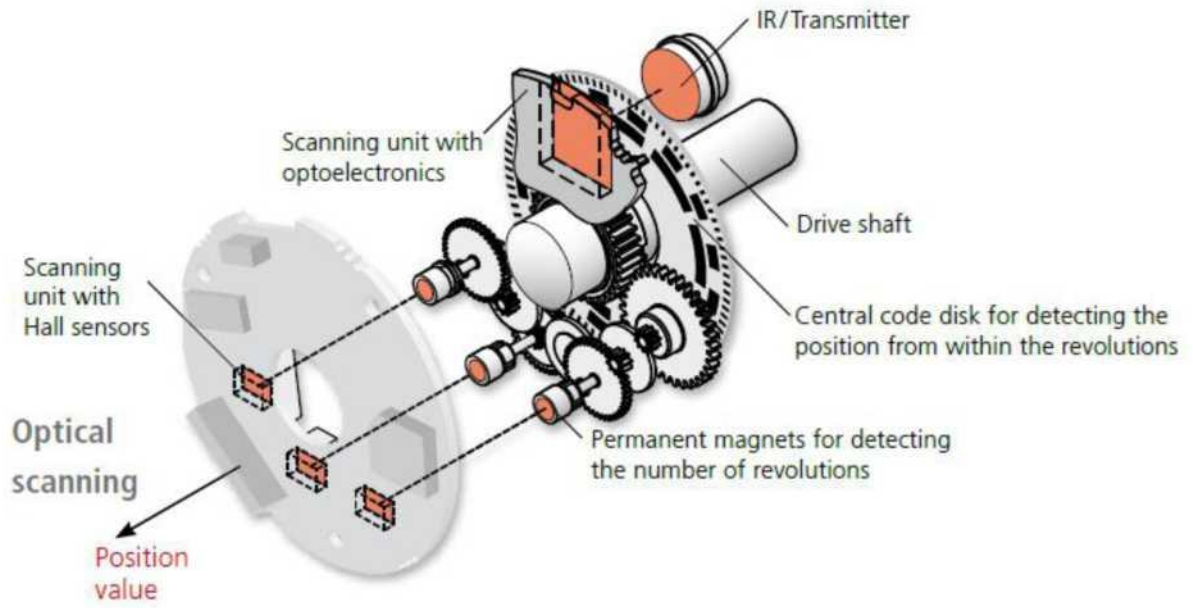


Рисунок 14.15 - Принцип роботи абсолютного оптичного енкодера з редуктором