

## СПОСОБИ ФОРМУВАННЯ ОДНОДОРІЖКОВИХ КОДОВИХ ДИСКІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СЕНСОРІВ КУТА

The article considers creation methods of effective single-track code disks for absolute encoders, analyzes methods of pseudorandom sequences encoding and discovers bounds of their application.

**Keywords:** *optical angular encoder, M-sequence, code disk.*

Розглянуто способи створення ефективних одnodоріжкових кодових дисків для сенсорів абсолютного кута, проаналізовано способи кодування псевдовипадкових послідовностей на кодовій доріжці та дано рекомендації щодо їх застосування.

**Ключові слова:** *сенсор абсолютного кута, M-послідовність, кодовий диск.*

Сенсор абсолютного кута використовується для перетворення положення осі у відповідний цифровий код і є важливим елементом опорно-поворотних пристроїв антен, телескопів, промислової автоматики та ін. Серед відомих найбільшу точність забезпечують оптоелектронні сенсори кута. Основною деталлю такого сенсора є диск із нанесеним на нього кодом, який зчитується оптоелектронним способом. Важливим завданням проектування сенсорів кута є вибір способу побудови кодового диска, що впливає на точність та надійність перетворення.

Поширеним підходом до побудови сенсорів абсолютного кута є використання багаторядкових кодових дисків із кодом Грея (рис. 1а). Роздільна здатність такого диска визначається кількістю нанесених доріжок і її підвищення збільшує габарити, ускладнює технологію виготовлення та зчитування диска. Також відома [3] кодова послідовність, що має властивості коду Грея і може бути зчитана лише з однієї доріжки за допомогою чутливих елементів, точно розміщених за периметром диска (рис. 1б). Недоліком цього способу є технологічна складність точного розміщення чутливих елементів.

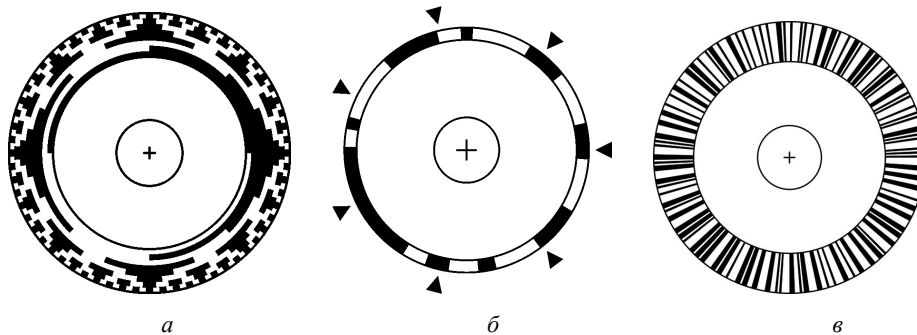


Рис. 1. Кодові диски з різними типами кодів: а – класичний код Грея  $2^8$ ; б – одnorядковий код Грея ( $2^7-2$ ); в – диск псевдовипадкової послідовності.

Відносно новим способом побудови сенсорів абсолютного кута є використання однієї кодової доріжки із символів псевдовипадкової послідовності (рис. 1в) [2, 5, 6]. На прозорий диск 1 (рис. 2а) наносять доріжку, що складається із символів послідовності, закодованої прозорими та непрозорими секторами різної ширини. За допомогою світлодіода 2 фрагмент кодової доріжки проектується на од-

норядкову фотоматрицю 3, розміщену поперек секторів. Отримане зображення аналізують мікроконтролером, при цьому грубий відлік кута визначають за кодовою комбінацією на диску, а точний – врахуванням зміщення елементів коду відносно початку відліку фотоматриці (рис. 2б).

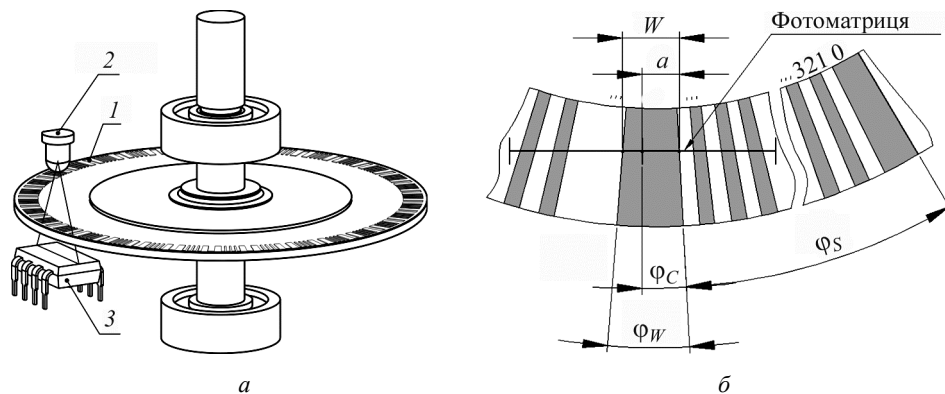


Рис. 2. Сенсор кута на основі псевдовипадкової послідовності:  
а – конструкція; б – схема вимірювання.

Для однозначного знаходження зміщення символів кодова доріжка має бути побудована так, щоб довільна послідовність символів, що проектується на фотоматрицю, траплялася б лише раз для всієї доріжки. Таку доріжку можна побудувати на основі послідовності максимальної довжини (М-послідовності), що має такі властивості [4, 6]:

- 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 підпослідовність символів довжиною  $k$ , окрім послідовності із  $k$  нулів трапляється лише раз.

Сенсори на основі кодової доріжки із символів псевдовипадкової послідовності технологічно простіші та надійніші від сенсорів на основі коду Грея. Роздільна здатність таких сенсорів залежить від вибору способу кодування псевдовипадкової послідовності на диску. Тому важливою задачею у процесі проектування сенсорів абсолютного кута на основі однорядкової кодової послідовності є вибір способу кодування псевдовипадкової послідовності на доріжці, який впливає на допустимий діапазон радіусів кодового диска та на ймовірність правильного розпізнавання зображення фрагменту послідовності за умови часткового забруднення поверхні диска.

Мета роботи полягає в дослідженні параметрів та пошуку оптимальних способів кодування псевдовипадкової послідовності для однорядкових кодових дисків оптоелектронних сенсорів кута.

**Вимоги до коду.** На основі однорядкового кодового диска ми створили інтелектуальний сенсор абсолютного кута для систем наведення дзеркальних антен (рис. 3а) [1]. Завдяки прийнятим технічним рішенням, конструктивним особливостям та програмним алгоритмам зменшуються вимоги до характеристик оптичної системи сенсора порівняно з растровими або багатоканальними схемами, підвищується надійність роботи, мінімізується низка похибок механічних вузлів (перекоси валу, зміщення диска, ексцентриситет). Експериментальні взірці відлікових пристроїв показали ефективну роботу в складі антенних станцій “Витязь-7” та “Квазар+7,6” з діаметрами рефлекторів 7 м для наведення та стеження за штучними супутниками в системах космічного зв’язку та радіомоніторингу.

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

- самосинхронізація – має існувати можливість встановлення меж символів кодової доріжки; (для визначення зміщення тіні сектора відносно фотоматриці необхідно, щоб кожний символ мав чіткі межі);
- ширини символів мають бути такими, щоб довільний фрагмент доріжки, що проєктується на фотоматрицю, траплявся лише раз для всієї кодової послідовності; тому ширина кодових символів обмежена зверху розмірами фотоматриці і довжиною кодового слова;
- найдрібніші елементи кодування символу мають бути ширшими за роздільну здатність оптичної системи  $\Delta w$ , яка визначається розмірами пікселя фотоматриці та розміром тіней секторів (для побудованого сенсора ширина найдрібнішого елемента дорівнює 0,254 мм);
- оскільки забруднення прозорої ділянки доріжки може спричинити похибку розпізнавання символу, то для підвищення надійності варто максимізувати коефіцієнт заповнення доріжки непрозорими ділянками (рис. 3б).

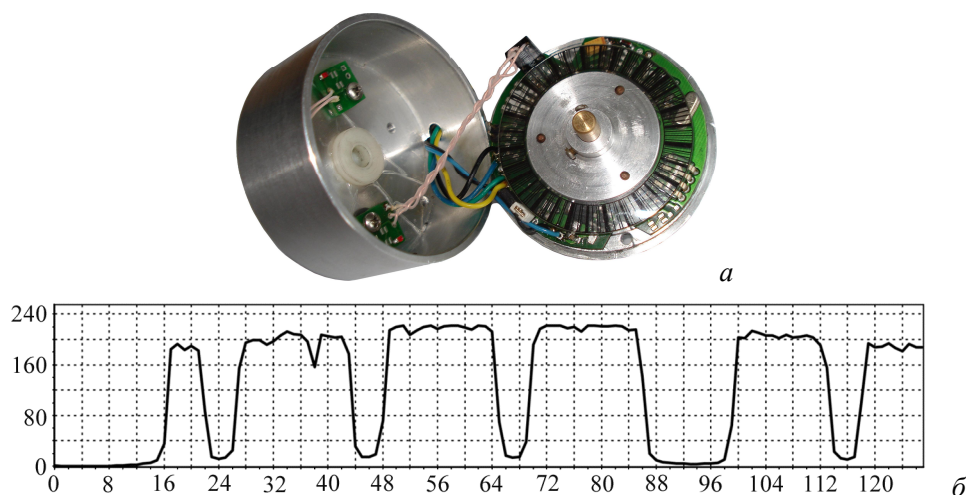


Рис. 3. Конструкція сенсора (а) та зображення фрагменту кодової доріжки (б).

**Способи кодування псевдовипадкової послідовності.** У найпростішому випадку бінарний код кодується за допомогою імпульсного кодування: символ 0 зображують непрозорим сектором, символ 1 – прозорим (рис. 4а). Недоліком такого кодування є відсутність властивості самосинхронізації, 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. 4б). Недоліком манчестерського кодування є неможливість встановлення бітової синхронізації для зображення послідовності однакових бітів та обмеження алфавіту лише до двох символів.

Недоліків манчестерського кодування позбавлений принцип широтно-імпульсного кодування, при якому кожний символ займає однакову ширину, його кодують за допомогою прозорої та непрозорої смуги, а інформативним параметром є співвідношення між їхніми ширинами (рис. 4в) [2]. Широтно-імпульсне кодування дає змогу надійно виявляти окремі символи і визначати їхнє положення, однак порівняно із 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 розділені світлими смугами одиничної ширини (рис. 4з). Перевагою цього способу є високе заповнення кодової доріжки непрозорими смугами, а отже, висока стійкість до забруднень.

Підвищити щільність запису можна, якщо повністю відмовитися від розділювачів. Для цього слід чергувати прозорі і непрозорі смуги, а символи декодувати, виходячи лише з їхньої ширини (рис. 4д). Такий спосіб запису далі називатимемо широтним кодуванням.

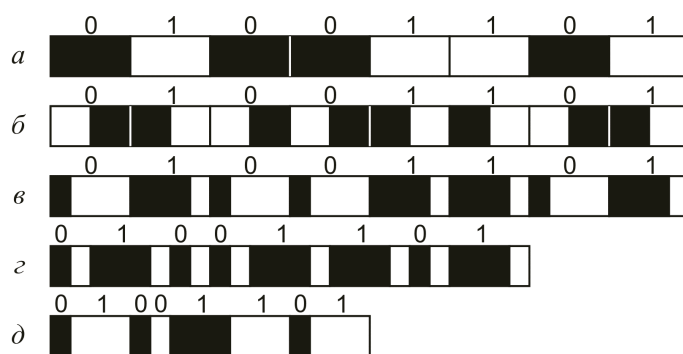


Рис. 4. Способи кодування псевдовипадкової послідовності: *a* – імпульсне; *б* – манчестерське; *в* – широтно-імпульсне; *г* – частотно-імпульсне; *д* – широтне.

**Мінімальні та максимальні довжини кодової доріжки.** Від обраного способу кодування залежить мінімальна та максимальна довжина кодових доріжок, побудованих для заданої кодової послідовності та параметрів фотоматриці. У загальному випадку довжину кодової доріжки  $W$  можна обчислити як суму добуток довжин окремих символів алфавіту  $w_i$  на кількість входжень символів у кодову послідовність  $N_i$  (1)

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

На основі кодової доріжки довжиною  $W$  можна побудувати диск радіусом  $R$

$$R = \frac{W}{2\pi} . \quad (2)$$

**Широтно-імпульсне кодування.** Мінімальну довжину кодової доріжки, записаної за допомогою широтно-імпульсного кодування, визначатиме роздільна здатність оптичної системи  $\Delta w$  та кількість символів алфавіту  $p$ . Для того, щоб розрізнити  $p$  символів, потрібно, щоб ширина символу була не менша  $(p+1) \cdot \Delta w$  (рис. 5). Якщо загальна кількість символів кодової послідовності рівна  $N$ , то її довжина обмежена знизу  $W_{\min}$

$$W_{\min} = N \cdot (p + 1) \cdot \Delta w . \quad (3)$$

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

$$w_{\max} = \frac{w_L}{k + 1} , \quad (4)$$

Отже, довжина кодової доріжки, записаної широтно-імпульсним кодуванням, не може перевищувати  $W_{\max}$  (5)

$$W_{\max} = N \cdot w_{\max} = N \frac{w_L}{k+1}. \quad (5)$$

**Частотно-імпульсне кодування.** Мінімальна довжина доріжки, записаної за допомогою частотно-імпульсного кодування, визначається роздільною здатністю оптичної системи  $\Delta w$  та властивостями обраної послідовності. Мінімальна ширина символів для частотно-імпульсного кодування (рис. 5)  $w_i$  дорівнюватиме

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

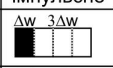
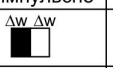

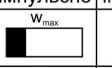
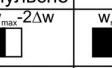
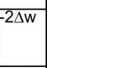
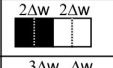
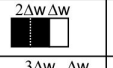

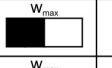
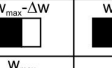
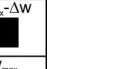
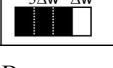
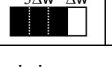

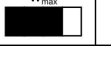


	Мінімальні розміри символів			Максимальні розміри символів		
	Широтно-імпульсне	Частотно-імпульсне	Широтне	Широтно-імпульсне	Частотно-імпульсне	Широтне
“0”						
“1”						
“2”						

Рис. 5. Визначення мінімальних та максимальних розмірів символів.

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 так:

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

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

Отже, мінімальна довжина  $W_{\min}$  частотно-імпульсно-кодованої доріжки визначається так:

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

$$W_{\min} = p^k \cdot \Delta w \frac{3 + p}{2}. \quad (6)$$

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 довжиною  $w_L$  має вмещувати  $k$  символів довжиною  $w_{\max}$  та один символ довжиною  $(w_{\max} - \Delta w)$ , що проектується на межі фотоматриці ( $\Delta w$  – роздільна здатність).

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

$$w_{\max} = \frac{w_L + \Delta w}{k + 1}.$$

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

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

Максимальна довжина кодової доріжки  $W_{\max}$  дорівнюватиме

$$W_{\max} = \sum_{i=0}^{p-1} N_i w_i = \frac{p^k}{p} \sum_{i=0}^{p-1} \left( \frac{w_L + \Delta w}{k + 1} - \Delta w \cdot (p - i - 1) \right);$$

$$W_{\max} = p^k \left( \frac{w_L + \Delta w}{k+1} - \Delta w \frac{p-1}{2} \right). \quad (7)$$

**Широтне кодування.** Мінімальну довжину кодової доріжки  $W_{\min}$  можна обчислити, виходячи з роздільної здатності оптичної системи  $\Delta w$ . Мінімальна ширина символів для широтного кодування (рис. 5)  $w_i$  дорівнює

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

Тому мінімальну довжину  $W_{\min}$  широтно-кодованої доріжки визначають так:

$$W_{\min} = \sum_{i=0}^{p-1} N_i w_i = \sum_{i=0}^{p-1} \left( \frac{p^k}{p} \Delta w \cdot (i+1) \right);$$

$$W_{\min} = p^k \cdot \Delta w \frac{p+1}{2}. \quad (8)$$

Максимальна довжина доріжки, записаної широтним кодуванням, визначається аналогічно до максимальної довжини доріжки частотно-імпульсного кодування (7).

У таблиці наведено розраховані мінімальні та максимальні радіуси дисків, побудованих на основі М-последовностей, записаних широтно-імпульсним, частотно-імпульсним та широтним кодуванням, які зчитуються фотоматрицею довжиною  $w_L = 8,128$  мм з оптичною роздільною здатністю  $\Delta w = 0,254$  мм. Отримані допустимі межі зміни радіусу диска подано на рис. 6.

#### Порівняння способів кодування

Последовність	$p$	$k$	$N$	Широтно-імпульсне		Частотно-імпульсне		Широтне	
				$R_{\min}$ , мм	$R_{\max}$ , мм	$R_{\min}$ , мм	$R_{\max}$ , мм	$R_{\min}$ , мм	$R_{\max}$ , мм
М-посл. $2^6$	2	6	64	7,76	11,8	6,47	10,9	3,88	10,9
М-посл. $2^7$	2	7	128	15,5	20,7	12,9	18,8	7,77	18,8
М-посл. $2^8$	2	8	256	31,0	36,8	25,9	32,8	15,5	32,8
М-посл. $2^9$	2	9	512	62,1	66,2	51,7	58,0	31,0	58,0
М-посл. $2^{10}$	2	10	1024	124	120	104	104	62,1	104
М-посл. $3^4$	3	4	81	13,1	21,0	9,82	18,3	6,55	18,3
М-посл. $3^5$	3	5	243	39,3	52,4	29,5	44,2	19,6	44,2
М-посл. $3^6$	3	6	729	118	135	88,4	110	58,9	110

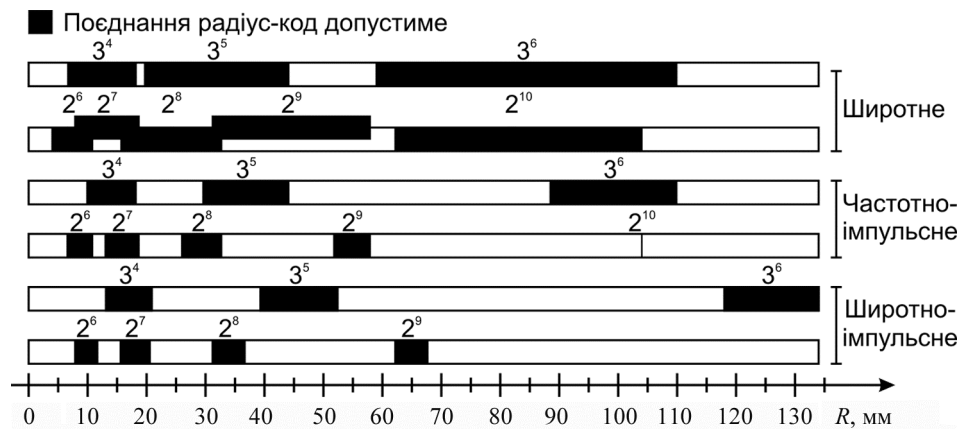


Рис. 6. Порівняння діапазонів допустимих радіусів кодових дисків.

## ВИСНОВКИ

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень розробленого інтелектуального сенсора кута визначено:

1. Кодовий диск на основі однієї доріжки із символів М-последовності є ефективним способом побудови оптоелектронних інтелектуальних сенсорів абсолютного кута.
  2. Від вибору способу кодування псевдовипадкової последовності на диск залежить співвідношення між розмірами символів та коефіцієнт заповнення доріжки, що впливає на надійність розпізнавання символів.
  3. Широко-імпульсне кодування символів дає змогу для заданої последовності побудувати найдовшу кодову доріжку, отже, отримати максимальну роздільну здатність. Недоліком такого кодування є вдвічі вища просторова частота, що не дає змоги змінювати розміри диска в широких межах.
  4. Частотно-імпульсне кодування дає змогу отримати найвище заповнення кодової доріжки непрозорими ділянками, а отже, створювати диски, найстійкіші до точкових забруднень (пилу).
  5. Широке кодування дає можливість отримати найвищу щільність запису і варіювати розміри доріжки в широких межах. Просторова частота широтного коду вдвічі менша за частоту широтно-імпульсного та частотно-імпульсного коду, що дає можливість максимізувати різницю розмірів символів і мінімізувати ймовірність помилки їх розпізнавання.
  6. Результати досліджень виявили, що в жорстких кліматичних умовах роботи найстійкішими є кодові диски на основі широтного та частотно-імпульсного кодування.
1. Паламар М., Чайковський А. Розробка та метрологічний аналіз прецизійного датчика кута для антенних систем // Вісник ТДТУ. – 2008. – 13, № 4. – С. 158–165.
  2. Design Considerations for an Absolute Steering Angle Encoder Demo, TAOS, <http://www.taosinc.com/getfile.aspx?type=press&file=encoderdesign4b.pdf>
  3. Hiltgen A. P., Paterson K. G., Brandestini M. Single-track Gray codes // IEEE Transactions on information theory. – 1996. – 42, № 5. – P. 1555–1561.
  4. Hong-Yeop Song Feedback Shift Register Sequences / Encyclopedia of Telecommunications // Ed. by G. J. Proakis. – New York: John Wiley & Sons, 2002.
  5. Lingk Christoph Absolute position code and position measuring device: WO2010049222 IPC6: G01D5/249; G01D5/347; applicant Heidenhain GmbH Dr Johannes [DE]; Lingk Christoph [DE]; appl. 23.09.2009 publ. 06.05.2010.
  6. Mehrl D. J. Position Detection Using Maximal Length Sequences / Intelligent opto sensor designer's notebook, TAOS, <http://www.taosinc.com/getfile.aspx?type=press&file=iosdn1.pdf>