

Паламар М., Чайковський А. Розробка та метрологічний аналіз прецизійного датчика кута для антенних систем // Вісник ТДТУ. – 2008. - Том 13. - №4. – ст.. 158-165. – (приладобудування та інформаційно-вимірвальні системи).

УДК 681.5, 621.3

М. Паламар, канд. техн. наук; А. Чайковський

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

РОЗРОБКА ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРЕЦИЗІЙНОГО ДАТЧИКА КУТА ДЛЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ

У статті розглядається конструкція, схема та алгоритм функціонування нового оптоелектронного датчика абсолютних кутових положень для керування наведенням антенних систем та стеження за космічними апаратами. Зроблено метрологічний аналіз датчика, оцінка джерел похибок, розглянуто результати моделювання та результати експериментальних досліджень. Запропонована методика і схемна реалізація виключення ряду систематичних похибок датчика. Програмна обробка інформації в датчику спрощує вимоги до механічної конструкції, підвищуючи його стійкість до жорстких умов експлуатації, і дає можливість використовувати датчик в антенних комплексах для супроводу низькоорбітальних космічних апаратів і прийому даних дистанційного зондування Землі з космосу.

Ключові слова: Антенна система, датчик кута, похибки, система керування, дистанційне зондування Землі.

M. Palamar, A. Chaikovskiy

DESIGN AND MEASUREMENT ANALYSIS OF PRECISION ENCODER FOR ANTENNA SYSTEMS

In this article are considered the construction and functional algorithm of the new optoelectronic absolute angular position sensor for antenna system aiming and space apparatus tracking tasks. Measurement analysis, error sources estimation and accuracy modeling was done. Some experimental results are pointed out. The article proposes method of eccentricity error elimination. Program information treating reduce requirements to the mechanical construction, and promotes stability in the hard environment, which enables use in the antenna systems for remote Earth sensing space apparatus tracking.

Keywords: Antenna system, angular sensor, errors, control system, remote sensing of Earth.

Вступ. Одним з найважливіших вузлів забезпечення точності наведення променя великогабаритних антенних систем (з діаметрами рефлектора більше 5 метрів) і супроводу космічних апаратів є датчики кутового положення осей АС. Особливостями таких кутових відлікових пристроїв для АС ДЗЗ є те, що вони повинні вимірювати абсолютні значення кутів з великою роздільною здатністю (одиниці кутових мінут), забезпечувати високі динамічні характеристики відліку при супроводі низькоорбітальних КА, простоту і зручність початкової установки даних (юстування АС), передавати дані на великі відстані (більше 100 м), бути надійними і стійкими до кліматичних факторів.

З існуючих кутових датчиків досить важко підібрати такі, що комплексно відповідають названим критеріям. Так оптичні інкрементальні датчики кута не можуть застосовуватись через особливості експлуатації АС, які можуть бути повернуті на певні кути без подачі живлення в систему керування, а процедура прив'язки напрямку променя АС до світових координат є досить громіздкою. Недоліками датчиків на основі синусно-косинусних обертових трансформаторів є невисока точність, нелінійність та громіздкі схеми включення і обробки інформації, хоч вони надійніші порівняно з іншими.

Існуючі абсолютні оптоелектронні датчики кута визначають положення, зчитуючи в прохідному або відбитому світлі кодову послідовність нанесену на одну або декілька доріжок. У вітчизняній літературі розповсюджений опис принципу

визначення кута шляхом зчитування за допомогою набору радіально розміщених фотодіодів (наприклад [1]). Недоліком такої схеми є те, що для досягнення високої роздільної здатності необхідна велика кількість доріжок, що або підвищує вимоги до якості диска, або збільшує його габарити. Тому Гільтген, Патерсон та Брандестіні запропонували послідовність, що володіє властивостями коду Грея і може бути зчитана лише з одного треку [3]. Всі доріжки такого коду формуються циклічним зсувом першої, а чутливі елементи розміщують по колу. В роботі Т. Етзона та К. Дж. Патерсона [4] запропоновано спосіб отримання послідовності таких кодів довжиною $2^n - 2n$ слів (n довжина слова). Чутливі елементи в такому датчику розміщені по колу, вздовж доріжки.

Іншим поширеним варіантом побудови одотрекового диска є використання штрихів різної товщини. Принцип функціонування таких датчиків описаний наприклад в патентах [5-7]. Схожий диск використовується в абсолютному датчику A2 фірми US Digital [8]. Хоча така конструкція проста, проте неточності виготовлення, ексцентриситет та перекося кодів диска спричинюють додаткові похибки вимірювання.

На кафедрі приладів і контрольно-вимірювальних систем ТДТУ на основі сучасних аналогів розроблена конструкція, електронна схема і програмний алгоритм функціонування оптоелектронного датчика кута з оптимальним, на наш погляд, поєднанням дискретності відліку та простоти конструкції для можливості використання у великогабаритних антенних комплексах [2].

Структура і принцип роботи датчика кута

В основі роботи оптоелектронного датчика кута покладено принцип розпізнавання зображення від спеціального штрихового коду, нанесеного на обертовий диск, що освітлюється пучком світла і проектується на однорядкову фотодіодну лінійку. На рисунку 1 зображена функціональна схема датчика.

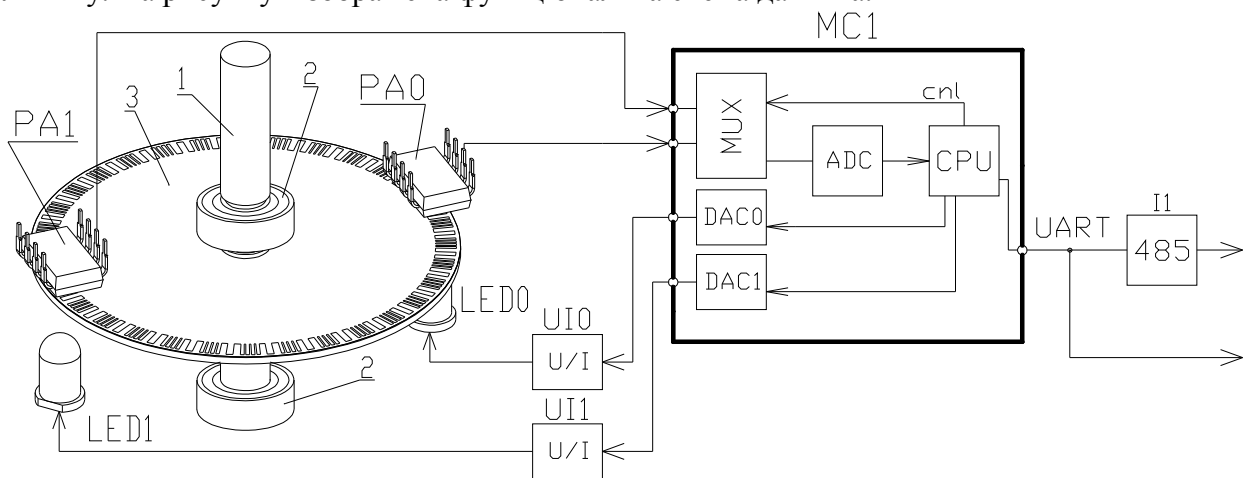


Рисунок 1 – Функціональна схема оптоелектронного датчика

На осі 1, що вільно обертається в підшипниках 2, прикріплений полімерний диск 3 на який нанесена послідовність із прозорих та непрозорих секторів різної ширини. Вздовж протилежних хорд диска розміщені дві інтегральні однорядкові фотоматриці PA0, PA1 (1x128 пікселів). За допомогою точкових освітлювачів LED0, LED1 зображення коду диска проектується на світлочутливу поверхню відповідної матриці у послідовність світлих та темних смуг які однозначно визначають положення диска. На рисунку 2б зображено графік освітленості фотоматриці. В залежності від ширини і рівня освітленості кожна смуга інтерпретується як певний символ. При аналізі крайні смуги відкидаються як неповні. Наприклад, коду, зображеному на рисунку 2б, відповідає символна послідовність “,0,0,0#1,0,0”. Далі знаходимо в таблиці кодової послідовності позицію зміщення отриманої стрічки. Таким чином, отримуємо індекс кожного видимого сектора, а отже, і його кутові ширину та зміщення відносно нульового сектора. Кутове положення диска визначаємо враховуючи положення

сектора S , що проектується на центр лінійки фотоприймачів (рисунок 3). Для цього додаємо кутове зміщення φ_S сектора S відносно нульового сектора та кутове зміщення φ_C сектора S відносно центра фотолінійки. Для знаходження φ_C скористаємося тим, що кутова ширина сектора S відома. Прийнемо, що кутове зміщення пропорційне лінійному:

$$\varphi_c = \alpha_s \frac{l_c}{l_s}, \quad (1)$$

де α_s – кутова ширина сектора; l_s – довжина хорди сектора; l_c – лінійне зміщення сектора вздовж хорди.

Оскільки кут α_s є малим, то похибка, спричинена таким спрощенням, не перевищує 1 молодшого розряду ($20''$).

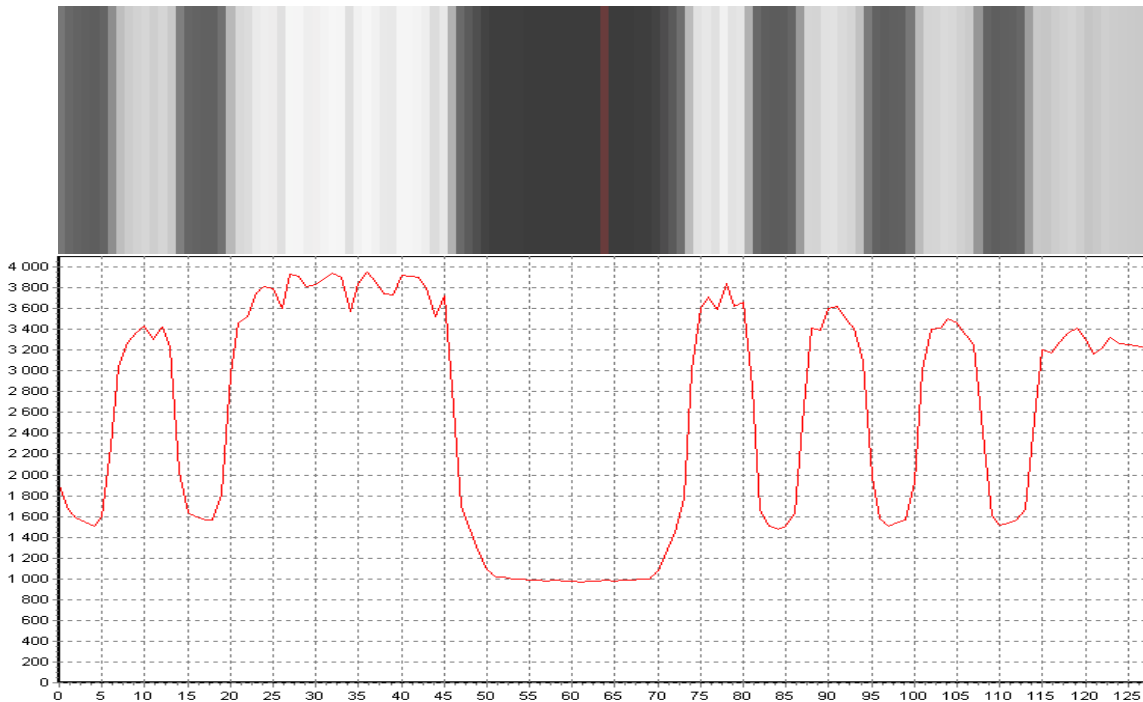


Рисунок 2 – Зображення коду (а) та графік зміни освітленості (б) фотоматриці

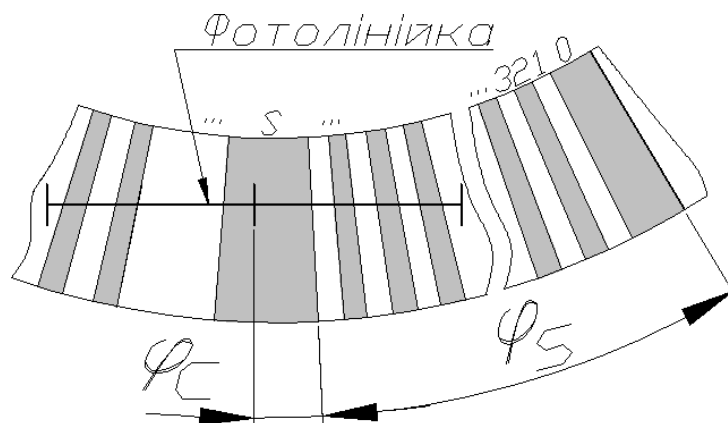


Рисунок 3 – Схема визначення кутового положення диска

Метрологічний аналіз та моделювання роботи датчика

Для визначення систематичної похибки змодельємо роботу датчика. Схемна модель датчика для обчислення кутового положення показана на рисунку 4. Змінюючи окремі параметри моделі, оцінимо їхній вплив на визначення кутового положення. У наведеній моделі розглядаються такі параметри.

φ – кутове положення диска;

- $L_{LT} = 13$ мм – відстань від освітлювача до транспаранта;
- $L_{LP} = 14$ мм – відстань від освітлювача до поверхні фотодіодної лінійки;
- $b = 1$ мм – товщина корпусу фотодіодної лінійки;
- $n = 1.55$ – коефіцієнт заломлення матеріалу фотодіодної лінійки;
- ΔO_x – зміщення осі диска паралельно фотодіодній лінійці;
- ΔO_y – зміщення осі диска перпендикулярно фотодіодній лінійці;
- ΔL_x – зміщення освітлювача відносно центра лінійки;
- e – ексцентриситет кодової доріжки;

Визначимо положення тіні сектора, що проектується на центр лінійки.

$$a_{s1} = -\Delta L_x + (a_{t1} + \Delta L_x) \cdot \frac{L_{LP}}{L_{LT}} + b \cdot \frac{l_{t1} + \Delta L_x}{\sqrt{(l_{t1} + \Delta L_x)^2 \cdot (n^2 - 1) + n^2 \cdot L_{LT}^2}} \quad (2)$$

$$l_{t1} = \Delta O_x + (r_{nom} + \Delta O_y) \cdot \text{tg}(\varphi_1)$$

Скориставшись формулою 1, визначимо φ_c . Додавши до φ_c зміщення сектора відносно початку відліку, отримуємо результат вимірювання φ_r . Абсолютна систематична похибка буде рівна різниці заданого і визначеного кута.

$$\Delta \varphi = \varphi_r - \varphi \quad (3)$$

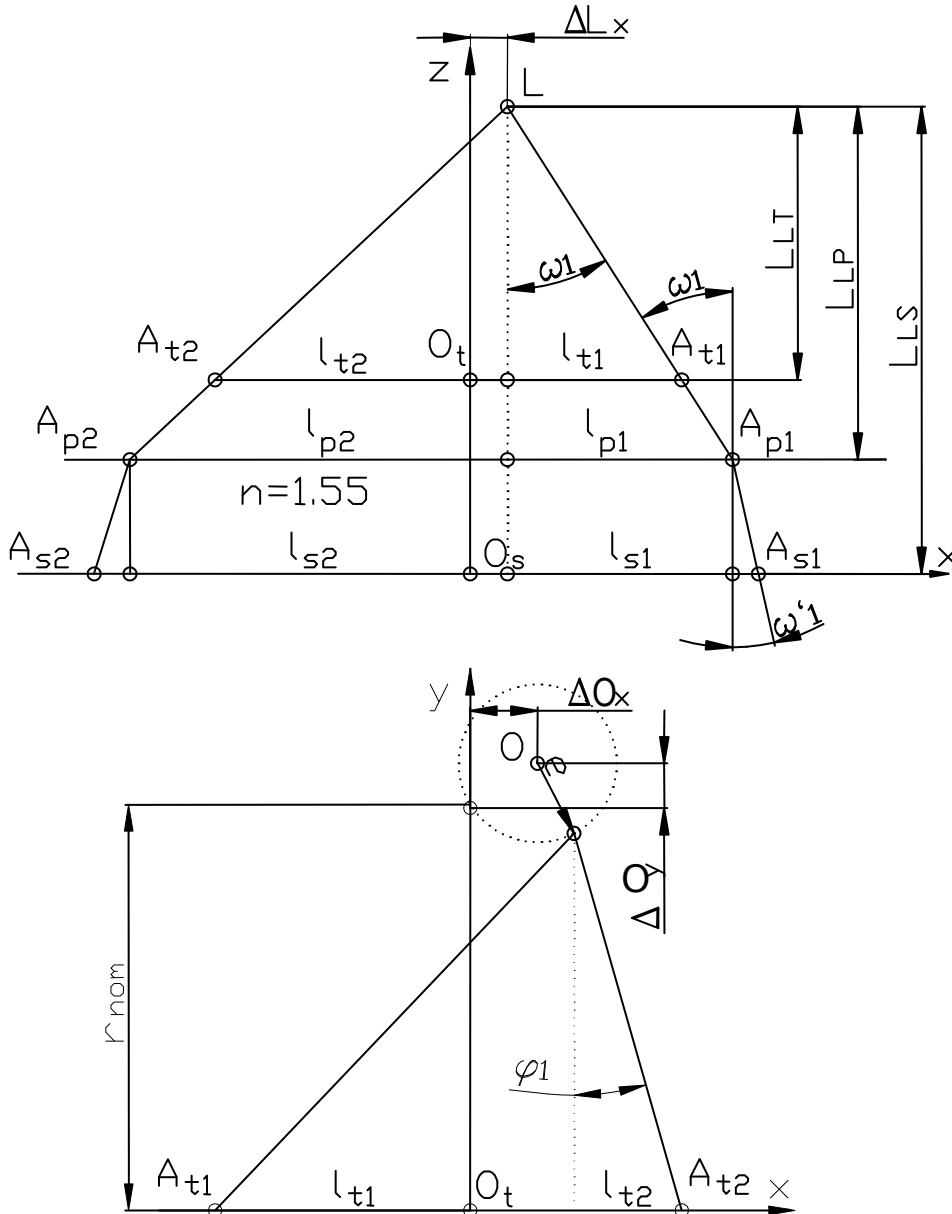


Рисунок 4 – Модель роботи датчика

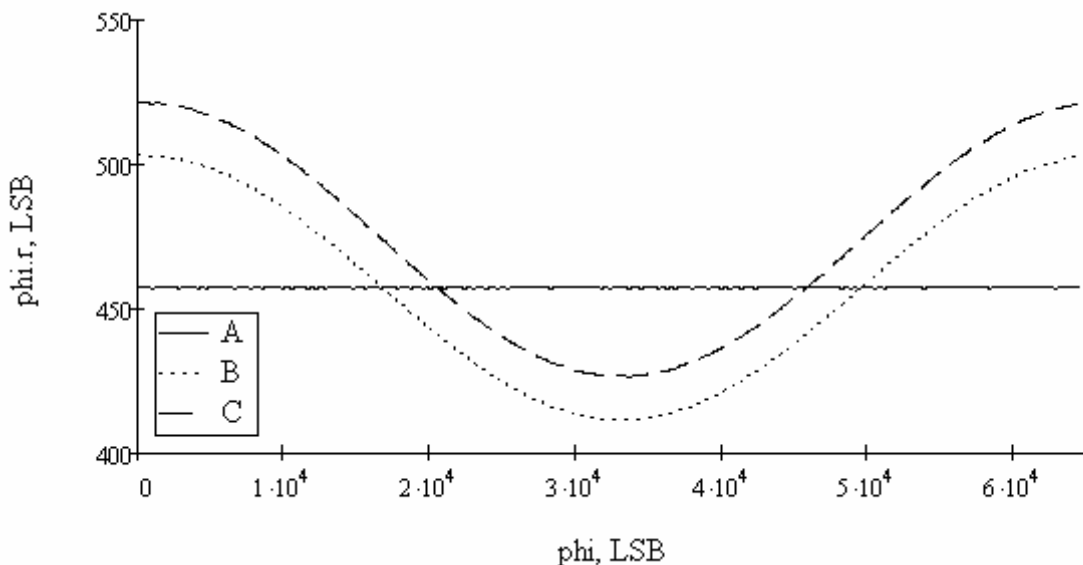


Рисунок 5 – Характер систематичної похибки датчика (одиниць м. р.=20''):
 Крива А – при $\Delta O_x=1\text{мм}$; $\Delta O_y=0.8\text{мм}$; $\Delta L_x=0\text{мм}$; $e=0\text{мм}$;
 Крива В – при $\Delta O_x=1\text{мм}$; $\Delta O_y=0.8\text{мм}$; $\Delta L_x=0\text{мм}$; $e=0.1\text{мм}$;
 Крива С – при $\Delta O_x=1\text{мм}$; $\Delta O_y=0.0\text{мм}$; $\Delta L_x=0\text{мм}$; $e=0.1\text{мм}$

На основі аналізу кривих систематичної похибки для наведеної схеми вимірювання можна зробити такі висновки:

- а) похибка, спричинена спрощенням розрахунку кута, не перевищує 20'';
- б) постійне зміщення транспаранта спричинює адитивну похибку, яка легко виключається при налаштуванні системи;
- в) ексцентриситет спричинює суттєву систематичну похибку. Виключити її можна юстуванням диска чи зміною схеми вимірювання;
- г) постійні зміщення диска ΔO_x , ΔO_y незначно впливають на характер похибки ексцентриситету;
- д) зміщення освітлювача та заломлення в корпусі фотодіодної лінійки приводять до постійної адитивної похибки.

Спосіб і алгоритм виключення систематичної похибки

Використовуючи схему вимірювання, в якій дані обробляються від двох діаметрально протилежних фотодіодних лінійок, можна виключити похибку, викликану зміщенням осі диска, а отже, і похибку, викликану ексцентриситетом. Схемна модель такого датчика приведена на рисунку 6. Кутове положення диска для приведеної схеми можна розраховувати за такою формулою:

$$\varphi_r = \frac{\left(\left(\alpha_2 - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot b_1 + \left(\alpha_1 - \frac{3\pi}{2} \right) \cdot b_2 \right) \cdot (\alpha_4 - \alpha_3) + \left(\left(\alpha_4 - \frac{\pi}{2} \right) \cdot b_3 + \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2} \right) \cdot b_4 \right) \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}{(\alpha_4 - \alpha_3)(b_1 + b_2) + (\alpha_2 - \alpha_1)(b_3 + b_4)}, \quad (4)$$

- де φ_r кут повороту диска відносно початку відліку;
 $\alpha_1 \dots \alpha_4$ кутові положення відносно початку відліку диска меж секторів, що проєктуються на середини обох лінійок;
 $b_1 \dots b_4$ лінійні зміщення меж секторів відносно центра відповідної лінійки.

На рисунку 7 показано результати моделювання роботи датчика в режимі визначення положення за двома фотодіодними лінійками. Моделювання полягало у визначенні за даним кутом φ та параметрами моделі зміщень меж центральних секторів для обох фотодіодних лінійок і розрахунку за формулою 4 φ_r – визначеного кутового

положення. Для $\pi/2 < \varphi < 3\pi/2$ доданки знаменника у формулі 4 враховувалися по модулю 2π . Різниця φ та φ_r є абсолютною систематичною похибкою.

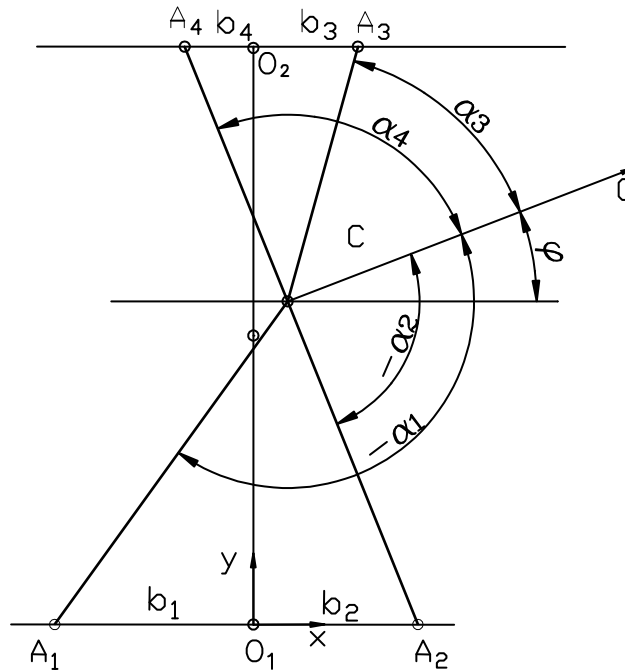


Рисунок 6 – Схема визначення кутового положення за двома лініями

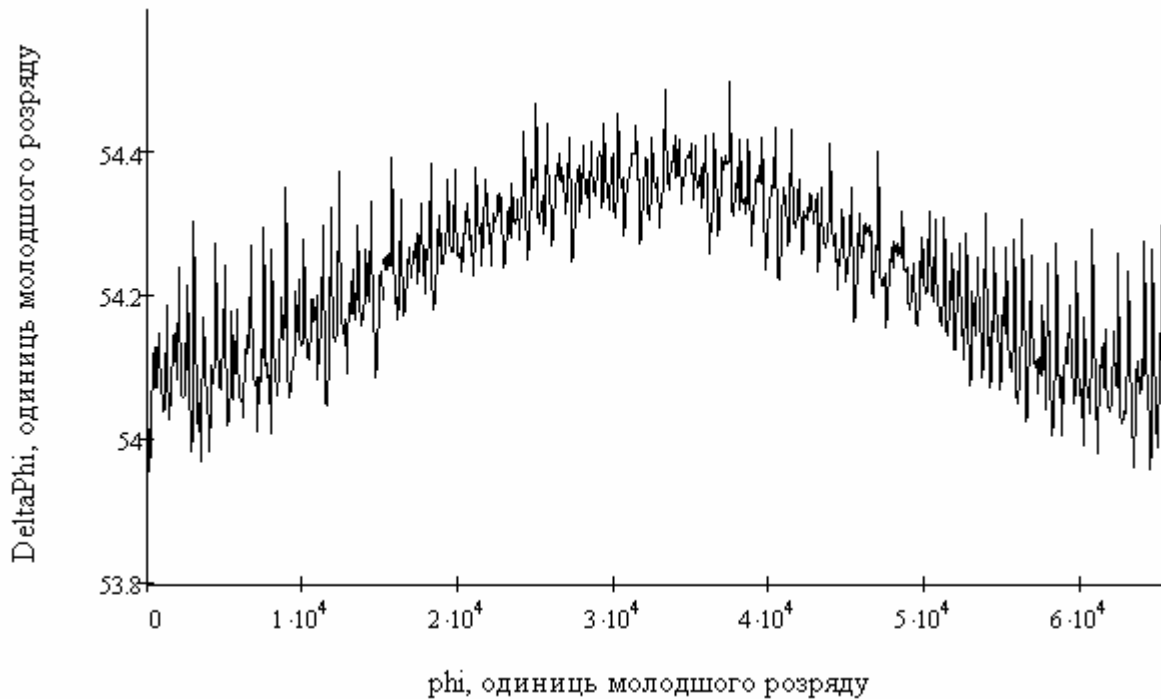


Рисунок 7 – Систематична похибка датчика в режимі двох фотодіодних лінійок в одиницях молодшого розряду ($20''$)

$\alpha=1^\circ$ $\Delta O_x=0.5\text{мм}$; $\Delta O_y=1\text{мм}$; $\Delta L_x=0.1\text{мм}$; $\Delta L_{LP}=0.2\text{мм}$ $\Delta L_{L1}=0.1\text{мм}$ $\Delta L'_x=0.01\text{мм}$ $\Delta L'_{LP}=0.3\text{мм}$
 $\Delta L'_{LT}=0.1\text{мм}$ $\Delta C_x=0.25\text{мм}$ $\Delta C_y=1\text{мм}$ $e=0.1\text{мм}$

Програмна реалізація та експериментальні дослідження

Для реалізації алгоритму розпізнавання ми використали однокантовий мікроконвертор ADuC841 фірми Analog Devices. На рисунку 8 показана конструкція та електронна плата датчика. Ядро контролера 8051 працює на частоті 14.7 МГц, при цьому програма витрачає близько 2 мс для отримання зображення та 10 мс для визначення положення. Контролер передає результати останнього вимірювання у

вигляді 2-байтного коду у відповідь на команду запиту від головного контролера системи керування АС.

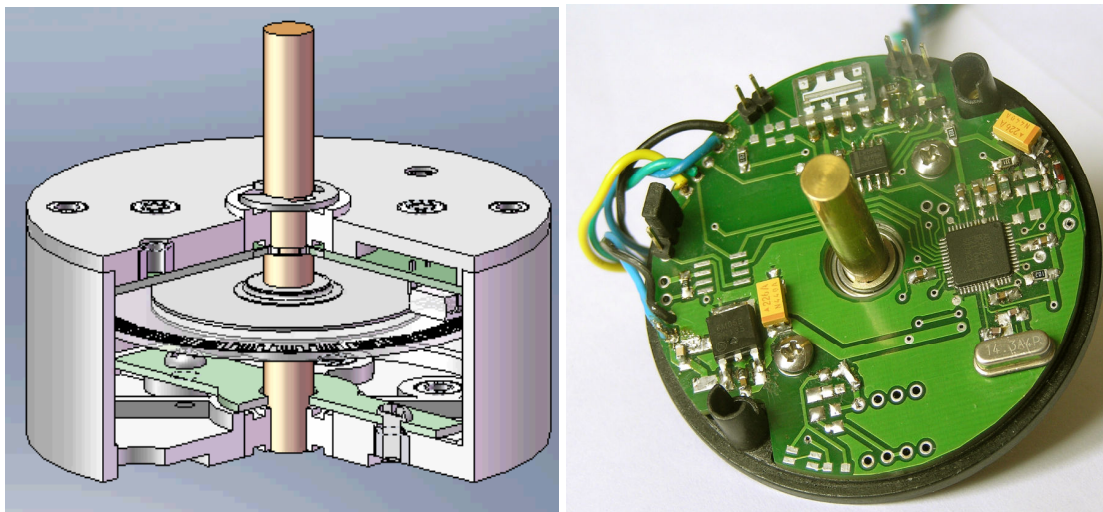


Рисунок 8 – Конструкція та вигляд плати датчика

Програмне забезпечення контролера, окрім отримання та розпізнавання зображення і визначення кутового положення, може керувати освітлювачами, вимірювати температуру в корпусі, зберігати інформацію про повірки, проводити діагностику датчика. Для полегшення настройки передбачені команди зміни напрямку відліку та встановлення поточної позиції.

Для дослідження точності ми одночасно визначали кутове положення диска із даних, отриманих із протилежно встановлених фотолінійок. Це виключило необхідність використовувати додатковий датчик та вживати заходів для їхнього спряження. На рисунку 9 представлені результати визначення різниці кутового положення, визначеного за двома фотолінійками.

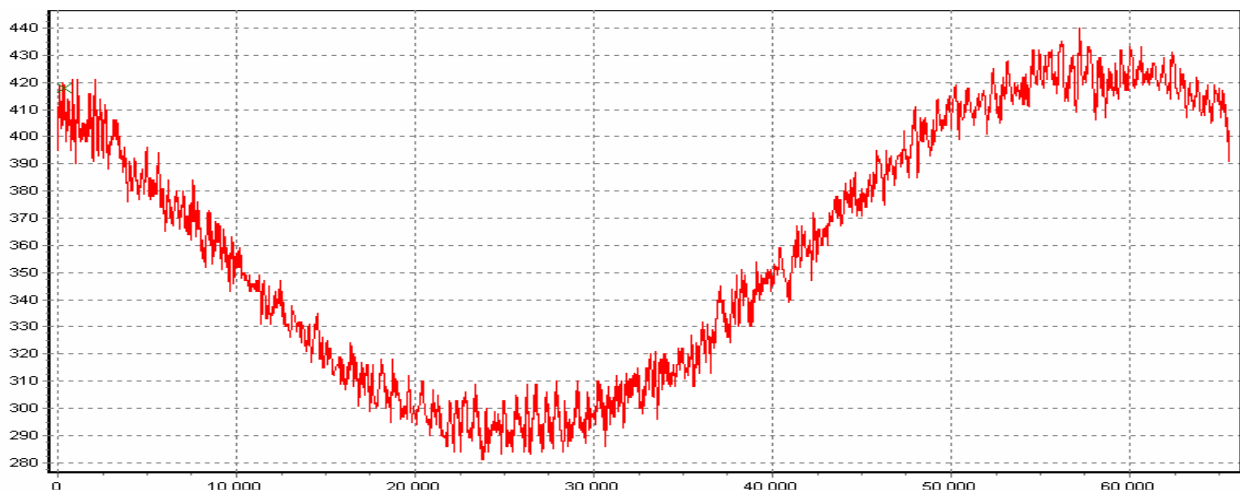


Рисунок 9 – Різниця показів протилежних фотолінійок (одиниць м.р.= 20'')

Аналіз результатів експерименту показує, що в конструкції досліджуваного датчика можуть бути присутні значні технологічні похибки:

- а) постійна складова похибки $\approx 40''$;
- б) похибка ексцентриситету $\approx 20''$;
- в) систематична похибка із періодом чергування секторів $\approx 10''$;
- г) систематична похибка із періодом чергування пікселів фотолінійки $\approx 1''$;

Проте за допомогою схемних рішень з використанням додаткового вимірювального каналу та алгоритмів програмної обробки інформації можна компенсувати ряд похибок.

Висновки

Отже, завдяки конструктивним особливостям та використанню 2-х оптоелектронних каналів і програмних алгоритмів обробки мінімізується ряд похибок механічних вузлів датчика (зміщення диска, ексцентриситет). Така схема вимірювання також виключає вплив випадкових зміщень осі датчика внаслідок люфту в опорах. Роздільна здатність такого датчика становить 20 кутових секунд. Проте, досі потребує розв'язання задача виключення похибок від нерівномірності освітлення та невизначеності меж секторів, які суттєво впливають на точність вимірювання.

Запропонована схемна реалізація з програмною обробкою інформації в датчику спрощує вимоги до механічної конструкції, підвищуючи його стійкість до жорстких умов експлуатації і дає можливість використовувати датчик в антенних комплексах для супроводу низькоорбітальних космічних апаратів і прийому даних дистанційного зондування Землі з космосу.

Література

1. Вульвет Дж. Датчики в цифровых системах [Текст] / Дж. Вульвет; Пер. с англ. под ред. А.С. Яроменка. М.: Энергоатомиздат, 1981.– 200 с., ил.
2. М. Паламар, Оптико-електронний датчик кута для систем наведення великогабаритних антенних систем на космічні апарати [Текст] / М. Паламар А. Чайковський // Матеріали сьомої науково-технічної конференції “Приладобудування 2008: стан і перспективи”. – Київ:, 22-23 квітня 2008. – С.84-85.
3. Hiltgen A. P. Single-track Gray codes [Text] / A. P. Hiltgen, K. G. Paterson, M. Brandestini// IEEE Transactions on information theory Vol. 42 Issue: 5 pp. 1555-1561 Sep 1996.
4. Etzion, T. K. Near Optimal Single-Track Gray Codes [Text] / T. K. Etzion, K. G. Paterson // IEEE Transactions on information theory, VOL. 42 NO.3, May 1996.
5. Imaging optical encoder [Text]: WIPO ptent WO2006/107363 A1 IPC G01D5/26 G01D 5/36 / Hollander, S.; appl. 17.01.2006 publication 12.10.2006.
6. Position encoder using statistically biased pseudorandom sequence [Text]: WIPO patent WO02/01160 IPC7 G01D 5/347 H03M 1/24 / Boyton, Desmond, Bruce; applicant Bishop Innovation Limited; appl. 22.06.2006, publ. 3.01.2002.
7. Absolute position measuring system [Text]: German patent DE4436784 IPC6: G01B11/00 / Vogt, P; applicant Carl Zeiss; appl. 14.10.1994 publ. 27.04.1995.
8. A2 Absolute Optical Encoder [Electronic resource] / US Digital – Mode of access: <http://www.usdigital.com/products/encoders/absolute/rotary/shaft/a2/> – Last access: 4.12.2008 – Title from the screen.

Одержано 05.11.2008 р.