

УДК 004.896

**М.І. Козленко**, канд. техн. наук

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна

**АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ ТА СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ ДАТЧИКА НАХИЛУ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА****Н.И. Козленко**, канд. техн. наук

Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника, г. Ивано-Франковск, Украина

**АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА ДАТЧИКА НАКЛОНА АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА****M.I. Kozlenko**, PhD in Technical Sciences

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

**THE ANALYSIS OF SPECTRAL AND STATISTICAL CHARACTERISTICS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT TILT SENSOR SIGNAL**

*Наведено результати експериментальних досліджень спектральних та статистичних характеристик сигналу датчика нахилу автономного мобільного робота. Встановлено, що спектральна щільність сигналу є суттєво нерівномірною, а імовірнісний розподіл відрізняється від нормального. Виділено напрями подальших досліджень щодо створення методів та засобів опрацювання сигналів.*

**Ключові слова:** датчик нахилу, автономний мобільний робот, спектр, статистична характеристика.

*Приведены результаты экспериментальных исследований спектральных и статистических характеристик сигнала датчика наклона автономного мобильного робота. Установлено, что спектральная плотность сигнала существенно неравномерна, а вероятностное распределение отличается от нормального. Выделены направления дальнейших исследований для создания методов и средств обработки сигналов.*

**Ключевые слова:** датчик наклона, автономный мобильный робот, спектр, статистическая характеристика.

*The results of experimental research of spectral and statistical characteristics of autonomous mobile robot tilt sensor have been presented. It has been shown that power spectrum density of the signal can not be approximated by white noise. Probability distribution of the signal values is non normal. The areas for further research and creating of signal processing methods and facilities have been identified.*

**Key words:** tilt sensor, autonomous mobile robot, spectral density, statistical characteristic.

**Вступ.** Сфера застосування автономних мобільних роботів нині є такою, що швидко розширюється. Розвиток технологій на основі штучного інтелекту дозволяє вирішувати все більш складні задачі в автономному режимі у складних умовах. Надзвичайно важливим питанням під час функціонування робота є визначення його координат та орієнтації в просторі. Отже, проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення процедур визначення положення та орієнтації автономних мобільних роботів у просторі, є актуальним.

**Постановка проблеми в загальному.** Наявність інформації про кут нахилу дозволяє компенсувати гравітаційний вплив на поведінку робота. Необхідність у простих та надійних засобах визначення положення та орієнтації зумовлює практичне завдання по створенню методів та засобів опрацювання сигналів датчиків. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови всебічного дослідження характеристик сигналів, що надходять від датчиків.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Використання лінійних акселерометрів для визначення кута нахилу описано, зокрема, в [1]. Використання акселерометрів для визначення орієнтації та руху портативних пристроїв міститься у [2]. Застосування лінійних акселерометрів для визначення положення автомобіля описано у [3]. Про необхідність фільтрації сигналів акселерометра можна ознайомитись у [4]. Основні прикладні моменти визначення кута нахилу містяться в багатьох публікаціях, зокрема, в [5]. Робота з акселерометрами фірми STMicroelectronics описана у [6].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Раніше не вирішеною частиною загальної проблеми є отримання та аналіз спектральних та статистичних характеристик сигналів, що надходять під час функціонування автономних мобільних роботів з датчиків нахилу, в ролі яких використано лінійні акселерометри, саме цьому і присвячена ця робота.

**Формулювання цілей роботи.** Отже, об'єктом дослідження є автономні мобільні роботи. Предметом дослідження є сигнали датчика нахилу, встановленого на роботі. Метою роботи є отримання та аналіз спектральних та статистичних характеристик цих сигналів.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Вихідні дані для цього дослідження було отримано експериментальним шляхом під час фіналу Відкритого міжнародного чемпіонату з робототехніки “Роборейс-2013” [7], що відбувся в м. Києві у червні 2013 р. Повнопривідний чотирьохколісний автономний інтелектуальний робот було обладнано розробленим раніше модулем інерціальної навігації [8], що містив лінійний трьохосьовий акселерометр, трьохосьовий датчик кутової швидкості та магнітометр. У цій версії модуля було використано лінійний акселерометр типу LIS344ALH фірми STMicroelectronics з аналоговим вихідним сигналом. Сигнал, що відповідає куту нахилу робота за напрямом його руху, знімався з відповідного виходу лінійного акселерометра. Сигнал для досліджень багатократно фіксувався за допомогою 16-розрядного АЦП з частотою  $f_s = 48$  кГц (інтервал дискретизації  $T_s = 2,08(3) \cdot 10^{-5}$  с) та спеціально розробленого апаратного і програмного забезпечення для збереження отриманих даних у файлах на комп'ютері.

Приклад часової форми фрагмента сигналу подано на рис. 1.

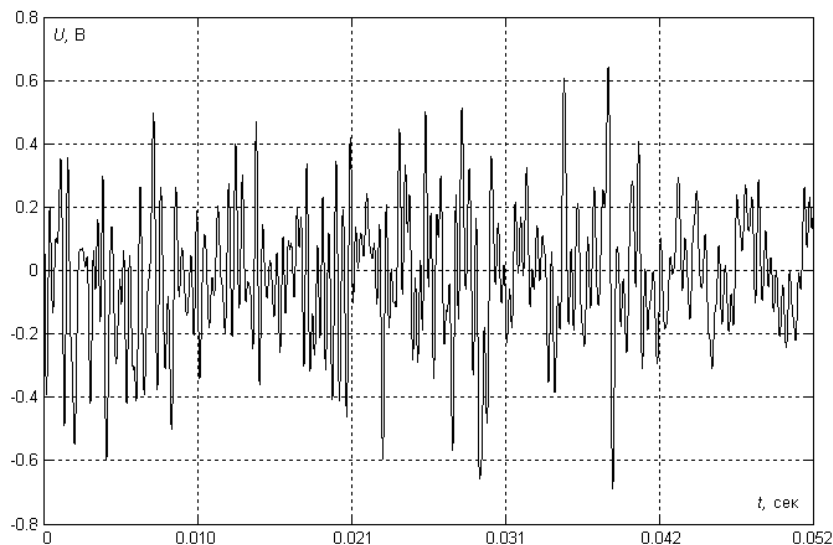


Рис. 1. Приклад часової форми фрагмента сигналу

Дослідження часових, частотних та статистичних характеристик сигналів проведено за допомогою спеціально розробленого раніше [9] у середовище MATLAB програмного забезпечення.

Для імпорту досліджуваних сигналів у середовище та перетворення їх у вектори було використано вбудований інтерфейс `uiimport`, який дозволяє працювати з широким спектром файлів, зокрема `.wav` та `.txt` форматів.

Автокореляційна функція цього фрагмента обчислена за допомогою такої процедури:

```
V=A;  
for j=1:1:length(A)  
    ac(j)=0;  
    if(j~=1) shift  
    end  
    for i=1:1:length(A)  
        ac(j)=ac(j)+A(i)*B(i);  
    end  
end  
end
```

Процедура `shift`, що реалізує зміщення масиву на один відлік:

```
C=B;
for i=1:1:length(B)-1
    C(i+1)=B(i);
end
C(1)=0;
B=C;
```

Візуалізація автокореляційної функції:

```
plot(ac)
grid on
```

Графік автокореляційної функції розглянутого фрагмента сигналу представлено на рис. 2. Як можна побачити, автокореляційна функція загасає швидко, що свідчить про наявність суттєвого впливу високочастотної випадкової складової в досліджуваному сигналі. Обчислена експонента Херста для дискретизованого часового ряду становить 0,0507, що свідчить про антиперсистентність ряду.

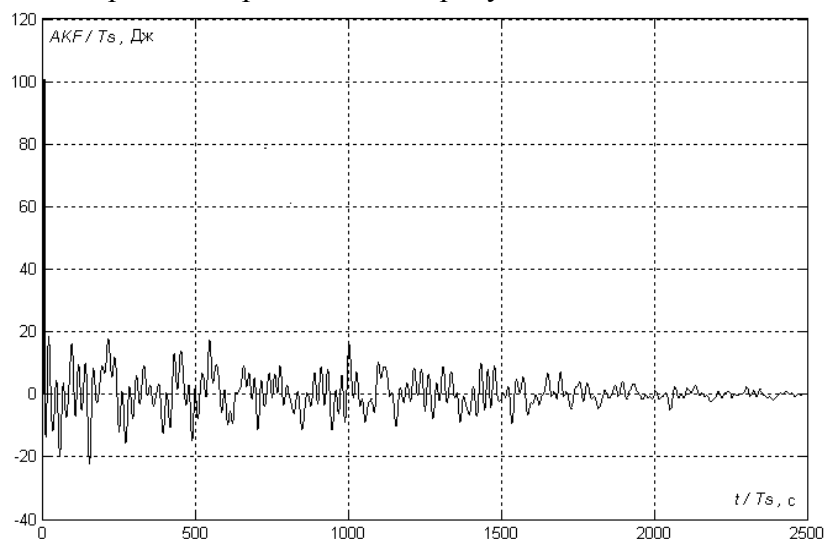


Рис. 2. Автокореляційна функція фрагмента сигналу

Частотний спектральний аналіз сигналів проведено у відповідності до перетворення Фур'є (1) завдяки розрахунку дискретного перетворення за формулою (2) з подальшим обчисленням спектральної щільності енергії.

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (1)$$

де  $S_x(f)$  – комплексна спектральна щільність амплітуд, В/Гц;

$x(t)$  – досліджуваний сигнал;

$f$  – частота, Гц;

$t$  – час, с.

$$S_x(k \cdot F) = T_s \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n \cdot T_s) \exp(-j2\pi nk/N), \quad (2)$$

де  $S_x(k \cdot F)$  – дискретизована щільність амплітуд сигналу, В/Гц;

$x(n \cdot T_s)$  – дискретизований досліджуваний сигнал, В;

$N$  – кількість відліків сигналу;

$T_s$  – інтервал дискретизації в часі,  $T_s = 1/f_s$ , с;

$f_s$  – частота дискретизації, Гц;

$k$  – частотний індекс,  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ;

$n$  – часовий індекс,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

Інтервал дискретизації за частотою становить величину  $F = 1/NT_s$  Гц, або  $\Omega = 2\pi/NT_s$  рад/с. Спектральна щільність енергії  $\Psi_x(f) = |S_x(f)|^2$  визначається в дискретизованому вигляді на частотах  $kF$  як  $\Psi_x(kF) = |S_x(kF)|^2$ , а значення повної енергії

$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_x(f) df$  сигналу можна отримати через дискретні значення як

$$E_x = \frac{1}{N \cdot T_s} \sum_{k=0}^{N-1} |S_x(kF)|^2.$$

Для обчислення перетворення Фур'є було використано вбудовану функцію `fft(A)`, яка реалізує дискретне перетворення вектора (масиву)  $A$ . Результатом її роботи є спектральна щільність амплітуд, у вигляді вектора комплексних чисел. Для зміщення елемента, що відповідає нульовій частоті, в центр масиву використано вбудовану функцію `fftshift(A)`.

Для визначення спектральної щільності енергії та повної енергії сигналу розроблено процедуру `esd(A)`, що організована у вигляді `m`-файла і має такий вигляд:

```
A=filename.data; % для WAV-файлу filename – назва файла
Fsam=filename.fs
T=1/Fsam
N=length(A);
F=1/(N*T)
A=(abs(T*fft(A))).^2;
A(N/2+2:N)=[ ];
A=A.*2;
Energy=sum(A)*F
```

Візуалізація отриманих результатів здійснюється за допомогою вбудованих засобів. Для автоматичного відображення графіків спектральної щільності енергії з бажаними параметрами використовується така процедура:

```
B=1:1:N/2+1;
V=B-1;
V=B.*F;
plot(B,A,'k-')
grid on
```

Отримана одностороння спектральна щільність енергії розглянутого фрагмента сигналу представлена на рис. 3.

Як можна побачити з рис. 3, спектральна щільність енергії є суттєво нерівномірною у широкій смузі частот і має яскраво виражені максимуми на певних частотах, що може бути пояснено механічним впливом двигунів робота, що створюють вібрацію, властивостями поверхні, якою рухався робот (тротуарна бруківка зі стиками), наводками від силових ланцюжків, шумом тракту передачі сигналу та іншими факторами. Корисна інформація міститься у низькочастотній області представленого сигналу. В умовах експерименту частота зміни нахилу становила менше 1 Гц (за даними виробника датчика він здатен працювати у смузі до 140 Гц). У той же час можна побачити, що сигнал, що надходить від датчика до пристрою оброблення, має значно ширший спектр. Тому,

очевидно, що сигнал перед використанням слід фільтрувати. Також слід враховувати, що шумова (завадна) компонента сигналу не може бути апроксимована білим шумом, що слід брати до уваги при визначенні характеристик та параметрів фільтра.

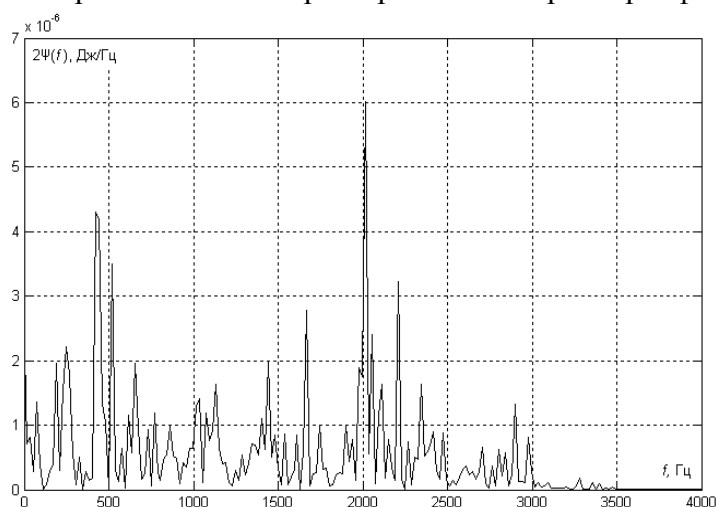


Рис. 3. Однобічна спектральна щільність енергії фрагмента сигналу

Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу показана на рис. 4. Як можна побачити, характер розподілу суттєво відрізняється від нормального. Було проведено тестування вибірки з 333 056 семплів на нормальність за допомогою тестів Жарка-Бера (тестова статистика  $7,7202 \cdot 10^5$ ), Колмогорова-Смирнова (статистика 0,3835) та Ліллієфорса (статистика 0,1052) при широкочисланому значенні рівня значущості 5 %. Усі тести показали, що можна відкинути гіпотезу про нормальність розподілу. Таким чином, слід вважати недоцільним застосування широкочисланого в системах інерціальної навігації фільтра Калмана для опрацювання сигналу, оскільки розподіл шуму відрізняється від нормального.

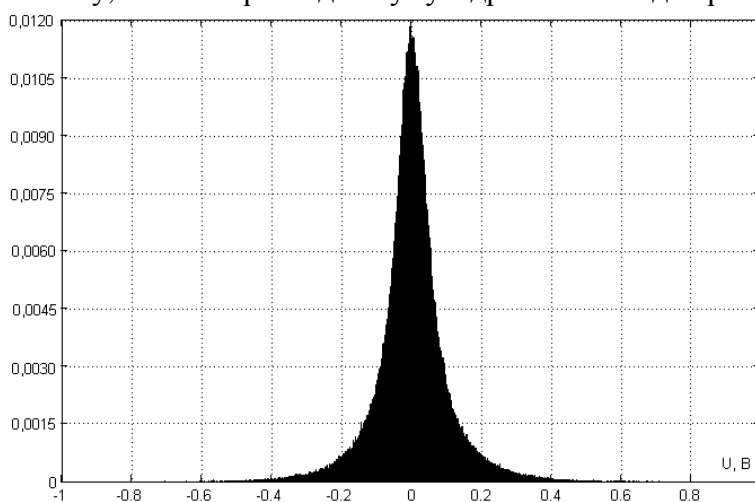


Рис. 4. Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу

**Висновки.** Встановлено, що сигнал, який надходить від датчика нахилу мобільного робота, є суттєво антиперсистентним. Спектральна щільність енергії шумової компоненти сигналу є суттєво нерівномірною і не може бути представлена у вигляді білого шуму. Ймовірнісний розподіл шуму відрізняється від нормального. Оптимальне опрацювання таких сигналів потребує розроблення спеціалізованих засобів.

**Перспективи подальших досліджень.** Основними напрямками подальшого дослідження є створення методів та засобів оптимального опрацювання сигналів датчиків. Зокрема, вважаємо перспективним створення спеціалізованих фільтрів на базі сучасних програмованих систем на кристали.

**Список використаних джерел**

1. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра / С. Бузыкканов // Современная электроника. – 2004. – № 2. – С. 42-45.
2. Jiayang Liu. uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications / Jiayang Liu, Lin Zhong, Jehan Wickramasuriya Venu Vasudevan // Pervasive and Mobile Computing. – Vol. 5. – Issue 6. – December, 2009. – P. 657-675.
3. Клец Д. М. Применение акселерометров в качестве элементов контрольно-измерительной системы автомобиля / Д. М. Клец // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 9 (180), ч. 1.
4. Пестов Е. Распознавание движения мобильного устройства / Е. Пестов // International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – № 1(3). – С. 5-10.
5. Mark Pedley. Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Document Number: AN3461 Rev. 6, 03/2013 [Electronic resource]. – Access mode : [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3461.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf).
6. Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer. Application note AN3182. Doc ID 17289 Rev 1. [Electronic resource]. – Access mode : [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00268887.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00268887.pdf).
7. Roborace [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.roboration.te.ua>.
8. Козленко М. І. Мікромодуль інерціальної навігаційної системи для діючої моделі автономного транспортного засобу / М. І. Козленко // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування 2013: стан і перспективи” (23-24 квітня 2013 р., м. Київ). – К. : НТУУ “КПІ” ВПІ ВПК “Політехніка”, 2013. – С. 26-27.
9. Козленко М. І. Ефективність використання частотної смуги при формуванні ширококутових сигналів в розподілених комп’ютерних та телекомунікаційних системах / М. І. Козленко // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – № 1 (011). – С. 115-120.