

**BULLETIN 1' 2007  
ENGINEERING  
ACADEMY  
OF UKRAINE**



**1' 2007**

**ВІСНИК**

**ІНЖЕНЕРНОЇ  
АКАДЕМІЇ  
УКРАЇНИ**

**Зміст**

<i>Памяти Первого Президента Инженерной академии Украины Анатолия Николаевича Подгорного</i>	8
<b>Авіаційна й космічна техніка</b>	
<b>Князев М.К.</b> ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ	11
<b>Інформаційні системи, обчислювальна та електронна техніка, системи зв'язку та приладобудування</b>	
<b>Безвесільна О.М., Киричук Ю.В.</b> АНАЛІЗ ПОХИБОК НОВОГО ДИНАМІЧНО-НАСТРОЮВАНОВОГО ГРАВІМЕТРА ПРИ ОКРЕМІЙ ДІЇ ЛІНІЙНИХ ТА КУТОВИХ ПРИСКОРЕНЬ ОСНОВИ	21
<b>Борковський О.В.</b> СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ДЕТАЛЕЙ В ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ	26
<b>Голуб С.В.</b> ПРИНЦИП ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	28
<b>Древецький В.В.</b> ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКІСТНО - ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ НАФТОПРОДУКТІВ	35
<b>Кучерук В.Ю., Кулаков П.І., Войтович О.П.</b> ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРУ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ	39
<b>Омельченко А.В., Сидоренко Г.С., Мірошніченко О.М., Жиромський В.М.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ГРАДІЄНТА ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ВАГИ	44
<b>Ориатский Д.П., Борковская Л.О., Нимченко Т.В.</b> АНАЛОГОВЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ВИБРОСИГНАЛОВ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ	50
<b>Матеріалознавство</b>	
<b>Дзядикевич Ю.В., Буряк М.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЖАРОСТІЙКОСТІ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ ТА ДИСИЛЦИДУ МОЛІБДЕНУ	53
<b>Черновол М.І., Аулін В.В., Барановський Д.М.</b> ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ "КОНТАКТНА ПІДВІСКА – СТРУМОПРИЙМАЧ" ЗМЕНШЕННЯМ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	59

УДК 621.313

В.Ю. Кучерук, д. т. н.  
П.І. Кулаков, к. т. н.  
О.П. Войтович, к. т. н.

## ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРУ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: kucheruk@mail.ru, o\_voytovych@mail.ru

*Запропоновано використання сенсорів кутової швидкості з адаптивною зміною роздільної здатності. Визначено залежності оптимальної розрізняювальної здатності частотного перетворювача та оптимальні параметри диференціювання аналого-цифрового перетворення вихідного сигналу тахометричних перетворювачів для нормування похибок вимірювання.*

### Постановка проблеми

Вимірювання кутової швидкості є досить важливим для визначення характеристик електромоторів. Зокрема, залежність кутової швидкості в часі є вихідною для опосередкованих вимірювань кутового прискорення, моменту інерції ротора, динамічного моменту. Тому актуальною є проблема вибору необхідного засобу вимірювань для вирішення конкретної вимірювальної задачі.

На загальну похибку вимірювання в статичному та динамічному режимах впливають похибки квантування та первинного перетворення. Похибка первинного перетворення «кут повороту-напруга» залежить від кутової швидкості валу об'єкту вимірювання та обумовлена частотними властивостями фотоприймача, виникає внаслідок спаду його частотної характеристики в області верхніх частот.

### Аналіз останніх досліджень

Вимірювання кутової швидкості в сучасній техніці здійснюється за допомогою сенсорів, основаних на тахометричних перетворювачах з нормованими метрологічними характеристиками [1,2]. Застосування сенсорів, що здатні змінювати свої характеристики, в залежності від об'єкту вимірювання є необхідною умовою розвитку інтелектуальних засобів вимірювань. Тому таке важливе отримання сенсорів кутової швидкості з нормованими метрологічними характеристиками, зокрема з нормованою похибкою вимірювання, що дозволяє значно розширити діапазон вимірювання [3].

### Цілі дослідження

Відповідно до цього метою статті є дослідження похибки диференціювання вихідного сигналу тахоперетворювача, аналогово-цифрового перетворення, для визначення діапазону вимірювання, в якому можливе нормування похибки вимірювання кутової швидкості.

### Виклад основного матеріалу

*Характеристика сенсору кутової швидкості.* Було розроблено сенсор кутової швидкості [2, 3], оснований на фотоелектричних тахометричних перетворювачах (ТП) з вихідним аналоговим сигналом, на виході якого отримується пилкоподібна вихідна напруга, що змінюється за формулою:

$$\omega_r(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{kdU}{dt}, \quad (1)$$

де  $\omega_r$  - кутова швидкість обертання;  $\varphi$  - кут повороту;  $t$  - час;  $k$  - коефіцієнт пропорційності;  $U$  - вихідна напруга тахометричного перетворювача.

Особливістю цього сенсору є можливість вимірювання кутової швидкості в широкому діапазоні, з нормованою похибкою.

В [4], показано, що регулювати похибку можна за допомогою зміни часу  $t_x$ . Цього можна досягти змінюючи кількість інформативних входів мікропроцесора  $z$ , тобто зчитування інформації проводиться лише з тих входів мікропроцесора, які задаються програмно.

*Аналіз похибки вимірювання кутової швидкості шляхом диференціювання вихідного сигналу та її мінімізація.*

Для визначення кутової швидкості необхідно диференціювати вихідний сигнал тахоперетворювача. В загальному випадку результуюча похибка дискретного вимірювання кутової швидкості має такі складові: методична похибка; похибка інтерполяції; похибка, що обумовлена похибкою одного відліку АЦП; похибка, що обумовлена випадковими завадами та неточністю виконання модулятора та діафрагми [5]:

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\sigma_{\omega M}^2 + \sigma_{\omega D}^2 + \sigma_{\omega U}^2}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{\omega M} = \frac{T_B}{2} |\varepsilon_{MAX}|$  – середньоквадратичне значення методичної похибки дискретного вимірювання кутової швидкості;

$\sigma_{\omega D} = \frac{2\pi}{\sqrt{6} 2^n T_B}$  – середньоквадратичне значення похибки вимірювання кутової швидкості, що

виникає внаслідок наявності похибки квантування вихідного сигналу первинного тахоперетворювача;

$\sigma_{\omega U} = \sqrt{2} \sigma_U / T_B$  – середньоквадратичне значення похибки вимірювання кутової швидкості, обумовленої випадковими завадами та неточністю виконання модулятора та діафрагми;

$T_B$  – час між відліками вихідного сигналу тахоперетворювача;

$\varepsilon_{MAX}$  – максимальне значення другої похідної вихідного сигналу тахоперетворювача на інтервалі диференціювання, виражене у одиницях кутового прискорення, обумовлене не тільки режимом роботи, а і імпульсними завадами у вихідному сигналі.

Отже, загальне значення СКВ похибки вимірювання кутової швидкості

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\sigma_{\omega M}^2 + \sigma_{\omega D}^2 + \sigma_{\omega U}^2} = \sqrt{\left(\frac{T_B}{2} |\varepsilon_{MAX}|\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\sqrt{6} 2^n T_B}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_U}{T_B}\right)^2}. \quad (3)$$

Графік відносного середньоквадратичного значення похибки вимірювання кутової швидкості  $\varepsilon_{\omega} = \sigma_{\omega} / \omega$  при різних значеннях  $T_B$ , без урахування складової, що обумовлена неточністю виконання прорізів модулятора та діафрагми, при  $\varepsilon_{MAX} = 1000 \text{ рад/с}^2$ ,  $n=12$  наведено на рис. 1.

Функція (3) має мінімум за аргументом  $T_B$ , при якому результуюча середньоквадратична похибка вимірювання кутової швидкості мінімальна

$$T_{B \text{ OPT}} = \frac{\sqrt[4]{8\sigma_U^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{2\pi}{2^n}\right)^2}}{\sqrt{|\varepsilon_{MAX}|}}. \quad (4)$$

У випадку, коли похибкою, що обумовлена завадами та неточністю виконання модулятора та діафрагми можна знехтувати, вираз (4) приймає вигляд

$$T_{B \text{ OPT}} = \frac{1}{\sqrt[4]{3 \cdot 2^{2n-3}}} \sqrt{\frac{\pi}{|\varepsilon_{MAX}|}}. \quad (5)$$

Залежність  $T_{B \text{ OPT}}$  від значення максимального кутового прискорення об'єкта контролю при різних розрядності АЦП наведено на рис. 2.

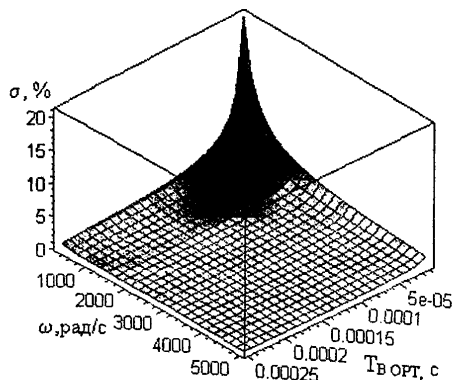


Рис. 1. Відносна середньоквадратична похибка вимірювання кутової швидкості

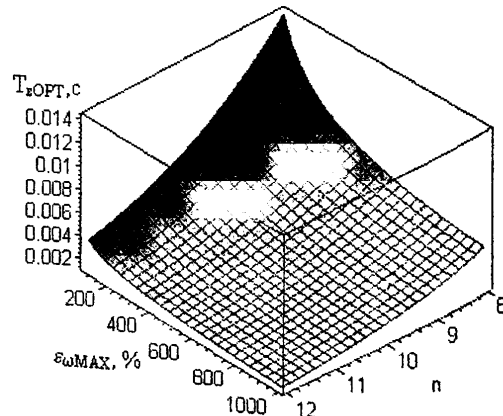


Рис. 2. Оптимальний час диференціювання при різних розрядності АЦП

Мінімальна відносна середньоквадратична похибка вимірювання кутової швидкості при відсутності випадкових завад визначається виразом:

$$\varepsilon_{\omega \text{ MIN}} = \frac{\sigma_{\omega}(T_{B \text{ OPT}})}{\omega} = \frac{1}{\omega \sqrt[4]{6}} \sqrt{\frac{\pi |\varepsilon_{\text{MAX}}|}{2^{n-1}}}. \quad (6)$$

Залежність цієї похибки від кутової швидкості при різній розрядності АЦП при  $|\varepsilon_{\text{MAX}}| = 1000 \text{ рад/с}^2$  наведено на рис. 3, в діапазоні кутових швидкостей, в якому період дискретизації як мінімум у два рази менше за період вихідного сигналу тахоперетворювача.

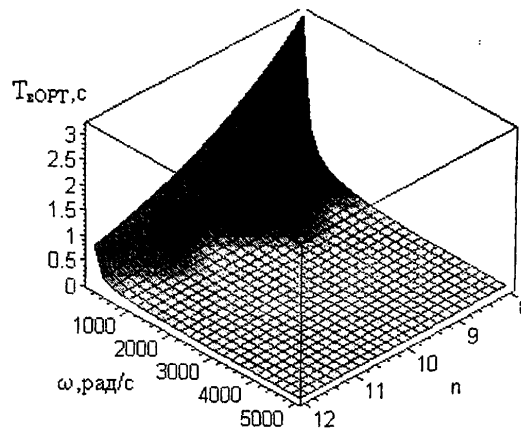


Рис. 3. Мінімальна відносна похибка вимірювання кутової швидкості

З аналізу рис. 3 випливає, що в області низьких кутових швидкостей відносна середньоквадратична похибка вимірювання значно збільшується, що в першу чергу обумовлено похибкою квантування вихідного сигналу.

Використання цифрового диференціювання вихідного сигналу тахоперетворювача для вимірювання кутової швидкості недоцільне внаслідок швидкого зростання відносної похибки вимірювання при низьких кутових швидкостях. У цьому випадку використовують тахометри з частотними тахоперетворювачами. При роботі цифрових тахометрів визначається відношення

$$\omega_c = \varphi_0 / t_B, \quad (7)$$

де  $\varphi_0, t_B$  – відповідно кут та час повороту тахоперетворювача;

$\omega_c$  – середнє за час  $t_B$  значення кутової швидкості.

В залежності від того, який з вищевказаних параметрів вимірюється, можливі два алгоритми роботи тахометра: визначення кута повороту за фіксований інтервал часу; визначення часу повороту на фіксований кут. Тахометри з цифровими фотоелектричними тахоперетворювачем, що працюють за першим алгоритмом, призначені для статичних вимірювань. В другому випадку здійснюється вимірювання часу повороту на фіксований кут, тобто вимірюється період сигналу шляхом заповнення його імпульсами зразкового генератора. Середня за час між двома вихідними імпульсами кутова швидкість визначається як

$$\omega_c = \frac{2\pi f_0}{z_M N}, \quad (8)$$

де  $\omega(t), \varepsilon(t)$  – відповідно кутова швидкість та прискорення в час  $t$ ;

$f_0$  – частота опорного генератора;

$N$  – число імпульсів зразкового генератора, підраховане лічильником.

Для кожного значення кутової швидкості, що вимірюється, при роботі тахометра в режимі вимірювання періоду є таке число штрихів модулятора, при якому результуюча середньоквадратична похибка вимірювання мінімальна [107]. З вищесказаного випливає, що змінюючи роздільну здатність по куту повороту, можна мінімізувати похибку вимірювання для

кожного значення кутової швидкості. Отже, перетворювач вихідного сигналу тахоперетворювача з низькочастотним вихідним сигналом дозволяє змінювати похибку у широкому діапазоні.

Загальна похибка вимірювання

$$\delta_{\omega} = \sqrt{\delta_N^2 + \delta_D^2 + \delta_I^2}. \quad (9)$$

де  $\delta_N = \frac{1}{\sqrt{6N}} = \frac{k_I \omega_C^2}{2\sqrt{6}\pi f_0}$  – дискретна похибка лічильника імпульсів;

$\delta_D = \frac{\pi|\epsilon_{\text{MAX}}|}{\omega_C k_I}$  – динамічна похибка цифрового тахометра;

$\delta_I = \frac{\Delta\varphi_0 k_I}{2\pi}$  – похибка формування вихідних імпульсів частотного перетворювача;

$k_I$  – кількість імпульсів, які формуються за час повороту вала на кут  $2\pi$ .

Тоді загальна похибка вимірювання кутової швидкості

$$\delta_{\omega} = \sqrt{\delta_N^2 + \delta_D^2 + \delta_I^2} = \frac{\sqrt{\omega_C^6 k_I^4 + 6f_0^2 \varphi_0^2 \omega_C^4 k_I^4 + 24\pi^4 \epsilon_{\text{MAX}}^2 f_0^2}}{2\sqrt{6}\pi f_0 \omega_C k_I}. \quad (10)$$

Функція (10) має мінімум по аргументу  $k_I$ , який визначає оптимальну кількість імпульсів на оберт, при якій результуюча абсолютна середньоквадратична похибка мінімальна. Відповідна роздільна здатність частотного перетворювача

$$\varphi_{0 \text{ opt}} = \frac{2\pi}{k_{I \text{ opt}}} = \frac{2\pi \cdot \omega_C^4 \sqrt{\omega_C^2 + 6\Delta\varphi_0^2 f_0^2}}{\pi^4 \sqrt{6} \sqrt{2\epsilon_{\text{MAX}} f_0}}. \quad (11)$$

Підставивши (11) в (10) отримуємо вираз для мінімальної відносної похибки вимірювання в залежності від кутової швидкості

$$\delta_{\omega \text{ MIN}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{MAX}}^4 \sqrt{\omega_C^2 + 6\Delta\varphi_0^2 f_0^2}}}{\sqrt[4]{6} \sqrt{f_0}}. \quad (12)$$

Оптимальна відносна похибка вимірювання кутової швидкості при  $k_{I \text{ opt}}$

$$\epsilon_{\omega \text{ MIN}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{MAX}}^4 \sqrt{\omega_C^2 + 6\Delta\varphi_0^2 f_0^2}}}{\omega_C^4 \sqrt[4]{6} \sqrt{f_0}} = \frac{\delta_{\omega \text{ F MIN}}}{\omega_C}. \quad (13)$$

Відносна похибка при використанні цифрового фотоелектричного тахоперетворювача з постійним значенням штрихів модулятора  $z$

$$\epsilon_{\omega} = \frac{\sqrt{\omega_C^6 z_M^4 + 6f_0^2 \Delta\varphi_0^2 \omega_C^4 z_M^4 + 24\pi^4 \epsilon_{\text{MAX}}^2 f_0^2}}{2\sqrt{6}\pi f_0 \omega_C^2 z_M} = \frac{\delta_{\omega \text{ F}}}{\omega_C}. \quad (14)$$

Графіки залежностей похибки  $\epsilon_{\omega \text{ F MIN}}$  при оптимальній роздільній здатності та  $\epsilon_{\omega \text{ F}}$  при фіксованому значенні  $z_M=1024$  фотоелектричного тахоперетворювача наведено на рис. 4. Залежності наведені при  $f_0=20$  МГц,  $\Delta\varphi_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  рад та  $\Delta\varphi_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{\text{MAX}} = 1000$  рад/с<sup>2</sup>.

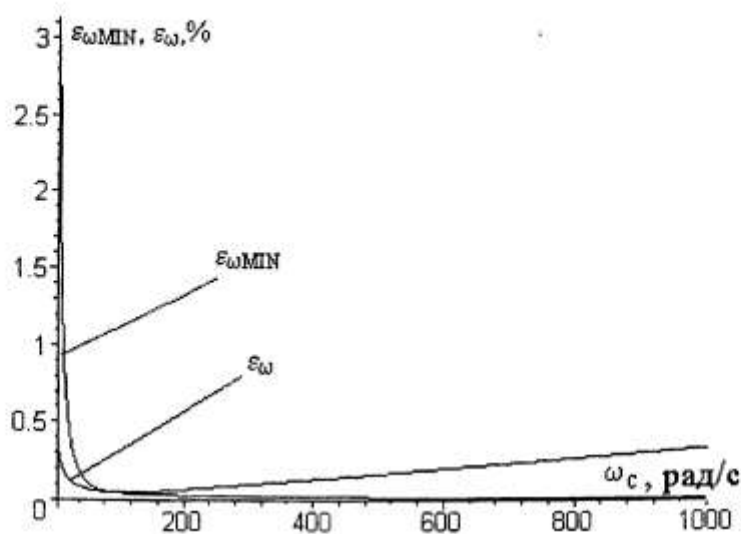


Рис. 4. Залежності відносних похибок вимірювання кутової швидкості при  $k_{l\text{opt}}$  та при  $z_M$

Як випливає з аналізу залежностей на рис. 4 відносна похибка вимірювання кутової швидкості при фіксованій роздільній здатності значно перевищує похибку при адаптивній роздільній здатності майже на всьому діапазоні кутових швидкостей, що досліджується. Наявність ділянки, на якій  $\varepsilon_{\omega F\text{MIN}} < \varepsilon_{\omega F}$  обумовлена тим, що похибка вимірювання кутової швидкості у цьому діапазоні наближається до оптимальної. Слід зазначити, що при збільшенні  $\varphi_{0\text{opt}}$  збільшується часовий проміжок між двома сусідніми імпульсами, тобто збільшується інтервал усереднення, а роздільна здатність за кутом повороту зменшується.

#### Висновки

Розглянуті основні складові похибки зумовленої диференціювання вихідного сигналу тахоперетворювачу. Отримано аналітичні вирази для оптимального кроку цифрового диференціювання, що дає змогу значно зменшити похибку вимірювання середнього значення кутової швидкості та помилки її контролю. Для зменшення похибки вимірювання необхідно змінювати роздільну здатність частотного перетворювача у відповідності з кутовою швидкістю, яка вимірюється. В подальшому планується дослідити інші складові похибки, що виникають при вимірюванні кутової швидкості сенсором з адаптивною зміною роздільної здатності.

#### Список літературних джерел

1. Поджаренко, В. О. Сучасний стан та перспективи розвитку цифрових тахометрів : Матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції / В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков // Контроль і управління в технічних системах – 97. - Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1997. – с. 209 - 214.
2. Поджаренко, В. О. Пристрій для вимірювання і контролю кутової швидкості та кута повороту / В.О. Поджаренко, П. І. Кулаков, А.В. Поджаренко, С. А. Шаргородський, Є.В. Почверук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. - № 2. - с. 45 - 50.
3. Поджаренко, В. О. Цифровий тахометричний перетворювач із змінною розрізняльною здатністю / В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, А. В. Поджаренко // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1998. - № 53. - с. 84-90.
4. Поджаренко, В. О. До питання вибору форми модулятора тахометричного перетворювача / В. О. Поджаренко, В. М. Міхалевич, П. І. Кулаков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. - № 1. - с. 12-18.
5. Кулаков, П. І. Математична модель фотоелектричного перетворювача площа-напряга на основі пари фотодіод-операційний підсилювач : Матеріали п'ятої міжнародної НТК / П. І. Кулаков // Контроль і управління у складних системах». –Вінниця. – 1999. –Том 2., С. 228 - 233.