

УДК 681.335.13

Абрамська І. Б., Єнікєєв О. Ф., Захаренков Д. Ю.

## АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ

Питанням побудови вимірювальних перетворювачів флуктуацій швидкості обертання надається достатня увага в технічній літературі. У роботі [1] наведено результати досліджень нерівномірності обертання колінчастого валу ДЕС 6NVD48UA. Розроблено вимірювальний перетворювач частотно-модульованого сигналу та методику розрахунку середнього ефективного тиску, потужності двигуна, коефіцієнту надлишку повітря та температури випускних газів. У роботі [2] запропоновано спосіб підвищення точності керування процесом подачі палива у циліндри на основі вимірювань амплітуди коливальних кутової швидкості обертання та зсувів за фазою їхніх екстремумів відносно верхньої мертвої точки відповідного циліндру. З метою зменшення впливу шумів на інформаційний сигнал нерівномірності обертання у роботі [3] запропоновано використати фільтр верхніх частот з кінцевою імпульсною характеристикою. Розроблено методику обробки сигналу нерівномірності обертання колінчастого валу із використанням можливостей програмного середовища Matlab. Недоліком відомих апаратних засобів для вимірювань параметрів частотно-модульованого сигналу швидкості обертання є незадовільні метрологічні характеристики.

Мета роботи – підвищення точності апаратних засобів для вимірювань параметрів частотно-модульованого сигналу.

Задачі досліджень: аналіз складових похибки первинного перетворювача (ПП) флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу; побудова апаратних засобів для вимірювань параметрів частотно-модульованого сигналу та аналіз їхніх метрологічних характеристик.

Розв'язування задачі. Глибина модуляції частотно-модульованого сигналу швидкості обертання колінчастого валу дизеля не перевищує 0,05 % [1, 3, 4]. Тому, процедура вимірювань сигналу флуктуацій достатньо складна та потребує розробки апаратних засобів, які мають малий інтервал невизначеності навколо номінальної характеристики перетворення. Побудову інформаційно-вимірювального пристрою (ІВП) почнемо з аналізу похибок ПП швидкості обертання колінчастого валу.

Похибку відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками визначемо на підставі подання сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу у вигляді обмеженого ряду Фур'є:

$$\Delta\omega(t) = \sum_{i=1}^{10} A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (1)$$

Виконаємо оцінювання втрат інформації при дискретизації аналогового сигналу (1). Дінамічну похибку дискретизації сигналу (1) визначемо за допомогою такого виразу [5]:

$$\Delta_{\text{дин}} = \int_0^T \Delta\omega(t) dt - T_0 \sum_{k=1}^z \Delta\omega(kT_0), \quad (2)$$

де  $z$  – кількість інтервалів дискретизації.

Після математичних перетворень отримали динамічну похибку дискретизації гармонійного сигналу в такому вигляді:

$$\Delta_{дин} = T_{np} \left[ \frac{1}{\pi} - \frac{1}{z} \sum_{k=0}^{0.5z-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{z}\right) \right], \quad (3)$$

де  $T_{np}$  – час виконання колінчастим валом одного оберту.

На підставі перетворень виразу (3) отримано відносну похибку дискретизації гармонійного сигналу:

$$\delta_{дин} = 1 - \frac{\pi}{z} \sum_{k=0}^{0.5z-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{z}\right). \quad (4)$$

Средню квадратичну похибку дискретизації сигналу (1) оцінюємо з урахуванням внесків гармонійних складових. При отриманні її оцінки використано наступний вираз:

$$\delta_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^{10} A_{2i-1}^2} \delta_{(2i-1)дин}^2}. \quad (5)$$

Результати розрахунків середньої квадратичної похибки дискретизації сигналу (1) подано на рис. 1. За допомогою графіку визначаємо мінімальну кількість інтервалів дискретизації сигналу флуктуацій при відомій похибці відновлення.

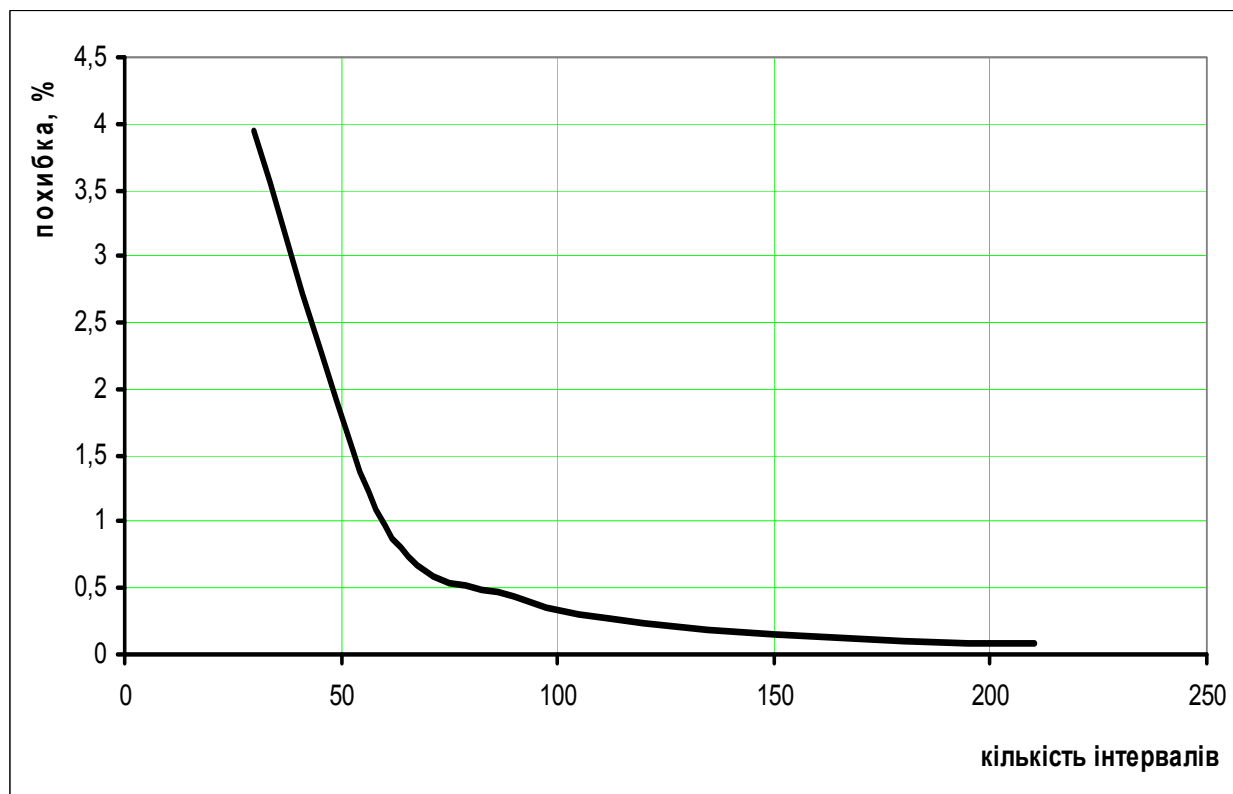


Рис. 1. Графік похибки дискретизації сигналу флуктуацій

Кінематичну похибку ПП визначено авторами на прикладі досліджень допусків на виготовлення зубчастих коліс різного класу точності [6] та подано в табл. 1. Для розрахунку кінематичної похибки застосовано наступний вираз:

$$\delta_2 = \frac{\Delta m}{m} 100\%, \quad (6)$$

де  $\Delta m$  – допуск на кінематичну похибку зубчастого колеса;

$m$  – модуль.

Таблиця 1

Чисельні дані кінематичної похибки

Клас точності зубчастого колеса	4	5	6	7	8
$\delta_2, \%$	0.80	1.25	2.00	2.75	4.00
Похибка вимірювань флуктуацій, %	16.0	25.0	40.0	55.0	80.0

Дані табл. 1 дозволяють зробити висновок: для побудови ІВП із відповідними метрологічними характеристиками необхідно розробити метод, який зменшить вплив кінематичної похибки на результат вимірювань флуктуацій частотно-модульованого сигналу. Паспортизація ПП є можливим шляхом вирішення цієї задачі. У результаті її виконання отримуємо поправки, які враховує комп'ютерна система (КС) при визначенні сигналу флуктуацій. До складу ІВП також входять апаратні засоби синхронізації із фазою обертання валу ПП.

Для компенсації кінематичної похибки автори пропонують метод багатоканальних вимірювань інтервалів часу, які формуються обраною рисою ПП та відповідають повному оберту його валу. При такому методі вимірювань миттєвої швидкості кінематична похибка не впливає на тривалість інтервалів часу, які формує ІВП у якості інформаційних сигналів. Однак, при цьому виникає динамічна похибка зрушень за часом дискретних відліків сигналів вимірювальної інформації, які є наслідком кінематичної. Виконаємо оцінювання динамічної похибки ПП швидкості обертання колінчастого валу. Її абсолютне значення знаходимо наступним чином [5]:

$$\Delta_{11} = \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta\omega(\Omega t + \Omega\sigma_1) - \Delta\omega(\Omega t)] dt, \quad (7)$$

де  $\sigma_1$  – середнє квадратичне відхилення часового зсуву дискретних відліків, яке встановлено на підставі допусків на виготовлення ПП [6].

Для гармонійного подання сигналу флуктуацій останній вираз після математичних перетворень набуває такого вигляду:

$$\Delta_{11,i} = \frac{2A_i}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_1) \sin(i\Omega\sigma_1) \quad (8)$$

Відносну похибку гармонійного подання сигналу флуктуацій отримано в такому вигляді:

$$\delta_i = \frac{2}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_1) \sin(i\Omega\sigma_1) \quad (9)$$

Динамічну похибку ПП визначаємо із урахуванням внесків гармонійних складових до сигналу флуктуацій наступним чином:

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_i \delta_i)^2}{\sum_{i=1}^{10} A_i^2}} \quad (10)$$

Результати розрахунків динамічної похибки ПП подано в табл. 2. Ефективність методу вимірювань сигналу флуктуацій швидкості обертання, який запропоновано авторами, встановлюється при порівнянні даних табл. 1 та 2.

Таблиця 2

Чисельні дані динамічної похибки

Клас точності первинного перетворювача	4	5	6	7	8
Похибка вимірювань флуктуацій, %	3.1	4.8	7.4	9.9	14.1

При використанні метода апаратної компенсації кінематичної похибки для побудови ІВП вихідний сигнал ПП за допомогою лічильника та дешифратора перетворюється на декілька імпульсних послідовностей. Положення імпульсів в них відповідає моментам проходження біля чутливого елемента обраної риски ПП. Тому сигнал вимірювальної інформації являє собою інтервал часу, який відповідає оберту валу ПП. Далі ці сигнали подаються на входи відповідних апаратних засобів для вимірювань інтервалів часу. У складі ІВП кількість каналів для вказаних вимірювань дорівнює кількості рисок ПП та визначається з урахуванням похибки відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками. Апаратну реалізацію каналів для вимірювань проведено на основі методу дискретизації за часом. Усунення взаємних накладань вихідних сигналів каналів при їхньому поєднанні схемою АБО у сигнал вимірювальної інформації для КС виконується за допомогою лічильників. Об'єм останніх та частота взірцевого генератора обираються таким чином, щоб переповнення лічильника виконувалося за час трохи менший, ніж середній період імпульсної послідовності. При цьому з вимірювальної інформації кожного каналу виключається калібрований за тривалістю проміжок часу, у продовж якого організовано обмін даними між ІВП та КС.

Розроблено пристрій для вимірювань сигналу флуктуацій (рис. 1), який описано в роботі [7]. На рисунку позначено: ДШ – дешифратор;  $N_x$  – вихідний код;  $\Gamma$  – взірцевий генератор; Л1, ..., Л4 – лічильники імпульсів; Т1, ..., Т3 – тригери; ТА1, ..., ТА4 – логічні схеми ТА; АБО1, АБО2 – логічні схеми АБО; N – кількість каналів для вимірювань сигналу флуктуацій; Ф – формувач імпульсів; З – лінія затримки. Пристрій для вимірювань має двохканальну структуру. Він вимірює тривалість імпульсів, які формує прямий та інверсний виходи блоку Т1. Сигнал вимірювальної інформації для КС формує схема АБО2. Лічильник Л3 перетворює його у двійковий код та подає шину даних паралельного інтерфейсу КС. Блок Ф формує сигнал запису двійкового коду до оперативної пам'яті КС та за допомогою блоку З переводить лічильник Л3 у нульовий стан.

З метою встановлення метрологічних характеристик ІВП виконано статистичну обробку дослідних даних. На рис. 2 подано гістограму розкиду вихідного коду. Обсяг вибірки склав 151 вимірювання вихідного сигналу ІВП. Основні статистичні параметри ряду вимірювань із багаторазовими спостереженнями наступні:

$$\bar{X} = 2.0 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma = 0.014248; \quad A = 0.0536; \quad E = -0.449.$$

Рівняння згладженої кривої розкиду вихідного коду ІВП має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при } x \in (-0.04, 0.04). \quad (11)$$

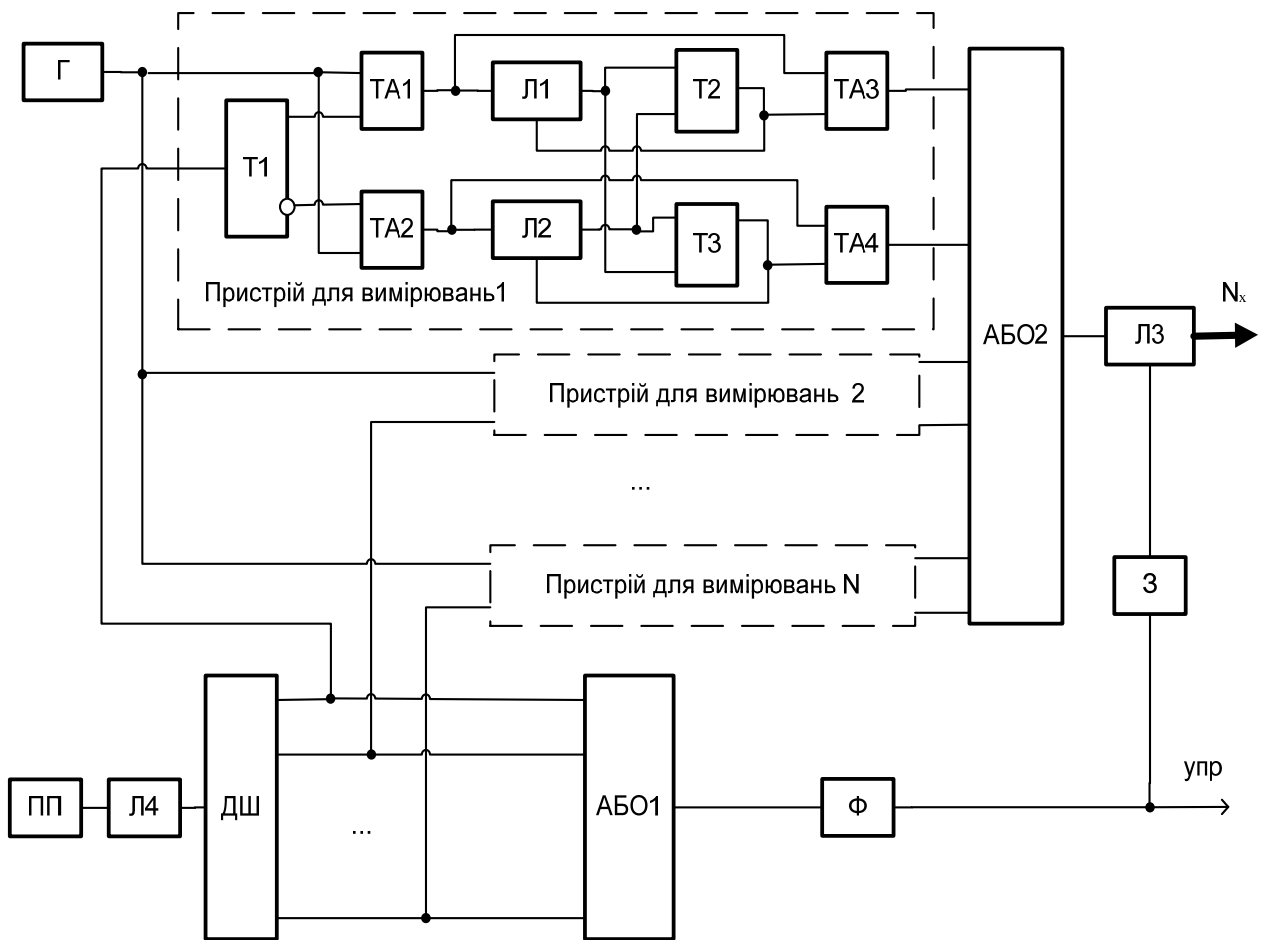


Рис. 1. Інформаційно-вимірювальний пристрій

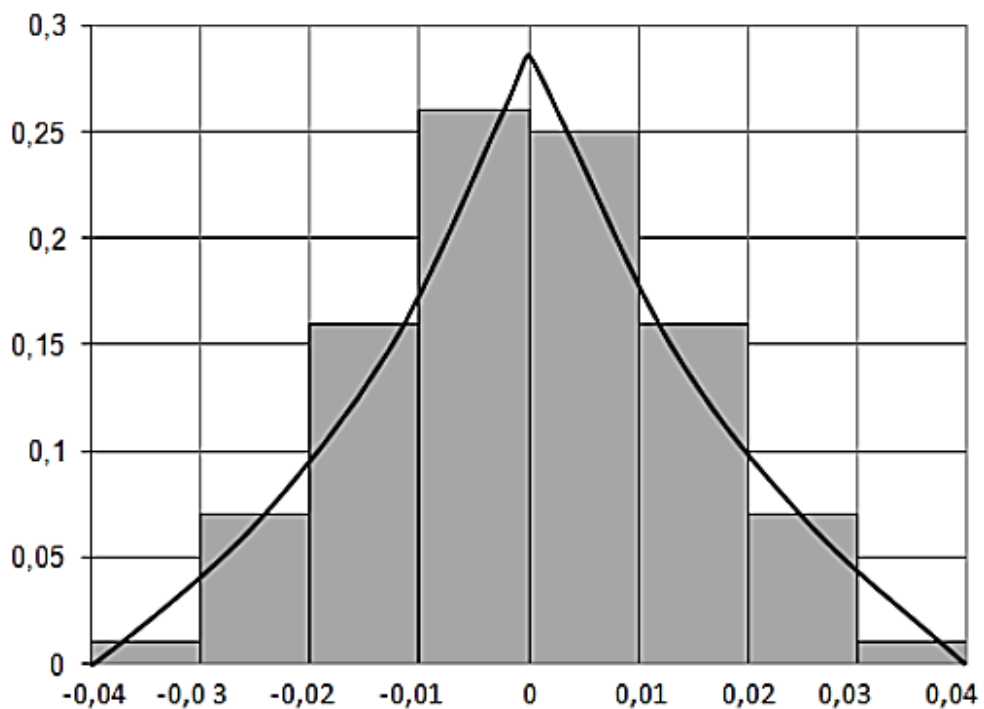


Рис. 2. Гистограма розкиду вихідного коду ІВП

Скористуємось інформаційним підходом для визначення похибки проведених вимірювань. Для обраного закону розподілу похибки маємо:

$$\ln f(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}. \quad (12)$$

Звідси ентропія похибки ІВП:

$$H\left(\frac{x}{x_n}\right) = \ln\left(2\sigma e \frac{\mu_1}{\sigma}\right). \quad (13)$$

Ентропійний інтервал невизначеності вихідного коду ІВП склав:

$$\Delta = \sigma e \frac{\mu_1}{\sigma} = 0.01465. \quad (14)$$

### ВИСНОВКИ

На основі частотного подання сигналу флуктуацій проведено теоретичний аналіз складових похибок первинного перетворювача швидкості обертання колінчастого валу. Запропоновано метод апаратної компенсації кінематичної похибки виготовлення первинного перетворювача та на його основі побудовано апаратні засоби для вимірювань параметрів частотно-модульованого сигналу. У результаті статистичної обробки дослідних даних із використанням інформаційного підходу встановлено, що метрологічні характеристики запропонованих апаратних засобів відповідають вимогам по точності вимірювання сигналів флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покусаев М. Н. Экспериментальное определение степени неравномерности сращения вала машинно-двигательного комплекса судна пр. 1557 / М. Н. Покусаев, К. О. Сибиряков, А. В. Шевченко // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2(43). – С. 140–144.
2. Гребенников С. А. Адаптивное управление топливоподачей ДВС по показателям неравномерности вращения коленчатого вала / С. А. Гребенников, А. С. Гребенников, А. В. Никитин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 2(71). – Вып. 2. – С. 80–83.
3. Боднар Б. Є. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого валу дизеля / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – Вып. 1(43). – С. 113 – 118.
4. Марченко Б. Г. Теория диагностики энергоагрегатов по девиации вращающихся узлов и ее практическое применение для дизель-электрических генераторов / Б. Г. Марченко, М. В. Мыслович // Техническая электродинамика. – Ч. 1, № 5, 1998. – С. 36–40 ; Ч. 2, № 6, 1998. – С. 39–42 ; Ч. 3, № 1, 1999. – С. 59–63 ; Ч. 4, № 4, 1999. – С. 40–45.
5. Горлач А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – Киев : Техника, 1989. – 151 с.
6. Мягков В. Д. Допуски и посадки / В. Д. Мягков. – Ленинград : Машиностроение, Ч. 2, 1978. – С. 545–1032.
7. А. с. 1538679 СССР. МКИ G 01 M 15/00. Устройство для контроля неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания / Б. Г. Марченко, А. Н. Борисенко, А. Ф. Еникеев // Харьковский политехнический институт. – № 4428977 ; заявл. 23.05.88 ; опубл. 15.09.89, Бюл. № 34.