Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4

Вібрації в техніці та технологіях

№4(111)

2023

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 4 (111)

Вінниця 2023

ВІБРАЦІЇ В ТЕХНІЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЯХ

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2023. – 4 (111) – 99 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 7 від 02.12.2023 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор, академік НААН України, Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік НААН України, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік НААН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Матвєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор, академік НАН, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор ***Замрій М.А.***

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: *http://vibrojournal.vsau.org/* **Електронна адреса: *vibration.vin@ukr.net***

З М І С Т

1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН

Федоскіна О.В., Єрісов М.М., Федоскін В.О., Корніленко К.І.
ДО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПОЛОТНА ВІБРОТРАНСПОРТЕРА СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ……..…5

Борисюк Д.В., Твердохліб І.В., Купчук І.М., Ковальчук О.О.
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІБРОАКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ ОТРИМАНОГО ПРИ ВІБРОАКУСТИЧНОМУ ДІАГНОСТУВАННІ МАШИН……...11

Обертюх Р.Р., Слабкий А.В., Бакалець Д.В.
ГІДРОІМПУЛЬСНИЙ ВІБРАТОР – ГІДРОЦИЛІНДР НА БАЗІ КІЛЬЦЕВИХ ПРУЖИН З ВБУДОВАНИМ ПАРАМЕТРИЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ІМПУЛЬСІВ ТИСКУ……..16

Борисюк Д.В., Твердохліб І.В., Гудок В.С., Коробко Д.О.
ПОХИБКИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРИ ВІБРОАКУСТИЧНОМУ ДІАГНОСТУВАННІ…….24

Бурлака С.А., Анісімов В.Ф., Ковтун О.Л., Черній В.І.
ВСТАНОВЛЕННЯ ОСНОВНИХ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАСИЧНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ЄМНОСТЕЙ З ОДНОРІДНИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ……...31

2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА

Кириченко Р.В., Бурлака С.А.
ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІВАЛОК ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА..37

Грабко В.В., Проценко Д.П., Бартецький А.А., Чмих К.В.
СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ FPGA……47

Ярошенко Л.В., Колісник М.А., Штуць А.А., Присяжнюк Ю.С.
ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПІД ЧАС ПРЯМОГО ВИТИСКУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ..…….54

Паладійчук Ю.Б., Стецюк П.М.
ОПТИМІЗАЦІЯ ТРИВАЛОСТІ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАКОЧУВАЛЬНОГО РОЛИКА…...……..68

Рябошапка В.Б., Жарський М.М., Жарський Р.М.
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРИЧІПНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИННИХ АГРЕГАТІВ ……..…75

Рябошапка В.Б., Музичук В.І., Івацко В.П.
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПЛУНЖЕРНИХ ПАР ПАЛИВНОГО НАСОСУ ВИСОКОГО ТИСКУ ДИЗЕЛІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА ……..……81

Швець Л.В., Яківчук С.В.
ОЦІНКА МАКСИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ, ДОСЯГНУТОЇ ПІД ЧАС ТВЕРДІННЯ БЕТОНУ 88

3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА

Aliiev E., Kobets O., Kalyna V.
JUSTIFICATION OF THE CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL DESIGN OF THE FEED PELLETIZER……..94

Борисюк Д.В.
к.т.н., доцент

Вінницький національний технічний університет

Твердохліб І.В.
к.т.н., доцент

Гудок В.С.
магістрант

Вінницький національний аграрний університет

Коробко Д.О.
старший оператор

ТОВ "Підприємство АВІС"

Borysiuk D.
Ph.D. of Engineering, Senior Lecturer

Vinnytsia National Technical University

Tverdokhlib I.
Ph.D. of Engineering, Associate Professor

Hudok V.
graduate student

Vinnytsia National Agrarian University

Korobko D.
senior operator

LLC "AVIS Enterprise"

УДК 620.004
DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-4

ПОХИБКИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРИ ВІБРОАКУСТИЧНОМУ ДІАГНОСТУВАННІ

Інтенсивний розвиток засобів обчислювальної техніки, цифрових методів вимірювання і мікроелектронної елементної бази створили технічні передумови для розробки і широкого впровадження в різних галузях науки і техніки цифрових вимірювальних приладів. Ці прилади відрізняються від аналогових приладів більшою функціональністю, вищою точністю, можливістю запам'ятовувати поодинокі і періодичні сигнали, реєструвати «передісторію» сигналу і можливістю автоматизації реєстрації досліджуваних сигналів та вимірювання їх параметрів. Цифрові вимірювальні прилади дають змогу проводити внутрішню, за допомогою власних мікропроцесорних пристроїв, або зовнішню (на основі персональних комп'ютерів, або потужниших електронно-обчислювальних машин) цифрову обробку сигналів, що суттєво підвищує їх метрологічні характеристики і достовірність одержаної за допомогою них інформації. Прогрес в науці і техніки неможливий без розвитку цифрових методів вимірювання на основі цифрових приладів і програмного забезпечення для них, які в більшості розвинутих країн вибрані за пріоритетні напрямки. Розробка цифрових вимірювальних приладів йде в напрямку підвищення швидкодії внутрішнього аналого-цифрового перетворювача, чутливості і точності вимірювань.

В статті представлено огляд похибок цифрової обробки сигналів отриманих при віброакустичному діагностуванні машин. Розглянуто способи оцінки даних похибок при аналізі роботи системи цифрової обробки сигналів.

Розглянуто похибки граничних циклів низького та високого рівня. Ці помилки мають аномальний характер і виникають при слабкому вхідному сигналі або при сильному вхідному сигналі, що виходить за межі динамічного діапазону фільтра. Похибки граничного циклу низького рівня проявляються у вигляді періодичних коливань на виході фільтра або у вигляді постійного рівня вихідного сигналу при відсутності сигналу на вході. Похибки граничного циклу високого рівня виникають через переповнення розрядної сітки результатом підсумовування при використанні додаткового коду.

Ключові слова: *віброакустичне діагностування, аналоговий сигнал, цифровий сигнал, аналого-цифрове перетворення, похибка дискретизації, похибки квантування, похибка обчислень.*

Вступ. Використання цифрової обробки сигналів дозволяє суттєво спростити апаратні засоби і підвищити ефективність досліжень шляхом ускладнення алгоритмів обробки без переробки схеми. Сутність цифрової обробки полягає в тому, що фізичний

сигнал (напруга, струм) перетворюється в послідовність чисел, яка потім піддається математичним перетворенням в обчислювальному пристрої. Трансформований цифровий сигнал (послідовність чисел) при необхідності може бути перетворений назад в напругу або струм [1, 2].

Основна частина. Вихідний фізичний сигнал є безперервною функцією часу. Такі сигнали, визначені в усі моменти часу, називаються аналоговими $x_a(t)$. Послідовність чисел, що представляє сигнал при цифровій обробці, є дискретним рядом і не може повністю відповідати аналоговому сигналу. Числа, що складають послідовність, є значеннями сигналу в окремі (дискретні) моменти часу і називаються відліками сигналу. Як правило, відліки беруться через рівні проміжки часу T, називаються періодом дискретизації (або інтервалом, кроком дискретизації). Величина, зворотна періоду дискретизації, називається частотою дискретизації: $f_д = 1/T$.

В загальному випадку подання сигналу набором дискретних відліків призводить до втрати інформації, так як ми нічого не знаємо про поведінку сигналу в проміжках між відліками. Однак, існує клас аналогових сигналів, для яких така втрата інформації не відбувається і які можуть бути точно відновлені за значеннями своїх дискретних відліків.

Процес перетворення аналогового сигналу в послідовність відліків називається дискретизацією, а результат такого перетворення - дискретним сигналом [3, 4].

Дискретний сигнал описується гратчастою функцією $x(nT)$, яка приймає будь-які значенні в межах деякого інтервалу, в той час як незалежна змінна (час) приймає лише дискретні значення, наприклад, з ряду рівновіддалених значень $t = nT$ (n = 0, 1, 2, ...) [3, 5].

При обробці віброакустичного сигналу в обчислювальних пристроях його відліки представляються у вигляді двійкових чисел, що мають обмежене число розрядів. Внаслідок цього відліки можуть приймати лише кінцеву кількість значень і, отже, при поданні сигналу неминуче відбувається його округлення. Процес перетворення відліків сигналу в числа називається квантуванням за рівнем, а виникаючі при цьому помилки округлення - помилками (або шумами) квантування.

Сигнал, дискретний у часі, але не квантований за рівнем, називається дискретним сигналом. Сигнал, дискретний у часі і квантований за рівнем, називають цифровим сигналом $x_ц(nT)$. Сигнали, квантовані за рівнем, але безперервний в часі, на практиці зустрічаються рідко. Різницю між аналоговими, дискретними і цифровими віброакустичними сигналами демонструє рис. 1 [1, 6].

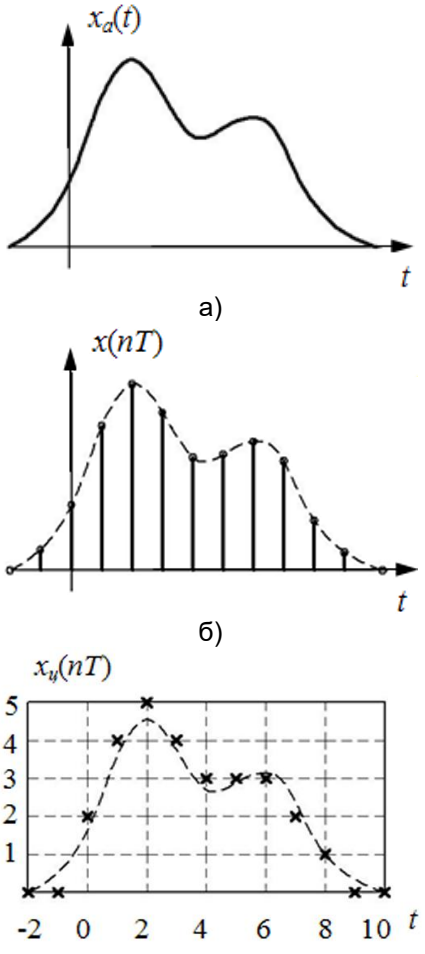

Рис. 1. Графічне зображення сигналів: а – аналоговий; б – дискретний; в – цифровий.

Похибки цифрової обробки сигналів розрізняють насамперед за місцем їх виникнення. Кожен з елементів системи цифрової обробки сигналів є джерелом похибки. При аналізі цих похибок зручно об'єднати їх в три групи [7]:

1. Похибки дискретизації і відновлення безперервного сигналу;
2. Похибки квантування вхідного сигналу;
3. Похибки обчислень, що виникають в процесі цифрової обробки сигналу.

Розглянемо способи оцінки цих похибок при аналізі роботи системи цифрової обробки сигналів.

Похибки дискретизації і відновлення. Аналіз похибок дискретизації зводиться до задачі вибору кроку дискретизації за часом T, виходячи з допустимого рівня похибки і характеристик вхідної суміші сигналу і перешкод. Найбільш просто ця задача вирішується для сигналів з обмеженим

спектром на підставі теореми В.А. Котельникова (теореми відліків). Згідно з цією теоремою сигнал $x_н(t)$, в спектрі якого не міститься частот вище $\omega_в$, повністю визначається вибірковими значеннями $x_н(nT)$, відліченими через інтервали часу $T = \pi/\omega_в = 1/2f_B$ (де f_B – високочастотна складова спектра сигналу). Такий сигнал можна представити за допомогою ряду В.А. Котельникова:

$$x_н(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\frac{\sin\omega_в(t-nT)}{\omega_в(t-nT)}. \quad (1)$$

Практично всі реальні сигнали є фінітними (мають початок і кінець) і, отже, ряд (1) може бути отриманий тільки в скороченому вигляді. Тоді замість $x_н(t)$, отримуємо

$$x^*_н(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)\frac{\sin\omega_в(t-nT)}{\omega_в(t-nT)}. \quad (2)$$

де $N = 2T_c f_B$ – число ступенів свободи сигналу тривалістю T_c.

В спектрі фінітного сигналу неможливо вказати значення частоти $\omega_в$, вище якого спектр тотожно дорівнює нулю. Це означає, що застосування ряду (1о) передбачає наявність ще одного джерела похибки, пов'язаного з відкиданням частини спектра, яка відповідає частотам вище $\omega_в$.

У загальному випадку похибка дискретизації $\Delta x_н(t) = x_н(t) - x^*_н(t)$ є випадковим процесом і залежить від значення T і характеристик процесу $x_н(t)$. Наприклад, для стаціонарного випадкового процесу $x_н(t)$ з нульовим математичним очікуванням, дисперсією σ^2 і односторонньою спектральною щільністю $S_н(\omega)$ дисперсія помилки $x_н(t)$ буде:

$$\sigma^2_\Delta = \frac{2}{\pi}\int_{\omega_в}^{\infty} S_н(\omega)d\omega. \quad (3)$$

Оскільки $\sigma^2 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} S_н(\omega)d\omega$, то з виразу (3) випливає, що дисперсія похибки дискретизації чисельно дорівнює подвоєною потужності високочастотної складової сигналу $x_н(t)$, спектр якої знаходиться на частотах вище $\omega_в$.

Якщо умови використання виразу (3) виконуються, то, ставлячи собі допустимим для практики значення дисперсії похибки про $\sigma^2_\Delta = (0{,}05...0{,}1)\sigma^2$, неважко визначити значення $\omega_в$ і, отже, значення кроку дискретизації $T = \pi/\omega_в$.

Найбільш простий і очевидний спосіб зменшення похибки відновлення - це підвищення частоти дискретизації $\omega_в = 2\pi/T$. Однак при повільному зменшенні спектра із зростанням частоти такий спосіб є недоцільним. Інший спосіб полягає в тому, що перед дискретизацією безперервний сигнал $x_н(t)$ пропускається через фільтр низьких частот, який виконує операцію «укорочення» спектра і послаблює вплив «хвостів» спектра $S_н(\omega)$. Похибка зменшується приблизно в 2 рази внаслідок того, що на спектр дискретного сигналу $S(\omega)$ в смузі пропускання фільтра низьких частот ($-\omega_в$; $\omega_в$) не накладає «хвости» від сусідніх смуг.

Для кількісної оцінки похибки відновлення безперервного сигналу важко отримати прості розрахункові співвідношення. Тому на практиці частота дискретизації вибирається не $2\omega_в$, як випливає з теореми В.А. Котельникова, а в 2 ... 5 разів вище.

Отже, для вибору періоду дискретизації можна остаточно рекомендувати формулу

$$T = (0{,}2...0{,}5)\frac{\pi}{\omega_в}, \quad (4)$$

де $\omega_в$ визначається з урахуванням виразу (3).

Похибки квантування вхідного сигналу. Ці похибки з'являються в результаті нелінійного перетворення дискретного сигналу $x(nT)$ в цифровий сигнал $x_ц(nT)$. У реальних схемах аналого-цифрових перетворювачів дискретизатор зазвичай виконує дві операції: вибірку значення сигналу $x_н(t)$ і її фіксацію на весь період дискретизації (t, $t + T$). При аналізі похибки квантування використовують модель дискретизатора у вигляді ідеального ключа, який замикається на нескінченно малий час з періодом T і передає відлік сигналу $x(nT) = x_н(t)|_{t = nT}$ на вхід квантувача.

Суть операції квантування полягає в ототожненні відліку сигналу $x(nT)$ з найближчим рівнем квантування $x_ц$ (або округленні x до найближчого $x_ц$). При цьому число рівнів квантування буде

$$m = (x_{max} - x_{min})/\Delta, \quad (5)$$

де x_{max}, x_{min} – максимальне і мінімальне значення сигналу на вході аналого-цифрового перетворювача (передбачається, що $x > 0$);
Δ – крок квантування.

Для пристрою обробки сигналів з рівномірним квантуванням (Δ не залежить від значення x) зазвичай вибирають

$$\Delta = x_{min} \le \sigma_ш, \quad (6)$$

де $\sigma_ш$ – середньоквадратичне значення шуму на вході аналого-цифрового перетворювача.

В цьому випадку необхідне число розрядів аналого-цифрового перетворювача визначається виразом

$$l_{АЦП} = |\log_2(m + 1)| = |\log_2 D|, \quad (7)$$

де $m = D - 1$, $D = x_{max}/x_{min}$ - динамічний діапазон вхідного сигналу $|x|$;
$|x|$ - найближче ціле число, не менше x.

При використанні методу комплексної обвідної сигнали $A[n]$, $B[n]$ є двополярними і, отже, є потреба у додатковому розряді для кодування полярності (знака).

Часто $l_{АЦП}$ вибирається в діапазоні (6 ... 8) [8].

З операцією квантування пов'язана похибка, яка називається шумом квантування. При округленні x до найближчого рівня $x_ц$ виникає похибка $\xi = x - x_ц$, яка не перевищує по модулю значення $\Delta/2$. При малому кроці Δ розподіл випадкової величини ξ близький до рівномірного на інтервалі $(-\Delta/2, \Delta/2)$ і дисперсію шуму квантування, знаходять за допомогою виразу

$$\sigma_\xi^2 = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} \xi^2 p(\xi) d\xi = \frac{\Delta^2}{12}, \qquad (8)$$

де $p(\xi)$ – комплексна змінна:

$$p(\xi) = \begin{cases} 1/\Delta, & |\xi| \le \Delta/2; \\ 0, & |\xi| > \Delta/2. \end{cases}$$

Для кількісної оцінки впливу шуму квантування $\xi(nT)$ цифровий сигнал подають як

$$x_ц(nT) = x(nT) + \xi(nT), \qquad (9)$$

і проводять аналіз проходження адитивної суміші дискретного сигналу $x(nT)$ і шуму квантування $\xi(nT)$ через лінійний пристрій обробки. При цьому необхідно знати спектрально-кореляційні характеристики $\xi(nT)$.

Шум квантування ξ можна уявити як результат перетворення сигналу x в безінерційному нелінійному перетворювачі [6].

При досить малому кроці Δ і правильно обраному періоді дискретизації T сусідні відліки $x(nT)$ і $x(n + 1)T)$ розрізняються на багато кроків квантування. Отже, значення $\xi(nT)$ і $\xi(n + 1)T)$ виявляються практично некорельованими. Це означає, що випадковий процес $\xi(nT)$ є більш широкосмуговим, ніж процес $x(nT)$. Тому можна вважати $\xi(nT)$ дискретним білим шумом (спектральні складові якого рівномірно розподілені по всьому діапазону задіяних частот) з дисперсією $\sigma_\xi^2 = \Delta^2/12$, який діє на виході аналого-цифрового перетворювача.

Перерахуємо дисперсію шуму квантування на вході дискретизатора за допомогою виразу

$$\sigma_\xi^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} S_\xi d\omega, \qquad (10)$$

де S_ξ – двостороння спектральна щільність еквівалентного білого шуму на вході дискретизатора.

З виразу (10) випливає, що

$$S_\xi = \sigma_\xi^2 T = \frac{\Delta}{12} T. \qquad (11)$$

Еквівалентний шум можна розглядати як додаток до шуму, що надходить на вхід ідеального аналого-цифрового перетворювача разом з сигналом. Потрібно, щоб цей додаток складав малу частину вхідного шуму з дисперсією $\sigma_ш^2$, тобто

$$\sigma_\xi^2 = S_\xi \Delta F \le \xi \sigma_ш^2, \quad \xi << 1, \qquad (12)$$

де ΔF – еквівалентна шумова смуга пропускання пристрою обробки сигналів, яка зазвичай відома розробнику.

Приймаючи ξ = 0,05 ... 0,1, отримуємо додаткову умову для вибору кроку квантування:

$$\Delta = \sqrt{\xi - \frac{12\sigma_ш^2}{T\Delta F}}. \qquad (13)$$

Якщо умова (12) не виконується, то потрібно здійснити коригування Δ і $l_{АЦП}$ або періоду дискретизації T. Очевидно, чим вище допустимий рівень дисперсії шуму квантування σ_ξ^2, тим більше допустимий крок квантування Δ і менше необхідно число розрядів $l_{АЦП}$.

Похибки обчислень, що виникають в процесі цифрової обробки сигналу. Похибки цієї групи перш за все залежать від виду алгоритму обчислень. У пристроях цифрової обробки сигналів загального застосування базовим алгоритмом є алгоритм обчислення кінцевої суми добутків:

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} a_n x_n, \qquad (14)$$

де a_n – постійні коефіцієнти, відомі заздалегідь; x_n – елементи змінної вхідної послідовності даних (сигналу) або проміжні результати.

Похибки обчислень при реалізації базового алгоритму (14) обумовлені в основному ефектами кінцевої розрядності через кінцеве число розрядів в реєстрах пам'яті цифрового процесора сигналів.

Зазвичай в цифровому процесорі сигналів загального застосування використовується двійкова система числення в додатковому коді і форма подання числа з фіксованою комою. Для таких цифрових процесорів сигналів похибки обчислень можна розділити на три підгрупи [2, 8, 9]:

1. Помилка квантування величин a_n і добутків $a_n x_n$ у формулі (14);

2. Помилки переповнення розрядної сітки процесора при обчисленні суми N доданків;

3. Помилки граничних циклів низького або високого рівня.

При використанні двійкової арифметики з фіксованою комою обов'язковою є операція масштабування вхідних даних x_n, коефіцієнтів a_n і кінцевого результату y, за допомогою якої забезпечується виконання умов $|x_n| < 1$, $|a_n| < 1$, $|y| < 1$. При цьому двійкове число, наприклад x, і його десятковий еквівалент $x_д$ зв'язані співвідношенням

$$x_д = -x^{(0)} + \sum_{i=1}^{b} x^{(i)} 2^{-i}, \qquad (15)$$

де $x^{(i)} \in (0,1)$ при $i \neq 0$ – значення i-го розряду двійкового числа;

$x^{(0)} \in (0,1)$ – знаковий розряд двійкового числа;

b – довжина коду числа x (без урахування знака).

Крок квантування визначається перевагою меншого розряду і складає величину $\Delta = 2^{-b}$.

Квантування величин a_n і добутків $a_n x_n$ здійснюється також, як і вхідного сигналу. При цьому застосовуються два види квантування: округлення і усічення чисел. Округлення виконують за правилом: якщо старший розряд частини, яку відкидаємо двійкового числа «1», то до молодшого розряду, частини якого зберігаються (b-й розряд) додається «1». В іншому випадку частина, яку відкидаємо просто ігнорується. При усіченні частина квантованого числа, що відкидається, ігнорується без аналізу значення її старшого розряду.

Похибки квантування коефіцієнтів a_n призводять до порушення положення нулів і полюсів передавальної функції цифрового фільтра в z-площині, що проявляється у формі спотворень частотної характеристики фільтра. При цьому число розрядів l_k вибирається з умови задоволення вимог до форми частотної характеристики фільтра. Похибки квантування коефіцієнтів не призводять до збільшення шуму квантування на виході фільтра.

При обчисленні добутку b_1-розрядного числа a_n і b_2-розрядного числа x_n виходить ($b_1 + b_2$) – розрядне число (без урахування знакових розрядів). У рекурсивном цифровому фільтрі добуток, отриманий на (n – 1)-му кроці обчислень, виступає в якості співмножника на n-му кроці. Отже, від кроку до кроку розрядність добутків зростає і округлення (або усічення) добутків є необхідним. Квантування добутків $a_n x_n$ викликає додатковий шум на виході фільтра. Рівень шуму квантування залежить від структури цифрового фільтра і вимог до його характеристик. Методика врахування даного шуму аналогічна методиці врахування шуму квантування вхідного сигналу.

В інженерних розрахунках допустимо вибирати розрядність реєстрів коефіцієнтів l_k і розрядність вихідних реєстрів множників $l_{мн}$ наближено за формулою

$$l_{мн} = l_k = l_{АЦП} + (2 \ldots 4). \qquad (16)$$

Звернемося тепер до похибок переповнення розрядної сітки процесора, які можуть виникнути тільки в суматорах при використанні арифметики з фіксованою комою. При підсумовуванні (або відніманні) двох довільних чисел, по модулю менших «1», результат може бути більше «1», що викликає переповнення розрядної сітки і призводить до неправильного результату.

Переповнення легко виявляється за допомогою простих логічних операцій. Можна показати, що результат операції правильний, якщо одночасно відсутнє або присутнє перенесення з старшого розряду числа $p_{с.р.}$ і знакового розряду $p_{з.р.}$. В іншому випадку має місце переповнення. Для сигналізації переповнення можна використовувати логічну операцію «виключне АБО»:

$$p = p_{с.р.} \oplus p_{з.р.} \qquad (17)$$

Якщо p = 1, то виникло переповнення і результат невірний.

Для цифрових фільтрів характерна операція алгебраїчного підсумовування декількох чисел, причому проміжні результати можуть бути більше «1», а остаточний результат виходить менше «1». У зв'язку з цим слід зазначити дуже важливу перевага додаткового коду, що полягає в тому, що при виконанні підсумовування в цьому коді проміжне переповнення розрядної сітки не впливає на остаточний результат. Отже, досить використовувати тільки одну логічну операцію для виявлення переповнення сітки кінцевим результатом підсумовування [3, 9, 10].

Умови, що виключають переповнення розрядної сітки, повинні виконуватися для всіх суматорів цифрового фільтра. Це досягається зазвичай включенням в фільтр масштабуючих множників і виконанням умови узгодження динамічного діапазону вхідного сигналу з динамічним діапазоном цифрового фільтра.

Розглянемо похибки граничних циклів низького або високого рівня. Ці помилки мають аномальний характер і виникають при слабкому вхідному сигналі або при сильному вхідному сигналі, що виходить за межі динамічного діапазону фільтра. Похибки граничного циклу низького рівня проявляються у вигляді періодичних коливань на виході фільтра або у вигляді постійного рівня вихідного сигналу при відсутності сигналу на вході. Причиною цих похибок є нелінійний характер операції округлення.

Похибки граничного циклу високого рівня виникають через переповнення розрядної сітки результатом підсумовування при використанні додаткового коду. По суті, це окремий вид

похибок переповнення, який призводить до незгасаючих коливань великої амплітуди на виході фільтра, не пов'язаним з вхідним сигналом. Для виключення таких похибок застосовують спеціальні суматори з насиченням. При цьому цифровий фільтр стає нелінійним, що призводить до додаткових похибок. Тому завжди бажано за допомогою масштабування сигналів в цифровому фільтрі забезпечити такий режим роботи, при якому відносний час входження фільтра в нелінійний режим виявляється малим.

Висновок. Включення до складу діагностичної системи пристроїв цифрової обробки сигналів неминуче призводить до появи додаткових похибок. Однак переваги цифрової обробки перед аналоговою при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки такі, що дозволяють отримати значну перевагу в якості функціонування навіть з урахуванням додаткових похибок.

Список використаних джерел

1. Ушенко Ю. О., Гавриляк М. С., Талах М. В., Дворжак В. В. Основи та методи цифрової обробки сигналів: від теорії до практики. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 308 с.

2. Наконечний А. Й., Стахів Р. І., Наконечний Р. А. Обробка сигналів. Львів : Растр-7, 2017. 217 с.

3. Попов А. О. Теорія сигналів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 270 с.

4. Шинкарук О. М., Чесановський І. І. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей. *Зб. наук. пр. Військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченко.* 2009. Вип. № 17. С. 89-92.

5. Stanneby Dag. Digital Signal Processing: DSP and Applications. Oxford: Newnes, 2001. 239 p.

6. Борисюк Д. В., Яцковський В. І. Системи вимірювання та аналізу вібрації, удару і шуму. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 4 (72). С. 5-12.

7. Борисюк Д. В., Спірін А. В., Твердохліб І. В., Гунько І. В. Методика визначення місця встановлення акселерометрів при віброакустичному діагностуванні керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. Вип. 27. С. 112-119.

8. Борисюк Д. В., Спірін А. В., Твердохліб І. В., Гунько І. В. Віброакустичне діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів. *Сільськогосподарські машини*. 2017. Вип. 37. С. 6-16.

9. Біліченко В. В., Романюк О. Н., Яцковський В. І., Борисюк Д. В. Монтаж акселерометрів при віброакустичному діагностуванні машин і механізмів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 2 (97). С. 52-55.

10. Яцковський В. І., Борисюк Д. В., Романюк О. Н., Біліченко В. В. Аналого-цифрове перетворення віброакустичних сигналів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2 (85). С. 78-80.

References

1. Ushenko YU. O., Havrylyak M. S., Talakh M. V., & Dvorzhak V. V. (2021). Osnovy ta metody tsyfrovoyi obrobky syhnaliv: vid teoriyi do praktyky [Fundamentals and methods of digital signal processing: from theory to practice]. Chernivtsi : Chernivets'kyy nats. un-t im. yu. Fed'kovycha [in Ukrainian].

2. Nakonechnyy A . Y., Stakhiv R. I., & Nakonechnyy R. A. (2017). Obrobka syhnaliv [Signal processing]. L'viv : Rastr-7 [in Ukrainian].

3. Popov A . O. (2019). Teoriya syhnaliv [Theory of signals]. Kyyiv : KPI im. Ihorya Sikors'koho [in Ukrainian].

4. Shynkaruk O . M., & Chesanovs'kyy I. I. (2009). Obrobka radiolokatsiynykh syhnaliv z urakhuvannyam vnutrishn'oimpul'snykh fazochastotnykh nestabil'nostey [Processing of radar signals taking into account intra-pulse phase-frequency instabilities]. *Zb. nauk. pr. Viys'k. in-tu Kyyivs'koho nats. un-tu im. Tarasa Shevchenka* - Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University, 17, 89-92 [in Ukrainian].

5. Stanneby Dag (2001). Digital Signal Processing: DSP and Applications. Oxford: Newnes [in English].

6. Borysyuk D. V., & Yatskovs'kyy V. I. (2013). Systemy vymiryuvannya ta analizu vibratsiyi, udaru ta shumu [Measurement and analysis systems of vibration, impact and noise]. Vybratsiyi u tekhnitsi ta tekhnolohiyakh - *Vibrations in engineering and technology,* 4 (72), 5-12 [in Ukrainian].

7. Borysyuk D. V., Spirin O. V., Tverdokhlib I. V., & Hun'ko I. V. (2017). Metodyka vyznachennya mistsya vstanovlennya akselerometriv pry vibroakustychnomu diahnostuvanni kerovanykh mostiv kolisnykh sil's'kohospodars'kykh traktoriv [The method of determining the place of installation of accelerometers during vibroacoustic diagnosis of steerable bridges of wheeled agricultural tractors]. Podil's'kyy visnyk: sil's'ke hospodarstvo, tekhnika, ekonomika - *Podilsky Visnyk: agriculture, technology, economy*, 27, 112-119 [in Ukrainian].

8. Borysyuk D. V., Spirin O. V., Tverdokhlib I. V., & Hun'ko I. V. (2017). Vybroakustychne diahnostuvannya kerovanykh mostiv kolisnykh sil's'kohospodars'kykh traktoriv [Vibroacoustic diagnostics of steered axles of wheeled agricultural tractors]. Sil's'kohospodars'ki mashyny - *Agricultural machinery*, 37, 6-16 [in Ukrainian].

9. Bilichenko V. V., Romanyuk O. M., Yatskovs'kyy V. I., & Borysyuk D. V. (2017). Montazh akselerometriv pry vybroakustychnomu diahnostuvanni mashyn ta mekhanizmiv [Installation of accelerometers for vibroacoustic diagnosis of machines and mechanisms]. Tekhnika, enerhetyka, transport APK - **Technology, energy, transport of agricultural industry,** 2 (97), 52-55 [in Ukrainian].

10. Yatskovs'kyy V. I., Borysyuk D. V., Romanyuk O. M., & Bilichenko V. V. (2017). Analoho-tsyfrove peretvorennya vibroakustychnykh syhnaliv [Analog-digital conversion of vibroacoustic signals]. Vybratsiyi u tekhnitsi ta tekhnolohiyakh - *Vibrations in engineering and technology*, 2 (85), 78-80 [in Ukrainian].

ERRORS IN DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS IN VIBROACOUSTIC DIAGNOSIS

Intensive development of computer equipment, digital measurement methods and microelectronic element base created technical prerequisites for the development and wide implementation of digital measuring devices in various fields of science and technology. These devices differ from analog devices by greater functionality, higher accuracy, the ability to memorize single and periodic signals, record the "prehistory" of the signal, and the ability to automate the registration of the investigated signals and the measurement of their parameters. Digital measuring devices make it possible to carry out internal, using their own microprocessor devices, or external (based on personal computers or more powerful electronic computing machines) digital processing of signals, which significantly increases their metrological characteristics and the reliability of the information obtained with their help. Progress in science and technology is impossible without the development of digital measurement methods based on digital devices and software for them, which are selected as priority directions in most developed countries. The development of digital measuring devices goes in the direction of increasing the speed of the internal analog-digital converter, sensitivity and accuracy of measurements.

An overview of errors in digital processing of signals obtained during vibroacoustic diagnostics of machines is presented in the article. Methods of evaluating data errors in analyzing the operation of a digital signal processing system are considered.

The errors of low and high level limit cycles are considered. These errors are anomalous and occur when the input signal is weak or when the input signal is strong and outside the dynamic range of the filter. Low-level limit cycle errors are manifested as periodic fluctuations at the filter output or as a constant level of the output signal in the absence of a signal at the input. High-level limit cycle errors occur due to overflow of the bit grid as a result of summation when using additional code.

Key words: *vibroacoustic diagnosis, analog signal, digital signal, analog-digital conversion, sampling error, quantization error, calculation error.*

Відомості про авторів

Борисюк Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Воїнів–Інтернаціоналістів, 7, ауд. 3222, e-mail: bddv@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8572-6959).

Твердохліб Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, https://orcid.org/0000-0003-1350-3232).

Гудок Василь Сергійович – магістр 2 року завчаггя зі спеціальності 208 Агроінженерія Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна 3, 21008,).

Коробко Дмитро Олександрович – старший оператор ТОВ "Підприємство АВІС".

Borysiuk Dmytro – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the department of automobiles and transport management of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, VoinovInternationalistov st., 7, room 3222, e-mail: bddv@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8572-6959).

Tverdokhlib Igor – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection of Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinniytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, https://orcid.org/0000-0003-1350-3232).

Hudok Vasyl - 2nd year master's degree in the specialty 208 Agroengineering of the Vinnytsia National Agrarian University (21008, Vinnytsia, 3 Sonyachna St., 21008).

Korobko Dmytro – is the senior operator of "AVIS Enterprise" LLC.